

Федеральное агентство по образованию
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.И. Рудской В.А. Лунев

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению “Металлургия”*



Санкт-Петербург
«Наука»
2008

УДК 621.771 (075.8)
ББК 34.621я73
Р 835

Рудской А. И., Лунев В. А. Теория и технология прокатного производства:
Учеб. пособие. — СПб.: Наука, 2008. — 527 с.

ISBN 978-5-02-025302-5

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту дисциплины “Обработка металлов давлением” подготовки дипломированного специалиста по направлению “Металлургия”. В нем изложены основные положения теории обработки металлов давлением, теории продольной прокатки, а также современная технология производства заготовки, сортового и листового проката, проанализированы типовые технологические схемы производства, приведены методы расчета технологических режимов. Подготовлено на основе лекций, читаемых студентам на кафедре пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по указанной специальности, может быть полезным для студентов смежных специальностей и инженеров-технологов, работающих в области обработки металлов давлением.

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД УГТУ *А.А. Богатов*,
чл.-кор. РАН, зам. ген. директора ЦНИИ КМ “Прометей” *В.В. Рыбин*

ISBN 978-5-02-025302-5

© Рудской А.И., Лунев В.А., 2008
© СПбГПУ, 2008
© Издательство “Наука”, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	8
Введение	9
ЧАСТЬ 1. ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	11
Глава 1. Общие вопросы деформации	11
1.1. Типы кристаллической решетки	11
1.2. Пластическая деформация монокристалла	14
1.3. Основные положения теории дислокаций	16
1.4. Особенности деформации поликристалла	18
1.5. Изменение свойств металла при пластической деформации	20
1.6. Процессы, протекающие при нагреве	21
1.7. Пластичность и разрушение металла при ОМД	25
1.8. Основные закономерности пластической деформации. Условие постоянства объема	27
1.9. Трение при ОМД	31
1.10. Влияние технологических факторов на коэффициент трения	35
Глава 2. Сжатие образца	37
2.1. Общие положения	37
2.2. Экспериментальные исследования процесса осадки	40
2.3. Теоретический анализ напряжений при осадке	45
2.4. Сила осадки	48
Глава 3. Очаг деформации при продольной прокатке	49
3.1. Показатели деформации при прокатке	49
3.2. Условия захвата и установившегося процесса	54
3.3. Общая характеристика очага деформации	57
3.4. Нейтральный угол	58
3.5. опережение при прокатке	60
3.6. Коэффициент трения при прокатке	63
Глава 4. Характер деформации при продольной прокатке	65
4.1. Средние очаги деформации	65
4.2. Высокие очаги деформации	70
4.3. Низкие очаги деформации	77
4.4. Несимметричная прокатка	84
4.5. Упругое сплющивание валков	88
4.6. Сверхнизкие очаги деформации	90
4.7. Уширение при прокатке	93

Глава 5. Силовые параметры прокатки	99
5.1. Распределение контактных напряжений по ширине полосы	99
5.2. Методика расчета силы прокатки	103
5.3. Силы и крутящие моменты на валках	104
5.4. Силы и моменты при прокатке на стане кварто	109
5.5. Силы, действующие на валки 12-валкового стана	112
5.6. Сопротивление металла деформации	114
Глава 6. Прокатка в калибрах	123
6.1. Основные понятия	123
6.2. Характеристики деформации металла в калибрах	126
6.3. Расположение калибров на валках	127
6.4. Деформация металла в простых калибрах	130
6.5. Системы калибров	139
6.5.1. Система ящичных калибров	139
6.5.2. Система ромб—квадрат	141
6.5.3. Система овал—квадрат	142
6.5.4. Система овал — ребровой овал	144
6.6. Вытяжная способность системы калибров	146
6.7. Оценка деформации при прокатке в сложных калибрах	151
Глава 7. Продольная периодическая прокатка	154
7.1. Общие положения	154
7.2. Очаг деформации	156
7.3. Параметры очага деформации	159
7.3.1. Длина дуги захвата	159
7.3.2. Условия захвата	160
7.3.3. Угол нейтрального сечения γ , опережение и отставание	161
7.3.4. Уширение	164
7.3.5. Сила прокатки	165
7.4. Контуры опережения и отставания	167
ЧАСТЬ 2. ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВКИ И СОРТОВОГО ПРОКАТА	171
Глава 8. Общие вопросы производства металлургической продукции	171
8.1. Производственный цикл	171
8.2. Общая характеристика металлургического производства	172
8.3. Управление производством и качеством продукции	174
8.4. Генеральный план металлургического завода	180
8.5. Основные тенденции развития металлургического производства	183
8.6. Структура прокатного производства	185
8.7. Общая характеристика заготовки для проката	187
8.8. Сортамент сортового и листового проката	190
8.9. Сортамент продукции четвертого передела	194
Глава 9. Производство катаных блюмов и слябов	196
9.1. Общая технология производства катаных блюмов и слябов	196
9.2. Нагрев слитков	201
9.3. Валки блюминга и режимы обжатия на блюминге	204
9.4. Особенности режима обжатия на слябинге	207
9.5. Скоростной режим деформации	208
9.6. Характер деформации металла при прокатке	210
9.7. Формирование технологической обреза	212

Глава 10. Расчет режимов обжаривания	214
10.1. Факторы, ограничивающие обжаривания	214
10.2. Расчет режимов обжаривания на блюминге как оптимизационная задача	221
10.3. Методика расчета режима обжаривания на блюминге	225
10.4. Пример расчета режима обжаривания на блюминге	229
10.5. Особенности расчета режима обжаривания на слябинге	235
Глава 11. Прокатка на заготовочных станах	237
11.1. Типы непрерывно-заготовочных станов	237
11.2. Калибровка валков НЗС	239
11.3. Система резки заготовки на мерные длины	242
11.4. Особенности прокатки и расчета режима обжаривания на одноклетевых 3-валковых заготовочных станах	243
Глава 12. Дефекты заготовки и их устранение	245
12.1. Виды дефектов слитков и литой заготовки	245
12.2. Дефекты, возникающие при нагреве и прокатке	249
12.2.1. Дефекты, возникающие при неправильном нагреве	249
12.2.2. Дефекты, возникающие при горячей деформации	251
12.3. Методы обнаружения дефектов	252
12.3.1. Магнитные методы контроля	253
12.3.2. Вихретоковые методы контроля	256
12.3.3. Тепловые методы контроля	257
12.3.4. Электромагнитно-тепловые методы контроля	258
12.3.5. Ультразвуковые методы контроля	260
Глава 13. Производство сортового металла	260
13.1. Сортопрокатные станы	260
13.2. Требования к сортовому прокату по точности	275
13.3. Факторы, определяющие точность проката, и пути увеличения точности	279
13.3.1. Конструкция клетей и износ калибров	279
13.3.2. Колебания усилия прокатки	283
13.3.3. Скорость прокатки	284
13.3.4. Распределение температуры по длине раската	284
13.3.5. Жесткость клетки	286
13.4. Система автоматизированного управления толщиной проката	287
13.5. Технические средства измерения размеров сортового проката в про- цессе прокатки	288
13.6. Точность при прокатке на непрерывных станах	290
13.7. Прокатка на непрерывных проволочных станах	296
13.8. Термообработка сортового проката	303
13.8.1. Термоупрочнение арматурной стали	307
13.8.2. Термическая обработка фасонных профилей проката	309
13.8.3. Термообработка сортового металла для холодной высадки	310
13.9. Дефекты сортового проката и методы их обнаружения	311
13.10. Удаление поверхностных дефектов и окалины	314
13.11. Правка сортового проката	318
Глава 14. Прокатка и калибровка отдельных видов сортового проката	323
14.1. Схемы прокатки простых профилей	323
14.2. Расчет калибровки простых профилей	328
14.3. Прокатка и калибровка полосовой стали	336

14.4. Прокатка и калибровка угловой стали	340
14.5. Прокатка и калибровка двутавровых балок	347
14.6. Прокатка и калибровка швеллера	356
14.7. Прокатка и калибровка рельсов	361
14.8. Калибровка фасонных профилей проката	366
ЧАСТЬ 3. ЛИСТОПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	375
Глава 15. Производство толстого листа	375
15.1. Общие вопросы	375
15.2. Сортамент толстолистовой продукции и развитие толстолистого производства в России	376
15.3. Схемы деформации при прокатке	388
15.3.1. Поперечная схема прокатки	390
15.3.2. Продольная схема прокатки	391
15.3.3. Прокатка на угол	391
15.4. Формирование геометрии листа в плане	392
15.4.1. Формирование профиля в вертикальных валках	392
15.4.2. Формирование профиля в протяжных и уширительных пропусках	393
15.4.3. Формирование профиля в уширительных и продольных пропусках	395
15.5. Пути устранения недостатков продольной схемы прокатки	397
15.6. Термическая и термомеханическая обработка листа	402
15.7. Особенности расчета режима обжатия на толстолистовом стане	411
15.8. Поперечная и продольная разнотолщинность листа	413
15.9. Производство толстого биметаллического листа	419
Глава 16. Производство листа на широкополосных станах	424
16.1. Сортамент и общая технология	424
16.2. Улучшение качества поверхности листа	428
16.3. Температурный режим прокатки на НШПС	429
16.4. Продольная разнотолщинность листа	433
16.4.1. Колебания натяжения	433
16.4.2. Температурный клин	434
16.4.3. Неравномерность температуры по длине раската	437
16.4.4. “Всплывание” подшипников	437
16.4.5. Биение валков	438
16.4.6. Режимы прокатки и регулирования толщины	438
16.5. Поперечная разнотолщинность листа	440
16.6. Изменение ширины полосы при прокатке	444
16.7. Контролируемая прокатка на НШПС	445
16.8. Пути развития производства горячекатаного листа	450
16.9. Проблемы прокатки сверхтонкого листа	455
16.10. Расчет режимов обжатия на НШПС по температуре	459
16.11. Автоматизация управления производством и технологией производства	463
Глава 17. Производство холоднокатаного листа	465
17.1. Сортамент	465
17.2. Требования к качеству поверхности тонколистовой стали, предназначенной для штамповки	467
17.3. Стали для автомобилестроения	471

17.4. Технология производства конструкционного листа	477
17.4.1. Снятие окалины	478
17.4.2. Прокатка	481
17.4.3. Рекристаллизационный отжиг	485
17.4.4. Дрессировка	489
17.4.5. Формирование шероховатости валков и полосы	491
17.4.6. Отделочные операции	493
17.5. Продольная разнотолщинность холоднокатаного листа	496
17.6. Оптимизация обжатый на непрерывном стане по разнотолщинности	500
17.7. Способы уменьшения продольной разнотолщинности	502
17.8. Поперечная разнотолщинность и плоскостность полосы	505
17.9. Производство оцинкованного листа	511
17.10. Особенности производства других видов листа	516
17.10.1. Особенности производства жести	516
17.10.2. Особенности производства холоднокатаной нержавеющей стали	519
17.11. Производство электротехнического листа	520
Библиографический список	526

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЗСМК — Западно-Сибирский металлургический комбинат г. Кемерово

КарМК — Карагандинский металлургический комбинат ОАО “Миттал Стил Темиртау”, г. Темиртау

КМЗ — Коммунарский металлургический завод, г. Коммунарск, Украина

КМК — Кузнецкий металлургический комбинат, Ново-Кузнецк

КрМК — Криворожский металлургический комбинат, Украина

ММК — Магнитогорский металлургический комбинат ОАО “ММК”

НЛМК — Ново-Липецкий металлургический комбинат ОАО “НЛМК”

НТМК — Нижнетагильский металлургический комбинат

ОХМК — Орско-Халиловский металлургический комбинат “Носта” ОАО “Уральская сталь”

ЧелМЗ — Челябинский металлургический завод ОАО “Мечел”

ЧерМК — Череповецкий металлургический комбинат ОАО “Северсталь”

ВВЕДЕНИЕ

“Теория обработки металлов давлением” и “Технология обработки металлов давлением” являются базовыми курсами, определяющими мировоззрение будущего инженера по обработке металлов давлением. Несмотря на большое разнообразие технологических схем, основанных на обработке давлением, основной из них является прокатка. В теории продольной прокатки накоплен значительный экспериментальный материал, который получил исчерпывающее объяснение и обобщение. Достижения в области прокатной технологии весьма значительны. В связи с этим ГОС для инженеров по специальности “Обработка металлов давлением” включает теорию и технологию прокатки как обязательную составляющую общей подготовки специалистов по обработке металлов давлением (ОМД).

Во многих вузах, готовящих инженеров-технологов, оба курса строятся в одном ключе, как единый курс, поэтому необходим единый учебник по теории и технологии ОМД, не только раскрывающий основные технологические решения, но и объясняющий процессы, происходящие в металле при прокатке, при производстве проката на металлургическом предприятии. Необходимо продемонстрировать состояние и перспективы развития теории и технологии прокатки, отразить тенденции совершенствования прокатного производства. Учебное пособие должно быть построено на принципах свободного владения всеми знаниями, полученными студентом к моменту изучения этих курсов: механики деформируемой среды, организации производства, менеджмента, металловедения и термической обработки, математики, физики и других наук.

Несмотря на наличие хороших учебников отдельно по теории и технологии обработки металлов давлением, нельзя признать их достаточными. Многие из них изданы сравнительно давно. Только недавно закончился период формирования современной теории прокатки, и только сейчас появилась возможность сформулировать достаточно устойчивые границы этой молодой науки, осмыслить ее основные устоявшиеся и проверенные практикой достижения и на их основе объяснить современные технологические решения. Кроме того, стремительно развивается технология прокатного производства. В последние годы происходит “технологическая революция” в мировой металлургической промышленности. Учебная литература не успевает освещать новые технологические достижения, и в ней недостаточно полно освещены вопросы связи

теории процесса с технологией. Следует отметить также, что в существующих учебниках мало внимания уделено вопросам организации производства, управлению технологией, современным подходам к управлению качеством продукции.

Особенностью учебного пособия является то, что оно выполнено в традициях школы политехнического образования. Основное внимание сосредоточено на объяснении и глубоком анализе физических и механических процессов, происходящих в металле при деформации, на осмыслении теоретических и технологических достижений. Для политехнической школы характерна широта и многообразие альтернативных решений, широкий кругозор и высокая эрудиция при выборе решений. Чтобы не размывать эти направления, из учебника сознательно исключены математические аспекты анализа и расчетов процессов обработки давлением на основе использования теории упругости и пластичности. К тому же эти вопросы во многих вузах выделены в отдельный самостоятельный курс. Цель учебного пособия — развить у студентов умение свободно ориентироваться в сведениях из различных наук, научить его принимать решения в условиях неоднозначности, вызвать желание думать над проблематикой теории и технологии производства. Причем в словосочетании “технология производства” упор делается на втором слове. Рассматриваются, описываются, анализируются и осмысливаются в основном такие технологии, на которых строится устойчивое производство прокатной продукции на современном металлургическом предприятии.

Многолетний опыт авторов убеждает в том, что технология — это не набор знаний, а мировоззрение и смекалка, основанные на глубоком понимании основ научных знаний, это настрой мышления, “закваска” специалиста. Инженер-технолог по обработке металлов давлением должен знать все о металле, о закономерностях формирования его свойств, потому что он “крайний” в технологической цепочке, от него в конечном счете зависит качество выпускаемой продукции, он определяет работу всех служб цеха и завода в целом. В какой бы сфере деятельности он затем не прикладывал свои усилия, он остается технологом. Он приобретает чувство ответственности за качество выпускаемой продукции. В этом суть подготовки инженера-технолога широкого профиля.

При подготовке учебного пособия были использованы сведения, опубликованные только в открытой печати. В нем нет ноу-хау и технологических секретов, хотя авторы пытались показать новейшие достижения в области прокатного производства и ссылаются на опыт передовых российских и зарубежных предприятий.

Авторы посчитали неуместным приводить в пособии длинный перечень использованных публикаций и ограничились коротким библиографическим списком основной литературы, которым студент может воспользоваться при изучении данного курса, а также при выполнении курсовых и дипломного проектов.

Издание второе, переработанное, дополненное и исправленное. При подготовке его авторы воспользовались ценными замечаниями и рекомендациями и выражают благодарность профессорам Уральского политехнического университета В.К. Смирнову и В.А. Шилову за благожелательный отзыв и поддержку.

Глава 1

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ДЕФОРМАЦИИ

1.1. Типы кристаллической решетки

В теории ОМД рассматриваются процессы деформации металла на основе изучения, с одной стороны, физико-химических закономерностей, протекающих в металле при деформировании, и с другой — чисто механических явлений, основанных на достижениях теории упругости и пластичности.

Сначала кратко рассмотрим физико-химические основы деформации, помня о том, что глубокому изучению этого направления посвящен отдельный курс.

Металлы и сплавы представляют собой твердые тела. В отличие от аморфных тел (и жидкостей) они имеют кристаллическое строение. Если в аморфных материалах атомы и молекулы располагаются в хаотическом порядке, то в кристаллических телах, в том числе в металлах, атомы упорядочены. Первичной формой строения металлического тела является *монокристалл*, который представляет собой однородное физическое тело, состоящее из правильно уложенных и одинаково ориентированных элементарных кристалликов, имеющих форму выпуклого многогранника с определенным образом уложенными в нем атомами. Кристалл неправильной формы называется *кристаллитом*, но в нем, как и в монокристалле, все атомы имеют одну ориентацию и упорядочены одинаково. Сросшиеся между собой несколько разноориентированных кристаллитов называются *поликристаллом*.

Монокристаллы и кристаллиты в металлургии используются редко и выращиваются специальными методами в лабораториях. Металл, получаемый в промышленности путем затвердевания (кристаллизации) расплава, состоит из зерен и межзеренных границ, которые могут иметь сложный состав и строение. При дальнейшем нагреве и пластической деформации состав и размеры зерен существенно изменяются. В этом состоит основное отличие зерна от кристаллита. Но на первичном уровне можно считать, что кристаллиты и зерна одинаково состоят из элементарных кристалликов определенной формы, которые характеризуются типом кристаллической решетки металла.

Из всего разнообразия типов кристаллической решетки для обработки давлением наибольший интерес представляют три — гранецентрированная, объем-

но-центрированная и гексагональная (рис. 1.1), так как основная масса деформируемых металлов и сплавов имеет такое кристаллическое строение. Так, γ -железо (при высокой температуре), медь, никель, золото, алюминий, серебро имеют гранецентрированную решетку; α -железо (низкотемпературное), ванадий, вольфрам, молибден, хром, тантал имеют объемно-центрированную решетку; гексагональную решетку образуют магний, цинк, кобальт, α -титан, бериллий.

Строение кристаллической решетки определяет одно из фундаментальных свойств металла — его пластичность. Пластичность — это свойство металла изменять свою форму без разрушения. Пластичность металла может быть количественно оценена той степенью деформации, при которой появляются в металле первые микротрещины. Такая предельно допустимая степень пластической деформации называется запасом пластичности. Серьезному изучению пластичности разных металлов по учебному плану посвящен отдельный большой курс, который является одним из основных в специализированной подготовке инженера-технолога по обработке давлением.

Пластичность металла существенно зависит от типа кристаллической решетки. Наиболее пластичны металлы с гранецентрированной решеткой, объемноцентрированные металлы менее пластичны, еще меньшую пластичность имеют металлы с гексагональной решеткой. Это определяется количеством кристаллографических плоскостей и их направлений, по которым происходит скольжение металла при пластической деформации.

Для определения плоскостей в кристаллической решетке принята система индексации. Для кубических решеток (объемно-центрированной и гранецентрированной) плоскость обозначается тремя цифрами, заключенными в круглые скобки. Цифры представляют собой обратные величины координат отрезков, отсекаемых плоскостью по трем осям кубической решетки, причем за единицу измерения принят параметр решетки.

На рис. 1.2 показаны плоскость (100) — грань куба, плоскость (110), проходящая через два противоположных ребра, плоскость (111), отсекающая по каждой оси отрезок, равный 1, и плоскость, проходящая через диагональ основания и середину второго ребра, имеющая обозначение (112). В гексагональной решетке (рис. 1.3) плоскость обозначается обратными значениями координат,

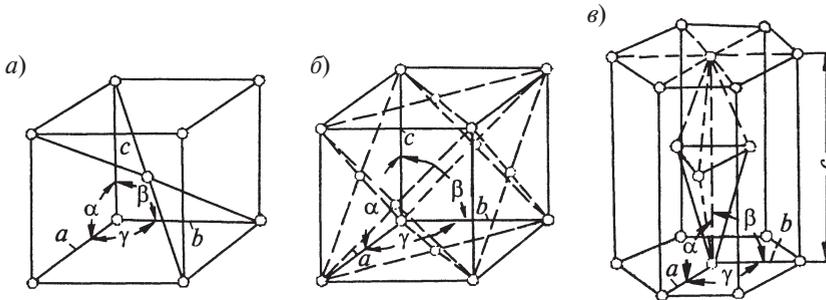


Рис. 1.1. Типы кристаллических решеток основных металлов:

a — объемно-центрированная; *б* — гранецентрированная;
в — гексагональная

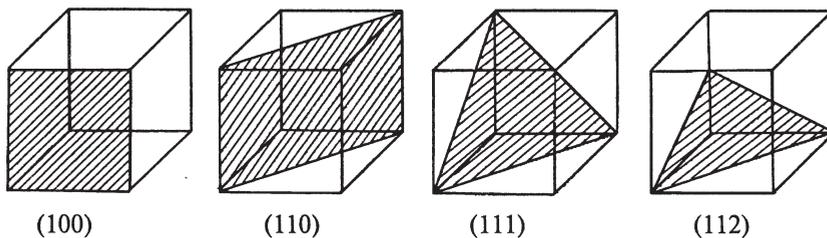


Рис. 1.2. Плоскости кубической элементарной ячейки и их обозначения

отсекаемых ею на четырех осях, три из которых a_1 , a_2 и a_3 расположены в плоскости основания (базиса), а четвертая a_4 — по высоте призмы.

В кристаллической решетке обозначаются не только плоскости, но и направления. Направление задается прямой, исходящей из начала координат и проходящей через атом, лежащий на этой прямой. Направление обозначается обратными значениями координат этого атома, заключенными в квадратные скобки. Причем при отрицательных значениях координат над цифрой ставится знак “минус”. Примеры направлений в кубической решетке показаны на рис. 1.4.

В каждой решетке (см. рис. 1.1) в разных плоскостях и по разным направлениям количество атомов и расстояния между ними различны, поэтому свойства кристаллического тела по разным направлениям неодинаковы. Различие свойств металла по разным направлениям называется анизотропией. Анизотропия является одним из основных свойств отдельного кристаллита или зерна, которая может быть использована в изделии или, наоборот, с которой приходится бороться, если в металлическом изделии ценится однородность свойств по всем направлениям.

Направления плоскостей атомных решеток основного металла в разных зернах различны и сильно зависят от условий кристаллизации. Поэтому промышленные объемы металла могут не проявлять анизотропии, хотя внутри каждого зерна свойства его анизотропны. При последующей пластической деформации направления кристаллографических плоскостей в зернах изменяются весьма существенно.

Характер пластической деформации реального металла определяется как свойствами отдельного зерна и расположением кристаллографических плоскостей в них, так и расположением

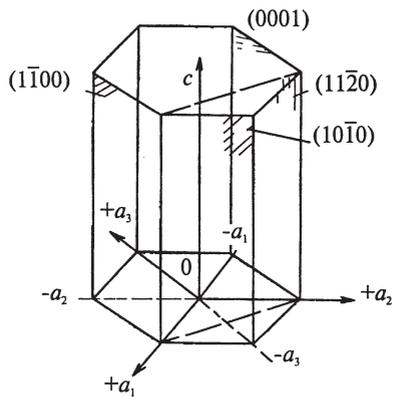


Рис. 1.3. Обозначение плоскостей в гексагональной решетке

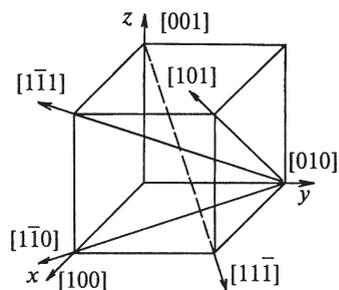


Рис. 1.4. Обозначение направлений в кубической решетке

и размерами зерен в металле, фазовым составом металла, наличием других фаз внутри зерен. Как видно, на характер пластической деформации реального металла оказывают влияние многие факторы.

1.2. Пластическая деформация монокристалла

Рассмотрим деформацию одного монокристалла. Приведенные рассуждения будут справедливы также для кристаллита или отдельного зерна металла. Внутри монокристалла пластическая деформация происходит в основном путем скольжения одних слоев атомов металла относительно других по определенным кристаллографическим плоскостям, которые называются плоскостями скольжения. Обычно плоскостями скольжения являются плоскости с наиболее плотным размещением атомов, а направления скольжения совпадают с направлениями минимальных межатомных расстояний. В металлах с гранецентрированной решеткой скольжение протекает по плоскости октаэдра (111), а направление скольжения совпадает с диагональю граней (типа [101]). В металлах с объемно-центрированной решеткой скольжение осуществляется преимущественно по плоскостям нескольких типов, например (110), (112) или (123), так как плотность атомов на этих плоскостях примерно одинакова, а преимущественное направление скольжения совпадает с большой диагональю куба [111]. В металлах с гексагональной решеткой скольжение проходит по плоскости основания призмы типа (0001) в направлении диагонали шестигранника типа [0011]. Отсюда понятно, что металлы с наиболее плотным расположением атомов в плоскости скольжения имеют наибольшую пластичность.

Заметим, что это упрощенная картина. Помимо скольжения в зерне возможны также другие механизмы пластической деформации, например двойникование. Немалую роль играют дефекты, атомы других элементов, диффузия атомов и т. д. На этих вопросах мы останавливаться не будем — они подробно рассматриваются в специальном курсе.

Большое влияние на характер скольжения оказывают технологические факторы, особенно температура металла. При повышенных температурах появляются дополнительные плоскости скольжения. Например при температурах 150–200 °С и выше в гексагональных металлах открываются дополнительные плоскости скольжения типа $(10\bar{1}1)$ и $(10\bar{1}2)$, и пластичность металла резко возрастает, что используется на практике для предотвращения трещин при деформации малопластичных металлов, таких, например, как цинк.

Скольжение в монокристалле происходит под действием напряжений, возникающих в плоскости скольжения. Исследования показали, что напряжения в плоскости скольжения (касательные напряжения), при которых начинается пластическая деформация скольжения, для данного монокристалла при постоянной температуре и скорости деформации постоянны. Это фундаментальное свойство металлов: при растяжении, сжатии, прокатке и других видах нагружения металла сдвиг по плоскости скольжения будет происходить всегда при одних и тех же касательных напряжениях. Предел текучести металла не зависит от схемы напряженного состояния. Конечно, для поликристаллических материалов, состоящих из разных кристаллитов или зерен, такое утверждение в принципе неверно, поскольку для них, помимо скольжения внутри

зерен, большое влияние на характер пластической деформации оказывает межзеренное скольжение. Сами зерна в металле имеют разные направления кристаллографических плоскостей, и деформация начинается раньше только в благоприятно расположенных зернах.

В классической теории пластичности независимость предела текучести от характера нагружения металла принимается как постулат, и строение самого металла не рассматривается. Предполагается, что деформируемый металл представляет собой некоторую однородную сплошную среду, не имеющую кристаллического строения, способную в любом направлении при соответствующих касательных напряжениях проявлять скольжение. Для всех металлов и сплавов это, очевидно, не так, тем не менее методами теории пластичности решают множество практически важных задач.

Если основная прочностная характеристика металла — предел текучести — может считаться не зависящей от схемы напряженного состояния, то пластичность металла сильно зависит от нее. По горизонтальной оси (рис. 1.5) отложим схему действующих напряжений на элементарный кубик деформируемого металла, а по вертикальной — некоторую характеристику пластичности, например степень деформации до появления первой видимой трещины в металле. При трехстороннем сжатии металла появление трещин маловероятно, пластичность наивысшая. При возрастании доли растягивающих напряжений пластичность снижается, и при равномерном трехстороннем растяжении для

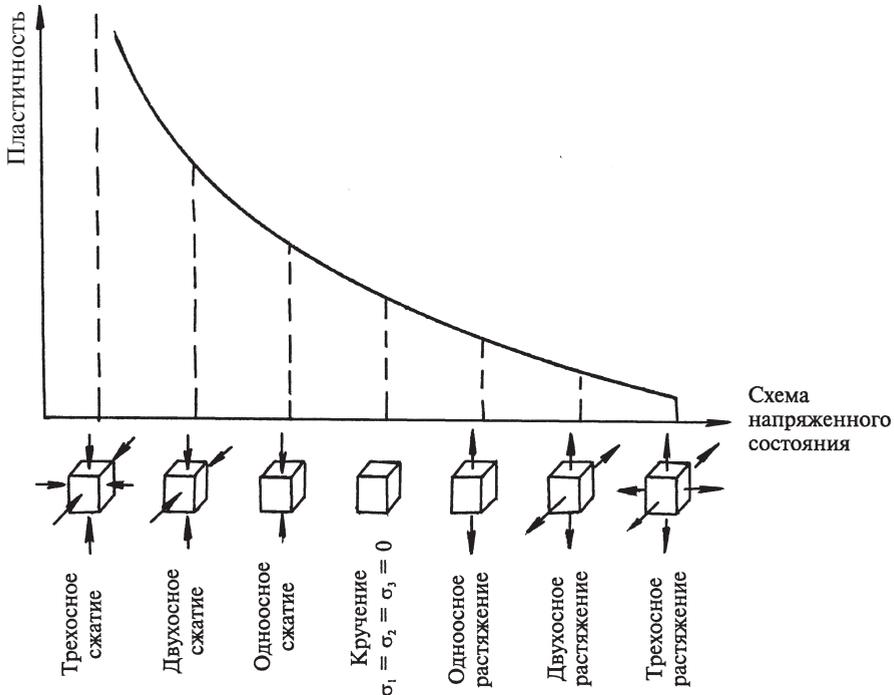


Рис. 1.5. Зависимость пластичности металла от схемы напряженного состояния

всех металлов она близка к 0, и металлы разрушаются хрупко при самой незначительной пластической деформации.

Такое поведение металла очень важно учитывать при выборе технологического процесса для получения готовой продукции без дефектов, особенно для металлов с пониженной природной пластичностью. Например, многие металлы при прокатке могут “трещать” по кромкам, так как здесь возникают растягивающие напряжения. При прессовании таких же профилей из того же металла трещин можно избежать, так как при прессовании металл находится в состоянии сжатия по всем трем осям. Прессование широко применяют для получения изделий из малопластичных металлов. При прокатке также полезно создавать подпирающие напряжения сжатия, предотвращающие разрушение металла.

1.3. Основные положения теории дислокаций

Механизм скольжения в плоскости скольжения монокристалла (или кристаллита) в основных закономерностях хорошо объясняется теорией дислокаций. Мы не будем излагать теорию дислокаций в полном объеме, так как в специальном курсе она дается на достаточно высоком уровне.

Остановимся на самых общих представлениях о дислокациях. Первоначально теоретически, а теперь и экспериментально показали, что в плоскости скольжения кристалла всегда существуют различные дефекты, несовершенства строения кристаллической решетки. Они бывают точечными, линейными, поверхностными и объемными. Наибольшее значение имеют линейные дефекты.

На рис. 1.6 приведены типы линейных дефектов. Как видно (см. рис. 1.6, *a, б*), часть кристалла содержит лишнюю кристаллографическую плоскость А. Вершина этой плоскости — линия ВГ — называется краевой дислокацией. Под действием касательного напряжения τ , перпендикулярного плоскости А, краевая дислокация перемещается параллельно вектору нагрузки к границе кристалла.

Винтовая дислокация (см. рис. 1.6, *в, г*) под напряжением τ перемещается в плоскости скольжения перпендикулярно действующей нагрузке.

Как краевая, так и винтовая дислокации перемещаются из центральных слоев кристалла к его поверхности, образуя на поверхности смещение атомов на величину межатомного расстояния, которое и представляет собой элементарный акт пластической деформации кристалла.

В процессе деформации в кристалле рождаются новые дислокации, и движение их носит лавинообразный характер. Это приводит к значительным деформациям кристалла без нарушения его сплошности. На ранних стадиях скольжения дислокации движутся практически без увеличения прикладываемого в плоскости скольжения напряжения τ . На поверхности металла видны линии скольжения, отражающие эффект движения дислокаций. Затем дислокации встречают на своем пути препятствия в виде точечных дефектов, отдельных дислокаций и их скоплений. Формируются стенки, а затем жгуты и более сложные структуры групп дислокаций. Количество препятствий в процессе деформации увеличивается, поэтому дислокации могут двигаться при увеличении касательных напряжений τ , т. е. при возрастании предела текучести. Увеличение

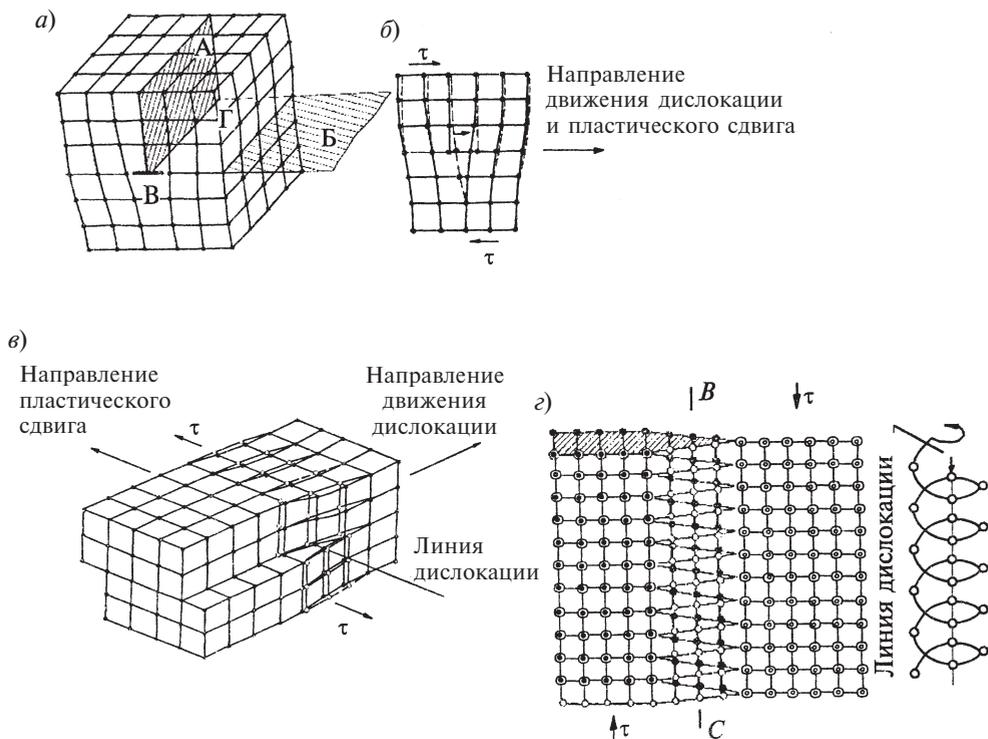


Рис. 1.6. Типы дислокаций: краевая (а) и винтовая (б), объемная (в) и плоская (з) картины

предела текучести металла при деформации называется наклепом. На следующей стадии деформации образуются полосы скольжения, представляющие собой группы линий скольжения. Скольжение сосредоточивается в полосах скольжения, а в промежутках между полосами оно прекращается. Интенсивность возрастания τ уменьшается. При таком скольжении образуются сложные дислокационные структуры. Существенное влияние на них оказывает наличие в сплаве второй фазы, дефектов, примесей и т. п. Реальный металл состоит, как правило, из зерен разного фазового состава, внутри которых могут присутствовать частицы еще каких-то соединений. Традиционная теория дислокаций усложняется за счет учета влияния различных факторов на структуру дислокаций, их конфигурацию и характер перемещения. Строится теория, учитывающая перемещения и взаимодействия скоплений дислокационных структур, которая точнее описывает деформацию реальных материалов.

Академик А.А. Бочвар в 1956 г. опубликовал качественную кривую, характеризующую прочность монокристалла в зависимости от количества несовершенств в нем (рис. 1.7). При отсутствии дефектов теоретическая прочность монокристалла на два порядка выше, чем в реальных металлах. Обычная прочность проката или отливки находится где-то вблизи минимума этой кривой.

Прочность металла можно повысить, либо уменьшая, либо, наоборот, увеличивая количество дефектов в нем. Первый путь связан с получением весь-



Рис. 1.7. Влияние количества несовершенств кристалла на его прочность

ма чистых металлов в виде единого кристалла без зерен и межзеренных прослоек. Доказано, что без дислокаций получение монокристалла принципиально невозможно, но можно сократить их до минимума. Полученные путем медленного вытягивания из расплава тонкие нити металла — “усы” — содержат небольшое число несовершенств, и их прочность приближается к теоретической прочности монокристалла. В настоящее время “усы” используются как упрочняющие добавки к сплавам для создания композиционных высокопрочных материалов. Такие материалы очень дороги и не могут использоваться в больших объемах.

Второй путь связан, наоборот, с увеличением несовершенств кристаллической решетки. Путем легирования металла создаются точечные дефекты или включения новых фаз, которые искажают кристаллическую структуру и препятствуют движению дислокаций, упрочняя материал. За счет термооб-

работки можно не только увеличить количество дислокаций в металле, но и выстроить их в определенные структуры. Именно определенные конфигурации структур дислокаций и других несовершенств повышают прочностные свойства металла. Неудачные или хаотические конфигурации, наоборот, могут привести к разрушению металла, поскольку дислокация — это микродефект металла, а их неудачное скопление может привести к макродефекту, т. е. к трещине и браку.

Практически требуемые структуры дислокаций достигаются путем сочетания пластической и термической обработки. Строго дозированная термомеханическая обработка приводит к высокой прочности при достаточно высокой пластичности металла и широко используется в промышленных технологиях.

1.4. Особенности деформации поликристалла

В поликристалле отдельные кристаллиты или зерна произвольно ориентированы в пространстве. При нагружении поликристаллического тела пластическая деформация начинается прежде всего в зернах с благоприятной ориентировкой плоскостей скольжения. Остальные зерна при этих напряжениях деформируются лишь упруго. Но в процессе деформации они поворачиваются и также вовлекаются в процесс пластического деформирования. Зерна при этом вытягиваются в направлении действия нагрузки. Направленная ориентация зерен создает соответствующую ориентацию кристаллографических плоскостей. В поликристалле после значительной деформации появляется анизотропия свойств. Направленная ориентация кристаллографических плоскостей в поликристалле создает текстуру металла. Листовые изделия с определенной текстурой, т. е. с большой долей зерен, имеющих одинаковое и определенное направление кристаллографических плоскостей, широко используются в производстве. Текстурированность металла может быть использо-

вана также для улучшения геометрических и технологических свойств готовых, например штампованных, деталей.

В связи с тем что разные зерна деформируются по-разному, взаимодействие зерен приводит к возникновению дополнительных внутренних напряжений в металле. После разгрузки внутренние напряжения взаимно уравновешиваются и в готовом изделии остаются в виде остаточных напряжений. При повторном нагружении они складываются с напряжениями от действующей нагрузки. При их совпадении по направлению и знаку предел текучести достигается при меньших внешних нагрузках, чем положено для данного металла, и разрушение может наступить раньше, чем принято в расчетах.

Взаимодействие основных и остаточных напряжений объясняет и известный деформационный эффект, который называется эффектом Баушингера. Суть его состоит в том, что при нагружении образца нагрузкой одного знака например растяжением, получается одно значение предела текучести, а при последующем нагружении нагрузкой противоположного знака (сжатием) предел текучести снижается. Действительно, благоприятно расположенные зерна при растяжении деформируются сильнее, чем менее благоприятные. При разгрузке металла эта группа зерен получит остаточные напряжения сжатия, а менее деформированные зерна — напряжения растяжения. При последующем сжатии образца остаточные сжимающие напряжения складываются с напряжениями сжатия, и предел текучести достигается при меньших внешних нагрузках.

Пластичность металла также зависит от наличия остаточных напряжений в металле. В отдельных зернах (с растягивающими остаточными напряжениями) пластичность снижается, а появление микротрещин в этих зернах будет началом разрушения всего металла. Следовательно, остаточные напряжения снижают пластичность металла в целом.

Остаточные напряжения в поликристалле опасны также при их релаксации, которая сопровождается ползучестью. При хранении на складе или при эксплуатации металлических изделий, особенно при повышенной температуре, остаточные напряжения самопроизвольно разряжаются и убывают (релаксация), приводя к некоторой деформации и короблению (ползучесть) изделия. Остаточные напряжения в готовых изделиях необходимо устранять путем отжига и за счет правильного выбора режима деформирования металла.

Отмеченные выше процессы играют решающую роль при деформации внутри кристаллита или зерна. Существенное значение имеют также отличные от дислокационного механизмы пластической деформации, такие как двойникование, повороты областей внутри зерна друг относительно друга. Большую роль играет также межкристаллитная и межзеренная деформация. Химический состав и структура зерна, неправильное расположение атомов на границах зерен, ограниченные возможности движения атомов по границам и наличие здесь различных примесей — все это оказывает большое влияние на характер скольжения дислокаций и дислокационных структур, т. е. на пластичность и прочность поликристалла. Заклинивание зерен при деформации, появление различных обломков, наличие нерастворимых примесей способствуют увеличению предела текучести металла, т. е. его упрочнению (наклепу). Как правило, при этом снижается пластичность металла.

1.5. Изменение свойств металла при пластической деформации

При пластической деформации в результате наклепа происходит упрочнение металла, повышается предел текучести и снижается пластичность. Важно подчеркнуть, что наклеп зависит от степени деформации и происходит одновременно с деформацией. Между актом деформации и появлением наклепа в металле никакого промежутка времени нет.

Процессы, происходящие в металле при деформации, легче всего наблюдать при растяжении образца на разрывной машине. ГОСТом закреплены форма и размеры стандартных образцов, подвергаемых растяжению.

На рис. 1.8, а приведена типовая кривая растяжения образца из малоуглеродистой стали. На разрывной машине в процессе деформации записываются удлинение образца $\Delta l = l - l_0$ и усилие растяжения P . Перестроенная в координатах напряжение $\sigma = P/F$ — относительное удлинение $\varepsilon = \Delta l/l$ диаграмма растяжения имеет два участка (рис. 1.8, б). Первый (I) характеризует упругую деформацию. Если образец разгрузить на этом участке, то он полностью восстановит свои первоначальные размеры. Напряжение σ_s , при котором начинается пластическая деформация, называется пределом текучести.

На втором участке (II) наряду с упругой существует пластическая деформация. Если образец в точке А разгрузить, то образец укоротится на величину упругой деформации. Пластическая же составляющая деформации не исчезает, поэтому ее называют остаточной. Таким образом, общая деформация складывается из упругой и пластической составляющих:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{плл}}$$

Для большинства металлов и сплавов трудно выделить точку, в которой начинается пластическая деформация, поэтому условным пределом текучести σ_s называют напряжение на диаграмме, соответствующее 0,2 % остаточной деформации. Для обработки давлением, как правило, упругая составляющая

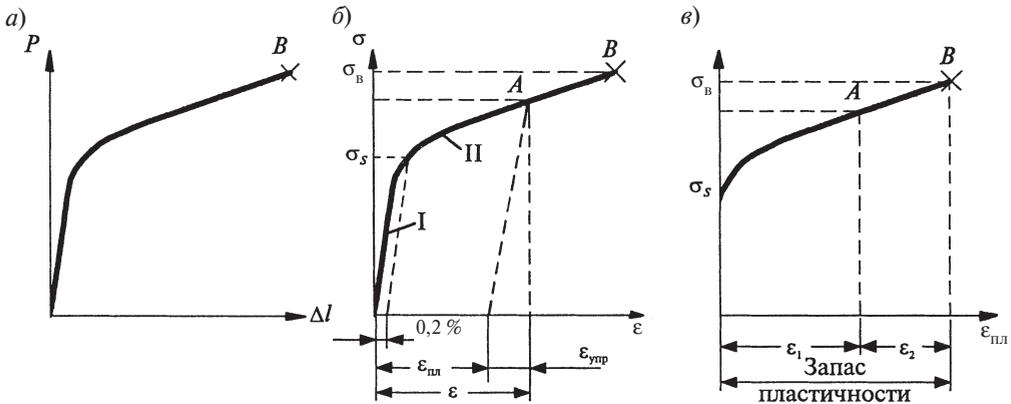


Рис. 1.8. Кривые растяжения образца:

а — полученная на разрывной машине; б — перестроенная в координатах σ — ε ;
 в — в координатах напряжение — пластическая деформация

не интересна, поэтому кривую растяжения образца еще раз перестраивают, откладывая по оси ординат только остаточную деформацию $\epsilon_{пл}$ (рис. 1.8, в). В дальнейшем индекс “пл” будем опускать, подразумевая, что мы всегда имеем дело только с пластической составляющей деформации.

Имея такую диаграмму растяжения, можно определить прочностные и пластические характеристики металла. Показателями прочности являются условный, или фактический, предел текучести σ_s и временное сопротивление σ_b (напряжение, соответствующее началу разрушения образца).

Показателями пластичности служат степень деформации или относительное удлинение образца $\epsilon = \Delta l / l_0$ до момента его разрушения и относительное сужение (уменьшение площади поперечного сечения) шейки образца в момент разрушения $\psi = (F_0 - F_k) / F_k$, где l_0 и F_0 — начальные, а l_k и F_k — конечные значения длины и площади поперечного сечения образца. (Приведенные выше l и F — текущие значения.)

В совокупности прочностные и пластические характеристики называются механическими свойствами металла. Для всех конструкционных материалов механические свойства являются самыми важными эксплуатационными характеристиками. Уровень требований к механическим свойствам металлов и сплавов закрепляется ГОСТом или ТУ на поставку готовой продукции.

Всю кривую от σ_s до σ_b можно трактовать как кривую наклепа (упрочнения) металла, т. е. как кривую изменения предела текучести σ_s металла в зависимости от степени пластической деформации ϵ . В справочниках (например, [5]) можно найти такие кривые для многих конструкционных металлических материалов. На рис. 1.9 приведены кривые упрочнения для некоторых материалов.

Значение пластической деформации, соответствующей точке разрыва образца, называется запасом пластичности металла. При пластической деформации запас пластичности расходуется. Например, в точке А (см. рис. 1.8, в) часть запаса пластичности ϵ_1 израсходована, и оставшийся запас пластичности составляет ϵ_2 . Чтобы вернуть металлу первоначальные механические свойства, его необходимо отжечь, т. е. нагреть до температуры выше A_{c3} (в область аустенита) и медленно охладить.

1.6. Процессы, протекающие при нагреве

При нагревании деформируемого металла протекают разупрочняющие процессы, устраняющие следы наклепа. Первый из них — возврат — протекает при всех температурах, но при низких температурах он протекает в форме уменьшения концентрации точечных дефектов, перераспределения дислока-

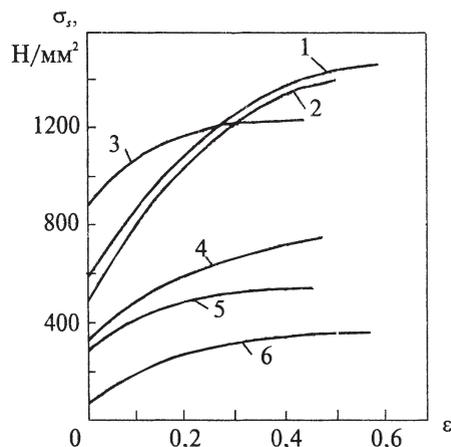


Рис. 1.9. Кривые наклепа некоторых металлов и сплавов:
1 — сталь ЭИ69; 2 — сталь Х18Н9Т;
3 — сталь 40ХНМА; 4 — латунь Л-59;
5 — дюралюминий; 6 — медь

ций, упорядочения ориентации зерен. Эта стадия возврата называется отдыхом, при нем не образуется новых границ зерен. При отдыхе также за счет диффузионных процессов атомы металла стремятся возвратиться в равновесное состояние, при этом снижаются остаточные напряжения, залечиваются дефекты, образовавшиеся при деформации. С повышением температуры активизируются диффузионные процессы, зависящие от T^4 (от температуры в четвертой степени), поэтому скорость возврата резко возрастает. При температурах выше (0,25–0,30) $T_{пл}$ возврат становится существенным ($T_{пл}$ — температура плавления в Кельвинах). При таких температурах образуются и начинают перемещаться новые малоугловые границы зерен. Эта стадия возврата называется полигонизацией. Скорость полигонизации может меняться в широких пределах. Она протекает в слабо деформированном металле с низкой энергией дефектов упаковки атомов. При полигонизации дислокации выстраиваются в дислокационные полосы, представляющие собой границы, отделяющие свободные от дислокаций области кристаллита. Образуются так называемые субзерна, которые в процессе миграции границ могут приобретать значительные размеры. Полигональные структуры металла обладают высокими прочностными и пластическими характеристиками, поэтому достижение их часто является целью термообработки металла. При этом деформационное упрочнение существенно снимается, хотя и не окончательно. Кроме того, за счет снижения остаточных напряжений в металле значительно улучшаются эксплуатационные характеристики, повышается его коррозионная стойкость, пластичность и резко снижается растрескивание металла при последующей холодной деформации — штамповке, высадке, прокатке и пр.

Следует отметить, что при высоких степенях предварительной холодной деформации полигонизация не наблюдается. Возвратные процессы протекают во времени, поэтому чем меньше скорость деформации, тем большее влияние они оказывают на механические свойства металла.

При температурах около $0,4T_{пл}$ наряду с возвратом начинается гораздо более мощный процесс разупрочнения — рекристаллизация. Оба процесса протекают одновременно и существенно влияют на кинетику друг друга. Первичная стадия рекристаллизации характеризуется появлением зародышей и ростом вокруг них новых зерен за счет энергии старых деформированных зерен. Новые зерна не наклепаны и равноосны. Рекристаллизация полностью снимает наклеп деформированного металла. При дальнейшем нагреве металла первичные зерна начинают расти за счет миграции своих границ. После того как весь объем металла заполняется новыми зернами, происходит миграция новых границ и поглощение одних зерен другими. Эта стадия называется собирательной рекристаллизацией. На этой стадии на многих материалах происходит вторичная рекристаллизация, когда отдельные вновь появившиеся зерна выступают в роли новых центров рекристаллизации, и эти зерна быстро растут, резко опережая рост соседей. Металл имеет разнозернистую структуру.

При высоких температурах скорость роста зерен быстро возрастает, поэтому такую собирательную рекристаллизацию называют также динамической.

Рост зерен протекает во времени, и чем выше температура и меньше скорость предварительной деформации, тем полнее протекает рекристаллизация. Первоначально количество новых зерен и их величина зависят от количества

зародышей, т. е. от микрочастиц, обладающих достаточной энергией для зарождения зерна. С увеличением скорости нагрева металла растет количество зародышей, и в конце первичной рекристаллизации зерно будет некрупным. Но в процессе собирательной рекристаллизации с увеличением скорости нагрева скорость роста зерен увеличивается.

При пластической деформации металла выше температур начала рекристаллизации протекают одновременно процессы упрочнения и разупрочнения металла. Наклеп возникает мгновенно и определяется степенью деформации. Рекристаллизация (и возврат) протекает во времени и зависит от температуры и скорости деформации. Соотношение между процессами упрочнения и разупрочнения определяется температурой, скоростью и степенью деформации, но решающим при этом является время, отпущенное для реализации разупрочняющих процессов.

В зависимости от соотношения процессов упрочнения и разупрочнения в металле в теории обработки металлов различают следующие виды пластической деформации:

горячая деформация, когда возникающий при деформации наклеп полностью снимается процессами рекристаллизации;

холодная деформация, при которой полностью господствует наклеп, процессы возврата не очень влияют на механические свойства;

теплая деформация, когда процессы возврата достаточно развиты, но рекристаллизация еще не началась; для некоторых металлов повышение пластичности при теплой деформации достаточно, чтобы построить конкретную технологию обработки давлением. Например, прокатка молибдена при температурах порядка 1200 °С, которые для этого металла находятся в интервале теплой деформации, позволяет полностью устранить трещинообразование, а горячая прокатка при температурах 1500–1600 °С становится дорогой и нецелесообразной.

С.И. Губкин определил не три, а четыре вида пластической деформации: горячая, холодная, неполная горячая и неполная холодная. Определение горячей и холодной деформации полностью совпадает с приведенным выше, а неполная холодная деформация — это теплая деформация в нашем определении. Неполная горячая деформация, выделенная С.И. Губкиным в самостоятельный вид деформации, характеризуется тем, что процессы рекристаллизации уже протекают, но недостаточно интенсивно, чтобы полностью устранить наклеп. Такой вид деформации возникает при сравнительно низких температурах деформации, при пластической обработке сплавов с низкой скоростью рекристаллизации и при высоких скоростях деформации. В структуре металла, прошедшего такую обработку, наряду с равноосными рекристаллизованными имеются вытянутые нерекристаллизованные зерна. Взаимодействие зерен приводит к возникновению значительных остаточных напряжений в металле и к снижению его пластичности, например, при штамповке в холодном состоянии.

Неполная горячая деформация с точки зрения структуры металла неэффективна. Она применяется только для снижения силы деформации и получения определенной мелкозернистой структуры сплава. После такой деформации следует термическая обработка изделия. Для алюминиевых, магниевых и многих других сплавов с многофазной метастабильной структурой неполная горячая деформация даже вредна, так как обеспечивает низкие пластические

свойства готового изделия. Такие сплавы деформируют при низких скоростях деформации и высоких температурах, добиваясь полного протекания процессов рекристаллизации, т. е. в условиях горячей деформации.

Таким образом, предел текучести металла как основная прочностная характеристика металла в момент пластической деформации определяется степенью деформации, скоростью деформации и температурой. При холодной деформации он должен определяться только степенью деформации (см. рис. 1.9). При горячей деформации, когда наклеп полностью снимается, предел текучести должен зависеть от скорости деформации и температуры (рис. 1.10) и не зависеть от степени деформации.

Отметим еще раз, что в теории пластичности принято считать, что предел текучести металла не зависит от схемы напряженного состояния металла и одинаков при растяжении, прокатке, волочении и других видах обработки. В общем случае это не так. Пределы текучести для каждого процесса различны, и для большинства сплавов схема напряженного состояния влияет на прочностные характеристики, так как поликристаллическое строение, сложный фазовый состав, наличие включений и пр. вносят существенный вклад в общую картину деформации и уменьшают роль скольжения дислокаций внутри зерна. Очевидно, не равны пределы текучести при прокатке и растяжении, однако диаграммы, приведенные на рис. 1.9 и 1.10 при растяжении образцов на разрывных машинах, используют для расчетов параметров прокатки. Это связано с тем, что предел текучести при прокатке, как и при многих других процессах, определить трудно, а при растяжении — сравнительно легко. Часто истинный предел текучести материала в конкретном технологическом процессе обозначают K , а при растяжении — σ_s , подчеркивая их различие. Но в технологических расчетах вынуждены выбирать их по одной и той же диаграмме.

В реальных сплавах, наряду с процессами упрочнения и разупрочнения, с повышением температуры могут протекать и другие процессы, также влияющие на прочностные и пластические характеристики. Например, в некоторых углеродистых сталях при температурах возврата (при 200–300 °С) в плоскостях скольжения выпадают мелкодисперсные частицы, которые затрудняют движение дислокаций, вызывая снижение пластичности и повышение прочностных характеристик. Это явление называется деформационным старением металла. Нередко старение используется для повышения прочности стали. Но в процессе деформации сплава при температурах старения снижается пластичность, что может привести к растрескиванию металла.

Размер зерна после рекристаллизации также существенно влияет на свойства металла. Крупные зерна нежелательны, так как при этом снижаются пластические свойства металла. В процессе деформации это приводит к появлению трещин. На крупнозернистом металле особенно сильно снижается пластичность при ударном

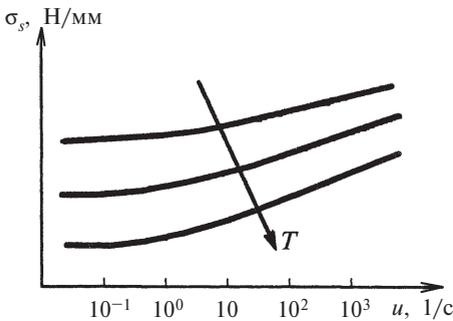


Рис. 1.10. Зависимость предела текучести от температуры и скорости деформации

нагружении — ударная вязкость металла. Крупные зерна могут возникнуть, например, при длительных выдержках металла при высоких температурах перед деформацией. Длительные выдержки вредны также потому, что, помимо укрупнения зерна, сопровождаются увеличением слоя окалины на поверхности металла, обезуглероживанием поверхности, иногда появлением поверхностных трещин, не говоря уже о повышенном расходе топлива.

Размеры равноосных зерен, получаемых в результате рекристаллизации при горячей деформации, зависят от температуры, степени и скорости деформации и могут быть представлены в виде диаграммы рекристаллизации (рис. 1.11). Такие диаграммы экспериментально строятся для каждого сплава и используются при назначении режимов его деформации. Видно, что при малых степенях деформации (до 3–7 %) размер зерна не изменяется, но при степенях деформации чуть выше указанных значений — резко возрастает. Такие степени деформации называются критическими. При степенях деформации выше критических размер зерна практически не зависит от ϵ . Деформация металла со степенями деформации, близкими к критическим, нежелательна.

Такое поведение кривой объясняется тем, что при критических степенях деформации еще не закрепощены процессы собирательной рекристаллизации, и отдельные зерна растут беспрепятственно. С увеличением степени деформации эти процессы замедляются, и размер зерна перестает зависеть от степени деформации. При очень высоких степенях деформации зерно вновь растет за счет высокой энергии накопленной деформации, которая расходуется на рост зерен. На рис. 1.11 такие степени деформации не показаны.

1.7. Пластичность и разрушение металла при ОМД

Стандартные пластические характеристики металла — относительное удлинение ϵ и относительное сужение шейки ψ , полученные при испытании металла на растяжение, очевидно, не могут быть универсальными. Поскольку пластичность металла сильно зависит от схемы напряженного состояния, то требуются критерии пластичности, учитывающие характер нагружения металла и особенности каждого процесса ОМД. Предложено несколько критериев пластичности, например вычисленная в точке разрушения величина

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} = \frac{3p}{\sigma_i},$$

где $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ — гидростатическое давление;

$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ — интенсивность напряжений.

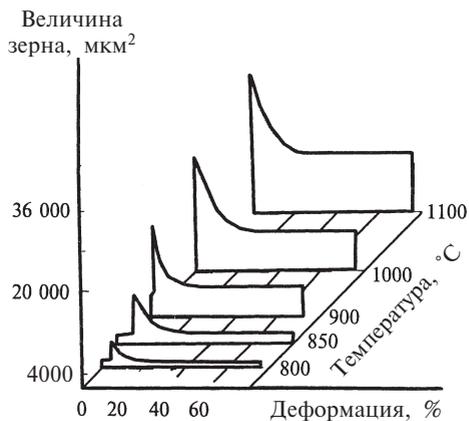


Рис. 1.11. Диаграмма рекристаллизации

Как видно, критерий выражается через действующие напряжения.

Однако помимо напряжений на величину пластической деформации до разрушения влияет количество и характер накопления дефектов в металле в процессе пластической деформации. Предложено несколько схем накопления дефектов (дислокаций) при деформации и разработано несколько дислокационных механизмов разрушения. Ученые Уральского политехнического института (В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов и др.) показали, что разрушение многих материалов наступает тогда, когда количество накопленных дефектов достигнет определенного значения, которое называется ресурсом пластичности. Он зависит от многих факторов, в том числе от напряженного состояния, характера дефектов, температурно-скоростных условий деформации и пр. Критерии пластичности, основанные на расчете ресурса пластичности и дефектов в металле, оказались более технологичными, чем критерии, построенные на учете только напряжений.

С практической точки зрения большой интерес представляет макроскопическая трактовка проблем разрушения, основоположником которой был А.Ф. Иоффе, получившая развитие в трудах Н.Н. Давиденкова и Я.Б. Фридмана. Согласно этим представлениям разрушение металла может быть хрупким и вязким. Хрупкое разрушение, или разрушение путем отрыва, происходит без заметной пластической деформации. При растяжении образца из хрупкого материала (см. рис. 1.8) разрушение наступает тогда, когда нормальное растягивающее напряжение σ достигает предела текучести σ_y . При плоских и объемных схемах напряженного состояния хрупкое разрушение наступает при максимальных касательных напряжениях в плоскости сдвига τ , определяемых, как известно, разностью нормальных напряжений $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, достигающих предела текучести на сдвиг $\sigma_y/2$. Теоретически при равномерном трехстороннем растяжении монокристалла и поликристалла, когда $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, разрушение будет хрупким всегда для любого материала. Но равномерное трехосное растяжение практически никогда не встречается. Если же разрушению предшествует значительная пластическая деформация, то разрушение металла будет вязким.

Хрупкое и вязкое разрушения различаются и по виду поверхности разрушения: при вязком разрушении по месту разрушения видны вытянутые линии — следы течения металла, которые отсутствуют при хрупком разрушении. Для некоторых видов готовой продукции проводят испытания металла на излом (ИПГ — испытание падающим грузом — или по методике DWTT). На поверхности излома после вязкого разрушения образуется волокнистая структура металла. При хрупком разрушении “волокно” отсутствует, и поверхность излома заполнена мелкими блестящими недеформированными равноосными зернами. Нежелателен так называемый нафталиновый вид излома, свидетельствующий о большом количестве “грязи” на границах зерен, попавших на поверхность излома.

В реальных технологических процессах обычно разрушение начинается как вязкое, но заканчивается как хрупкое. Например, при испытаниях круглых образцов на разрывной машине видно, что по периферии поверхности разрушенного образца излом волокнистый, разрушение прошло по вязкому типу, но сердцевина сечения в конце процесса разрушилась хрупко. При оценке пла-

стичности металла по излому подсчитывают, какая часть сечения образца разрушилась вязко и хрупко. Характеристикой пластичности является доля вязкой составляющей в изломе (в процентах ко всей площади). Наиболее пластичные металлы при испытании DWTT обеспечивают 100 %-ную вязкую (волоконистую) составляющую.

1.8. Основные закономерности пластической деформации. Условие постоянства объема

Пусть параллелепипед с размерами x , y и z (рис. 1.12) деформируется в направлении главных осей (ребер параллелепипеда) и после деформации имеет размеры $(x + dx)$, $(y + dy)$ и $(z + dz)$.

Если приращения размеров ребер невелики (деформации малые), то их относительную деформацию запишем в виде

$$e_1 = \frac{dx}{x}; \quad e_2 = \frac{dy}{y}; \quad e_3 = \frac{dz}{z}. \quad (1.1)$$

Объем параллелепипеда до и после деформации соответственно таков:

$$V_0 = xyz \text{ и } V_1 = V_0 + dV = x(1 + e_1)y(1 + e_2)z(1 + e_3).$$

Раскрывая скобки и отбрасывая произведения малых величин, получим

$$V_0 + dV = V_0(1 + e_1 + e_2 + e_3).$$

Относительное изменение объема при деформации

$$\frac{dV}{V_0} = e_1 + e_2 + e_3.$$

При пластической деформации объем тела не меняется, поэтому условие постоянства объема запишется в виде

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0. \quad (1.2)$$

Для упругой деформации изменение объема, обозначенное e , не равно 0:

$$e_1 + e_2 + e_3 = e.$$

При известной связи между напряжениями и деформациями в виде

$$e_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - m(\sigma_2 + \sigma_3)];$$

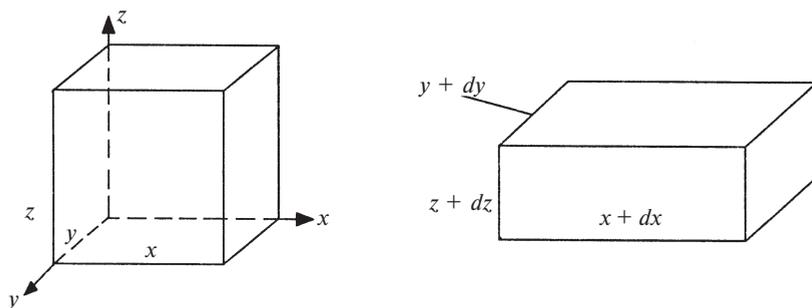


Рис. 1.12. Деформация параллелепипеда

$$e_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - m(\sigma_3 + \sigma_1)];$$

$$e_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - m(\sigma_2 + \sigma_1)]$$

получим

$$e_1 + e_2 + e_3 = \frac{1-2m}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3).$$

Обозначим $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3p$, где p — гидростатическое давление, получим

$$\sigma = \frac{E}{1-2m} e.$$

Здесь m — коэффициент Пуассона, определяемый как соотношение объемной и осевой деформаций; при больших деформациях $m = 1/2$, при малых (и упругих) $m = 1/3$. Таким образом, при упругой деформации изменение объема определяется гидростатическим давлением.

Условие постоянства объема при пластической деформации (1.2) умножим на объем параллелепипеда $V_0 = xyz$. Получим

$$V_0 \frac{dx}{x} + V_0 \frac{dy}{y} + V_0 \frac{dz}{z} = 0$$

и

$$yzdx + xzdy + yxdz = 0. \quad (1.3)$$

Объем $yxdz = V_z$ — это смещенный по высоте объем металла, который имеет знак “минус”, так как направлен в сторону уменьшения общего объема V_0 . Аналогично второе и третье слагаемые равенства (1.3) представляют собой смещенные объемы в ширину и длину параллелепипеда. Они имеют знак “плюс”. Из условия постоянства объема получаем

$$V_z = V_x + V_y.$$

Смещенный по высоте объем металла расходуется на приращение ширины и высоты. На рис. 1.13 заштрихованы более удобные для расчетов смещенные площади по высоте $F_h = xdz$ и по ширине $F_b = zdx$, которые после умножения на длину образца y будут равны соответствующему смещенному объему.

При больших пластических деформациях относительные показатели e_1 , e_2 и e_3 не обладают свойством аддитивности (не позволяют их поэтапно складывать), поэтому применяются логарифмические показатели деформации ϵ_1 , ϵ_2 и ϵ_3 . Прологарифмируем условие постоянства объема, записанное в виде

$$\frac{x_1 y_1 z_1}{x_0 y_0 z_0} = \frac{x_0 (1 + e_1) y_0 (1 + e_2) z_0 (1 + e_3)}{x_0 y_0 z_0} = 1,$$

получим главное соотношение для логарифмических показателей деформации и их связь с относительными показателями:

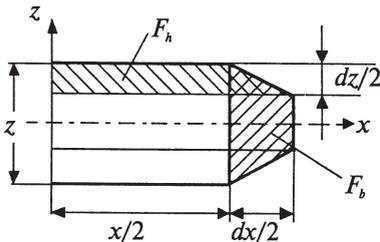


Рис. 1.13. Смещенные площади по высоте F_h и ширине F_b

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \ln \frac{x_1}{x_0} + \ln \frac{y_1}{y_0} + \ln \frac{z_1}{z_0} = \ln(1 + e_1) + \ln(1 + e_2) + \ln(1 + e_3) = 0.$$

Несмотря на то что для больших деформаций применяют и относительные, и логарифмические показатели, следует считать, что для малых деформаций лучше применять относительные, а для больших — логарифмические показатели.

Для больших деформаций параллелепипеда (с учетом знака)

$$V_0 \ln \frac{z_0}{z_1} = V_0 \ln \frac{x_1}{x_0} + V_0 \ln \frac{y_1}{y_0}.$$

Здесь каждое слагаемое — это также смещенные объемы металла в соответствующем направлении. Объем металла $V_z = V_0 \ln \frac{z_0}{z_1}$ называется высотным смещенным объемом.

Соответственно смещенные объемы в направлении осей y и x таковы:

$$V_y = V_0 \ln \frac{y_1}{y_0} \quad \text{и} \quad V_x = V_0 \ln \frac{x_1}{x_0}.$$

Удобной характеристикой высотного и поперечного смещенных объемов являются соответствующие смещенные площади F_h и F_b , поскольку их легко измерить или вычислить по чертежу (см. рис. 1.13).

Таким образом, для малых и больших деформаций

$$V_z = V_x + V_y.$$

В обоих случаях отношение

$$A = \frac{V_x}{V_z} = \frac{\ln \frac{x_1}{x_0}}{\ln \frac{z_0}{z_1}}$$

характеризует долю поперечного смещенного объема от высотного смещенного объема. Оно является истинным, или естественным, показателем поперечной деформации (уширения) металла.

Соответственно, оставшая доля высотного смещенного объема металла течет в продольном направлении, поэтому показателем продольной деформации (удлинения) может служить выражение

$$1 - A = \frac{V_y}{V_z} = \frac{\ln \frac{y_1}{y_0}}{\ln \frac{z_0}{z_1}}.$$

Смещенные объемы металла по всем направлениям являются такими же показателями деформации металла, как логарифмические показатели при больших и относительные показатели при малых деформациях. Но в сложных оча-

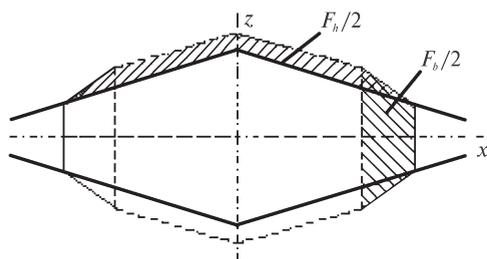


Рис. 1.14. Смещенные площади при деформации металла в фасонном бойке

но смещенные площади по высоте и по ширине можно легко измерить (или вычислить) по чертежу. Показатель уширения A вычисляется непосредственно путем деления заштрихованных площадей F_b на F_h .

Рассмотрим элементарную работу dP , совершаемую бойком на расстоянии dz в направлении оси z (см. рис. 1.12):

$$\begin{aligned} dP_z &= Fdz = p_{cp} xydz = \\ &= p_{cp} xyz \frac{dz}{z} = p_{cp} V_0 \frac{dz}{z}, \end{aligned}$$

где p_{cp} — среднее давление металла на боек.

Интегрируя приведенное выше выражение в пределах z_0 — z_1 , получим для больших деформаций

$$P_z = p_{cp} V_0 \ln \frac{z_0}{z_1}.$$

Аналогично определяется работа деформации металла по осям x и y . В первом приближении среднее давление p_{cp} можно приравнять некоторому усредненному по всему объему пределу текучести материала $\sigma_{s, cp}$. Тогда условие постоянства объема можно представить в виде

$$P_z = P_x + P_y.$$

Работа внешней силы, направленной по оси z , равна сумме работ по двум другим направлениям, т. е. работе внутренних напряжений по перемещению металла в поперечном и продольном направлениях.

На примере осадки мы получили фундаментальный энергетический закон пластической деформации, в соответствии с которым работа внешних сил, действующих на деформируемое тело, равна работе внутренних напряжений. Соотношение между смещенными объемами в продольном и поперечном направлениях будет определяться минимумом работы внутренних напряжений. Анализируя только смещенные объемы, не прибегая непосредственно к энергетическим расчетам, мы получаем практически важные выводы.

Рассмотрим осадку параллелепипеда плоскими бойками в проекции сверху (рис. 1.15). Проведем из углов прямоугольника линии под углом 45° к граням. При отсутствии трения на контакте металлу, находящемуся в зоне I , энергети-

гах деформации, например при прокатке в калибрах, смещенные объемы (точнее, смещенные площади) определяются легче, поэтому применяются чаще.

Рассмотрим деформацию металла, например, при осадке в калиброванном бойке (рис. 1.14). Штрихами показано поперечное сечение образца до, а сплошными линиями — после осадки. Здесь трудно определить логарифмические показатели деформации, так как высота h непостоянна по ширине,

чески выгодно течь в направлении меньшей стороны, а из зоны II — в направлении большей стороны прямоугольника. Конечно, в силу взаимных связей эти зоны не могут самостоятельно перемещаться, поэтому закономерности деформации всего параллелепипеда будут значительно сложнее. Однако, исходя из энергетической предрасположенности, можно считать, что поперечный и продольный смещенные объемы, а также показатели поперечной и продольной деформации будут пропорциональны площадям F_I и F_{II} зон I и II.

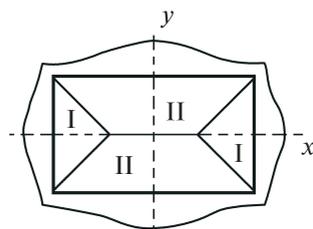


Рис. 1.15. Осадка параллелепипеда

Следствием такого распределения деформаций будет то, что при большой степени осадки параллелепипеда по высоте ширина его будет увеличиваться быстрее, чем длина. Форма параллелепипеда в плане при очень большой степени осадки будет приближаться к кругу (тонкими линиями показана его форма при значительной деформации). Это известный в теории ОМД закон наименьшего периметра, согласно которому тела любой формы поперечного сечения, но обязательно с выпуклым контуром сечения, при осадке с большим обжатием стремятся принять форму с наименьшим периметром — форму круга.

Соотношение между деформациями можно оценить из выражения (справедливого до конца только при отсутствии трения)

$$\frac{A}{1-A} = \frac{F_I}{F_{II}}.$$

Это самая простая приближенная формула для вычисления логарифмического показателя уширения A . Она учитывает только геометрию очага деформации, но не учитывает трения на поверхности контакта и характера взаимодействия объемов I и II. Если внести в нее соответствующие поправки, то получится формула, вполне пригодная для практического использования. Однако определить эти поправки очень трудно.

1.9. Трение при ОМД

Трение на контакте резко меняет схему напряженного состояния во всем объеме деформируемого металла. Под действием сил трения металл всегда деформируется неравномерно, что приводит к неравномерной его структуре и неравномерности свойств после деформации. Под их влиянием возрастает сопротивление деформации, которое иногда значительно превышает предел текучести металла. От характера и значений сил трения зависит износ инструмента и качество поверхности изделия. Подавляющее большинство технологических процессов, таких как прокатка, ковка, штамповка, прессование, волочение и т. д., протекают при активном участии сил трения, а большинство из них, например прокатку, невозможно осуществить при отсутствии сил трения.

Существует несколько механизмов трения на контактных поверхностях. Еще Леонардо да Винчи был знаком с законом сухого трения между трущимися по-

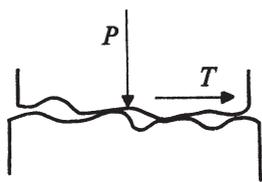


Рис. 1.16. Схема возникновения сил трения

верхностями. В 1781 г. закон получил окончательную формулировку в трудах Кулона. Кулон (а раньше его Амонтон) установил, что при взаимном перемещении инструмента и металла их поверхности вступают в механическое зацепление своими неровностями. В результате на поверхности контакта одновременно осуществляется упругая и пластическая деформация выступов (рис 1.16). В окончательном виде закон Кулона описывается выражением

$$T = \mu P,$$

где T — сила трения; P — сила, направленная по нормали к поверхности контакта; μ — коэффициент трения.

В теории ОМД его записывают в виде связи между касательными и нормальными напряжениями, действующими на контактной площадке:

$$\tau = \mu \sigma.$$

Закон Кулона справедлив только при небольших нормальных контактных напряжениях, когда в процессе взаимодействия трущихся поверхностей преобладают упругие деформации выступов. При увеличении нормального давления σ начинается пластическая деформация микронеровностей, и при значительном ее развитии касательные напряжения на контакте приобретают максимально возможные значения, равные пределу текучести материала на сдвиг:

$$\tau = K/2.$$

Здесь K — предел текучести металла.

На рис. 1.17 приведена зависимость контактного касательного напряжения от нормального напряжения, полученная экспериментально Е.И. Елифановым. Коэффициент трения $\mu = \tau/\sigma$, равный тангенсу угла наклона кривой к горизонтالي, при малых давлениях постояен. Он является физической характеристикой условий на трущихся поверхностях. Коэффициент трения при больших нормальных контактных напряжениях, строго говоря, теряет смысл. По кривой Елифанова он равен 0. Но если в этой области, как и в упругой, определить коэффициент трения как отношение касательных напряжений к нормальным

$$\mu = \tau/\sigma, \tag{1.4}$$

то при максимальных касательных напряжениях, равных $\tau = \tau_{\max} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3)$, получим “кажущийся” коэффициент трения:

$$\mu = \frac{1}{2} - \frac{\sigma_3}{2\sigma_1}.$$

Здесь σ_1 и σ_3 — соответственно максимальное и минимальное главные нормальные напряжения: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Как видно, “кажущийся” коэффициент трения в зоне больших нормальных давлений зависит от схемы напряжений. Он может быть и больше, и меньше 1/2 (с учетом знака напряжений). С увеличением нормальных напряжений σ_1 “кажущийся” коэффициент трения падает. Опыты

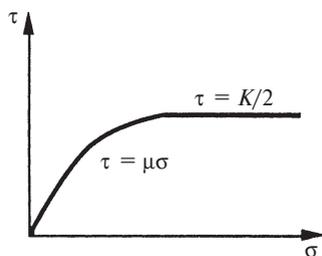


Рис. 1.17. Экспериментальная зависимость касательных напряжений от нормальных на поверхности контакта трущихся тел

И.М. Павлова показали, что при увеличении давления σ_1 в 20 раз “кажущийся” коэффициент трения при прокатке снижается в 2,0–2,5 раза. Следует напомнить, что фактический коэффициент трения, который служит характеристикой трущихся поверхностей, не должен зависеть ни от схемы напряженного состояния, ни от значения нормального напряжения σ_1 .

Экспериментально было показано также, что “кажущийся” коэффициент трения зависит еще от ряда технологических факторов, от которых нормальный коэффициент трения зависеть не должен (например, от предела текучести металла). Кроме того, оказалось, что он в некоторых условиях может не зависеть от состояния поверхностей трения, что совсем противоречит назначению этой характеристики.

Авторы многих работ считают, что в области больших нормальных нагрузок нельзя пользоваться коэффициентом трения. Необходимо оперировать только касательными напряжениями трения τ , причем рассматривать их как вектор, направленный в сторону, противоположную скольжению. При этом связь между касательными и нормальными напряжениями будет иметь вид

$$\bar{\tau} = \bar{i}f(\sigma, u)|\sigma|,$$

где \bar{i} — единичный вектор скорости скольжения инструмента по металлу; u — скорость скольжения; σ — нормальное контактное напряжение.

Здесь роль коэффициента трения играет функция, зависящая от нормальных напряжений и вектора скорости скольжения металла относительно инструмента, но это не коэффициент трения.

Так как максимальное касательное напряжение направлено под углом 45° к главным осям, то в этом направлении будем иметь равенство

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2.$$

Условие пластической деформации в упрощенном виде имеет вид $\sigma_1 - \sigma_3 = \nu K$, где коэффициент Лодэ изменяется в пределах 1,000–1,155, следовательно, предельное значение максимальной удельной силы трения $\tau_{\max} = (0,5-0,58)K$.

Следует заметить, что в теории ОМД многие ученые считают неточным утверждение о том, что первая часть кривой Елифанова реализуется при упругих и малых пластических деформациях металла, а вторая — при развитой пластической деформации. опыты показывают, что в обоих случаях пластическая деформация может быть достаточно развитой, и переход от первого участка кривой ко второму зависит не от интенсивности деформации. Он происходит в результате смены механизма пластической деформации, о чем подробнее мы будем говорить ниже.

По характеру контакта металла и инструмента различают несколько видов трения. Закон Кулона характерен для *сухого* трения, когда между трущимися поверхностями отсутствует смазка (или иное разделяющее их вещество). При наличии тонкого слоя смазки, не превышающего высоты выступов трущихся поверхностей, механизм взаимодействия поверхностей принципиально тот же, что и при сухом трении. Но слой смазки при этом ведет себя как твердое тело, и его свойства оказывают влияние на значение коэффициента трения. Такой вид трения называется *граничным*. При граничном трении также применим закон трения Кулона, но коэффициент трения определяется не только состоянием трущихся поверхностей, но и свойствами смазки.

В ОМД используется также режим трения, который называется гидродинамическим или жидкостным. Он имеет место тогда, когда между трущимися поверхностями толщина слоя смазки превышает глубину неровностей, и трущиеся поверхности нигде не касаются друг друга. Скольжение их происходит за счет движения по слою смазки, который ведет себя как жидкость, даже если сама смазка в обычном состоянии имеет вид твердого или порошкообразного материала. При жидкостном трении коэффициент трения резко снижается. Он зависит от скорости перемещения трущейся пары и коэффициента вязкости жидкости. При жидкостном трении закон трения хорошо описывается зависимостью

$$\tau = \eta u,$$

где η — коэффициент вязкости жидкости; u — скорость перемещения металла относительно инструмента.

Жидкостное трение реализуется в очаге деформации реальных процессов только в том случае, когда в слое смазки создается давление, превышающее давление металла на инструмент, иначе смазка выжимается из очага, и трение переходит в разряд граничного. Например, на рис. 1.18 изображена двоякая волока для волочения толстой проволоки. Внутренний диаметр первой волоки на 0,2—0,3 мм больше, чем диаметр исходной проволоки. Деформация металла происходит во второй (рабочей) волоке. Смазка, которая чаще всего представляет собой мыльный порошок, захватывается поверхностью проволоки и через тонкий кольцевой зазор увлекается в пространство между первой и второй волоками. В этом объеме давление смазки быстро нарастает и становится больше давления металла на рабочую волоку. Смазка устремляется в канал рабочей волоки и разъединяет трущиеся поверхности. Если смонтировать регулятор давления смазки в пространстве между волоками, то устанавливается устойчивый режим гидродинамического трения.

Большинство процессов ОМД протекают в режиме граничного трения. Он легче осуществляется, чем гидродинамический. Кроме того, качество поверхности металла при граничном трении выше, чем при жидкостном. При граничном трении срезание микрогребней металла при контакте с инструментом повышает чистоту поверхности металла. Металл становится блестящим, почти полированным. Чистота его поверхности на один-два класса выше, чем инструмента. Гладкую блестящую проволоку (например, струну для музыкального инструмента) получают только в режиме граничного трения. Проволока, протянутая в режиме гидродинамического трения, на поверхности содержит слой смазки, прорвавшейся через рабочую волоку, поверхность металла при этом матовая, с повышенной шероховатостью. Товарный вид ее невысокий. Однако шероховатая поверхность лучше удерживает смазку, поэтому такая проволока используется как заготовка для последующего волочения.

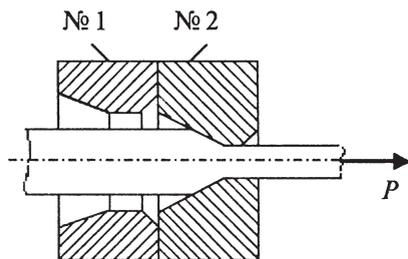


Рис. 1.18. Двоякая волока

При граничном трении эффективность смазки сильно зависит от прочностных свойств тонкого адгезионного слоя смазки, находящегося в очаге деформации. Силы сцепления между молекулами смазки и металла зависят как от природы металла, так и от свойств смазки. Чем выше способность металла удерживать смазку и выше поверх-

ностная активность смазки, тем меньше она выдавливается из очага деформации. Хорошие смазки, существенно снижающие коэффициент трения, представляют собой вытянутые цепочки органических молекул, на концах которых имеются так называемые полярные группы. На трущихся поверхностях эти группы прочно удерживаются металлом, а остальные участки цепочки образуют слои, через которые происходит скольжение металла и инструмента.

Помимо высокой адгезионной способности, к смазкам, предназначенным для обеспечения граничного трения, предъявляется много других свойств. Прежде всего, они должны быть дешевыми, не опасными для здоровья, не должны разлагаться при хранении на складе, не вызывать коррозию металла при деформации и в изделии и т. д.

При обработке давлением, по классификации А.К. Чертавских, наиболее употребительны смазки следующих типов:

1. Эмульсии масло—вода, которые представляют собой мелко распыленные капли масла в воде с различными добавками. Эмульсии применяются при волочении тонкой проволоки, холодной прокатке ленты и фольги и служат не только для снижения коэффициента трения, но и для охлаждения металла и инструмента при деформации.

2. Масла растительные и животные, содержащие жирные кислоты. Такие смазки обладают повышенной прочностью, поэтому применяются при высоких давлениях металла на инструмент, например при волочении, прокатке, штамповке и других операциях холодной обработки давлением. Животные жиры имеют лучшие смазочные свойства, чем растительные.

3. Масла с наполнителями, содержащие в качестве наполнителя такие материалы, как тальк, слюда, графит, сульфид молибдена, легкоплавкие металлы в виде пудры и др. Наполнители увеличивают толщину слоя смазки, образуют дополнительные поверхности скольжения внутри смазочного слоя. Смазки с наполнителями эффективно снижают коэффициент трения и улучшают качество поверхности изделия.

4. Консистентные смазки, представляющие собой смеси минеральных масел, воды и различных мыльных или парафиновых добавок (например, солидол). Такие смазки применяются при сравнительно низких давлениях металла на инструмент. Есть примеры использования таких смазок (а также смазок с наполнителями) при горячей деформации металла, например при прессовании металлов, реже — при горячей прокатке.

При горячей деформации, особенно при обработке труднодеформируемых материалов, в качестве смазки применяют стекла, обмазки из окислов металлов и пр., которые предназначены не только для снижения коэффициента трения, но и для предохранения металла от окисления при нагреве и в процессе деформации.

1.10. Влияние технологических факторов на коэффициент трения

Итак, коэффициент трения как физическая характеристика трущихся поверхностей имеет физический смысл только при скольжении одной поверхности по другой при сравнительно небольших нормальных контактных давлениях. Рассмотрим основные технологические факторы, влияющие на коэффициент трения.

Температура. Если в основе трения лежит взаимодействие трущихся поверхностей, то немалую роль в механизме взаимодействия должны играть процессы схватывания гребней одного металла при скольжении по гребням другого. Чем выше температура, тем активнее процессы схватывания, тем выше должен быть коэффициент трения. Однако при деформации углеродистой стали на воздухе экспериментальная кривая имеет вид, как показано на рис 1.19, *а*. В зоне темпера-

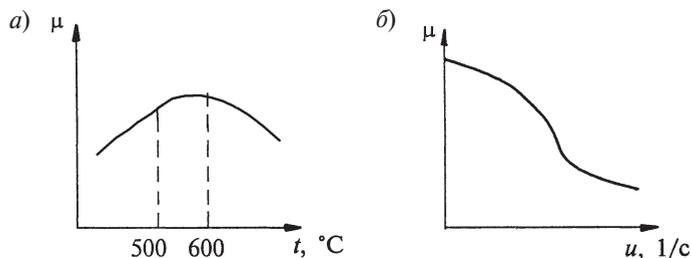


Рис. 1.19. Зависимость коэффициента трения от температуры t (*а*) и скорости деформации u (*б*)

тур начала образования окалины (около 500–600 °С) коэффициент трения снижается, так как окалина играет роль разделителя трущихся поверхностей. С повышением температуры сталей толщина слоя и пластичность окалины увеличиваются, поэтому коэффициент трения снижается. При снятой окалине или в вакууме с увеличением температуры коэффициент трения непрерывно возрастает.

Скорость деформации. С ростом скорости движения инструмента S (например, скорости вращения валков при прокатке) растет скорость деформации u , и коэффициент трения падает (рис. 1.19, *б*). Это объясняется также процессами схватывания при трении поверхностей. Чем быстрее сменяются контактируемые участки, т. е. чем больше скорость деформации, тем меньше схватывание, и коэффициент трения падает.

Состояние поверхности инструмента. Состояние поверхности инструмента сильно влияет на коэффициент трения как при холодной, так и при горячей деформации. Чем грубее поверхность инструмента, тем выше коэффициент трения. Важно заметить, что при горячей деформации исходное состояние поверхности деформируемого металла практически не влияет на коэффициент трения, и значение последнего полностью зависит от состояния поверхности инструмента, поскольку срезание гребешков металла происходит при гораздо меньших напряжениях, чем инструмента. При холодной деформации на коэффициент трения оказывают влияние чистота поверхности как инструмента, так и металла.

Химический состав металла. При пластической обработке углеродистых сталей коэффициент трения падает с ростом содержания углерода. Это объясняется тем, что в реальных процессах коэффициент трения представляет собой смесь истинного и кажущегося коэффициентов трения. Такой коэффициент трения может проявлять зависимость от многих параметров, от которых он, казалось бы, не должен зависеть. С увеличением углерода растет твердость и предел текучести стали, и при одной и той же деформации растет нормальное давление на инструмент (знаменатель в (1.4)). По той же причине твердые и легированные стали имеют меньший коэффициент трения, чем низкоуглеродистые.

СЖАТИЕ ОБРАЗЦА

2.1. Общие положения

Сжатие цилиндрического образца исходной высотой h_0 и диаметром d_0 (площадью поперечного сечения F_0) между параллельными плитами (рис. 2.1, а) следует рассмотреть подробно по многим причинам. Во-первых, сжатие используется как самостоятельная операция при испытании металлов. Во-вторых, такие технологические процессы, как ковка, прокатка и др., в основе своей являются разновидностями процесса сжатия.

При испытании металлов сжатие цилиндрических образцов используется главным образом для оценки пластичности металла. Испытание на растяжение образца дает представление о пластичности в условиях одноосного растяжения, а осадка — при сжимающих нагрузках.

Так же как и на разрывной машине, диаграмма сжатия образца на испытательном прессе записывается в координатах $P-\Delta h$, где $\Delta h = h_0 - h$ — изменение высоты образца от исходного значения h_0 до текущего h (рис 2.1, б). *Машинную* диаграмму перестраивают в *условную* диаграмму, представляющую собой зави-

симость условного напряжения $\sigma = \frac{P}{F_0}$ от обжатия $\frac{\Delta h}{h_0}$. Причем, как и при

растяжении, из общей деформации исключают упругую составляющую. Напряжение правильнее определять путем деления усилия на фактическую текущую площадь F , а обжатие следует относить к текущей высоте образца h , несмотря на то что они в процессе осадки изменяются и потому трудноопределимы. В расчетах используется *истинная* диаграмма сжатия, построенная

в координатах $\sigma = \frac{P}{F}$ и $\epsilon = \frac{\Delta h}{h}$ (рис. 2.1, в).

Типовая (условная и истинная) диаграмма сжатия имеет три участка: до точки *a* протекает упругая деформация, далее при пластической деформации вначале сравнительно медленно, а в конце круто кривая идет вверх, показы-

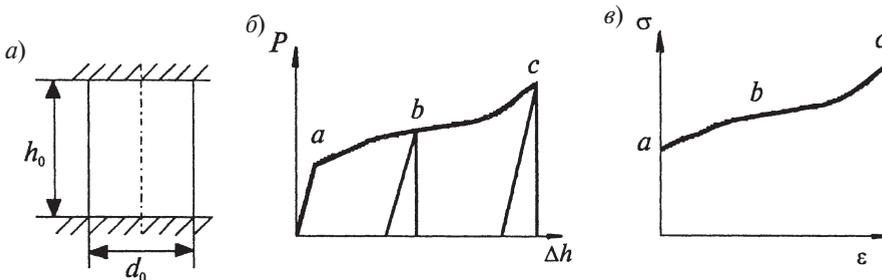


Рис. 2.1. Осадка цилиндрического образца (а) и диаграммы осадки (б и в)

вая изменение наклепа металла в условиях сжатия. Перегиб в точке b объясняется особенностями распределения сил трения на контакте, о которых речь пойдет ниже. В точке c происходит разрушение металла, и по величине пластической деформации до разрушения судят о запасе пластичности металла. Если металл пластичен, то точка c может быть не достигнута.

Следует заметить, что истинную диаграмму необходимо строить при равномерных по высоте напряжениях сжатия. При равномерной осадке боковая поверхность образца увеличивается во всех точках по высоте одинаково, и образец остается цилиндрическим вплоть до разрушения. Такие условия обеспечиваются только при отсутствии трения на поверхности контакта металла с инструментом (бойком). При наличии трения поверхностные и центральные слои деформируются неодинаково, диаметр образца по высоте различен, деформация и напряжения распределяются по высоте неравномерно, образец приобретает форму бочки, поэтому оценивать пластичность в таких условиях, строго говоря, неправомерно, хотя приходится это делать.

Применяют несколько способов приближения условий осадки образца к равномерным. Например, на верхней и нижней поверхностях образца делают буртики и до краев заливают в них масло (рис. 2.2, *а*). Условия трения при осадке будут приближены к режиму гидродинамического трения, коэффициент трения будет резко снижен. Примерно та же идея лежит в основе применения цилиндрических образцов, имеющих на торцевых поверхностях много неглубоких торцевых выточек в виде концентрических канавок, заполняемых при осадке смазкой (рис. 2.2, *б*, вид сверху). В.П. Северденко осаживал образцы в условиях ультразвуковых колебаний, резко снижающих коэффициент трения. Во всех приведенных случаях поверхность бойка должна быть полированной. Есть приемы, позволяющие компенсировать силы трения на контакте некоторыми дополнительными внешними силами, например при осадке в наклонных бойках (рис. 2.2, *в*). Надо подобрать угол наклона бойка так, чтобы тангенс этого угла был равен коэффициенту трения. Естественно, торцевые поверхности исходного образца должны быть расточены под тем же углом.

При наличии трения на контакте различают высокие, средние и низкие образцы. *Высокие* образцы характеризуются тем, что пластическая деформация сосредоточивается вблизи бойков, не проникая в центральные слои. Непосредственно на поверхности контакта металл “прилипает” к бойку и испытывает незначительные пластические или упругие деформации. Непосредственно под этим тонким слоем располагаются приповерхностные слои, в которых металл интенсивно растекается по периферии, увеличивая диаметр образца. Далее по

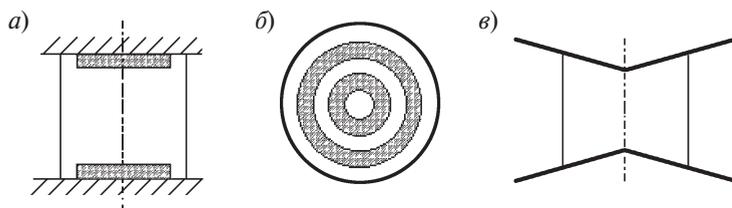


Рис. 2.2. Методы повышения равномерности деформации при осадке образцов

высоте образца деформация быстро затухает, и на какой-то глубине непосредственное воздействие со стороны бойков прекращается. Центральные слои металла либо находятся в упругом состоянии, либо пластически деформируются, но не непосредственно бойками, а за счет взаимодействия с активно деформируемыми приповерхностными объемами. Боковая поверхность образца приобретает вид двойной бочки (рис. 2.3). Такой характер деформации имеет место на образцах, высота которых более чем в два раза превышает диаметр.

Следует подчеркнуть, что деформация высокого образца полностью характеризуется неравномерностью распределения ее по высоте. Силы трения оказывают влияние на характер деформации только вблизи поверхности контакта, и деформация основной массы металла не будет зависеть от численного значения этих сил. В реальном технологическом процессе высокий очаг деформации встречается, например, при ковке крупных заготовок, валов турбин, прокатных валков и т. п.

На рис. 2.4 приведена схема поперечнойковки крупного вала. Поскольку деформация мала, то зона пластических деформаций сосредоточивается вблизи контактных поверхностей. Назовем ее зоной активной деформации, поскольку она осуществляется непосредственно бойками. Глубже активных расположены пассивные зоны, которые под действием нагрузки должны находиться в упругом состоянии, но за счет взаимодействия с активными зонами деформируются пластически. Активные зоны, деформируясь в продольном и поперечном направлении, принудительно тянут за собой металл пассивных зон. В пассивных зонах возникают дополнительные напряжения со схемой трехстороннего растяжения (по мнению некоторых авторов, двухстороннего растяжения, поскольку вертикальное напряжение остается сжимающим). Элементарный кубик, выделенный на оси вала, будет находиться под действием значительных растягивающих напряжений по трем (или по двум) осям (рис. 2.5). Пластичность металла при растягивающих напряжениях резко падает, и в центре вала образуется трещина или полость. Если ковать вал с малыми обжатиями, поворачивая на небольшой угол после каждого обжатия, то внутри вала могут появиться трещины.

Чтобы увеличить глубину проникновения деформаций, необходимы большие обжатия. Полезно использовать фасонные бойки (рис. 2.6), которые создают дополнительные сжимающие напряжения и способствуют проникновению активных деформаций в глубину сечения. Широко применяют также так называемую ковку с подстуживанием. После нагрева слиток выдерживают длительное

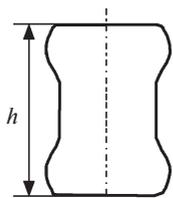


Рис. 2.3. Высокий образец после осадки

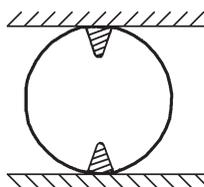


Рис. 2.4. Ковка крупных слитков

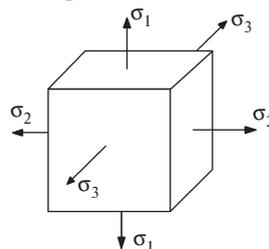


Рис. 2.5. Схема напряжений в центре вала при ковке

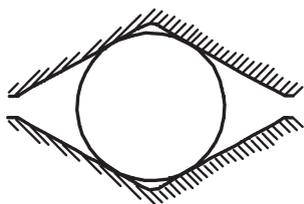


Рис. 2.6. Ковка вала в фасонных бойках

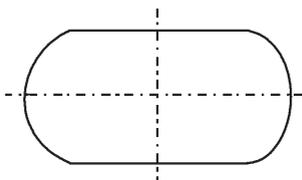


Рис. 2.7. Форма среднего образца

время на воздухе и начинают ковать тогда, когда поверхность его значительно остынет. При ковке такого “холодного” слитка поверхностные слои имеют более высокое сопротивление деформации и пластическая деформация перемещается в горячие внутренние слои.

Следует заметить, что при неравномерной деформации всегда присутствуют дополнительные напряжения по объему металла. Интенсивно деформируемые объемы воздействуют на менее деформируемые, создавая в последних растягивающие напряжения, что вызывает снижение пластичности и образование трещин. Дополнительные напряжения нежелательны, поэтому в процессах ОМД стремятся создавать условия, приближающие деформацию к равномерной.

Вернемся к осадке цилиндрического образца в торцевом направлении (см. рис. 2.1). При дальнейшей осадке высокого образца высота его уменьшается, и он переходит в разряд средних, которые характеризуются тем, что активная деформация от

воздействия бойков проникает на всю толщину образца. Образцы, диаметр которых больше их толщины, оказываются в условиях полного проникновения деформации на всю глубину. На средних образцах неравномерность деформации по высоте полностью определяется силами трения на контакте. На поверхности контакта деформация сдерживается силами трения, а в центральных слоях влияние сил трения ослабевает, и деформация более развита. После осадки образец примет вид одинарной бочки (рис. 2.7). На низких образцах, у которых толщина меньше $1/8$ диаметра, поверхностные силы трения воздействуют практически одинаково на всю глубину образца, деформация на поверхности и в центральных слоях выравнивается, бочкообразование почти не наблюдается.

2.2. Экспериментальные исследования процесса осадки

Средний по высоте цилиндрический образец составим из двух половинок. На одной из них на внутренней поверхности нанесем координатную сетку (рис. 2.8, *а*). После деформации сетка примет вид, как показано на рис. 2.8, *б* (сверху). По ее искажению будем судить об интенсивности деформации в различных частях образца. В приконтактных слоях, а также в слоях, прилегающих к боковой поверхности, деформация минимальна, здесь сетка искажается мало. Наибольшей деформации подвергаются участки металла, расположенные в виде креста по диагоналям сечения. На рис. 2.8, *б* заштрихована зона больших пластических деформаций. Особенно велика интенсивность деформации в центральных слоях.

На высоком образце (рис. 2.8, *в*) искажение координатной сетки показывает, что пластическая деформация незначительна на самой контактной поверхности и в центральных слоях. Интенсивная деформация сосредоточивается в зоне, расположенной на некотором удалении от приконтактных участков.

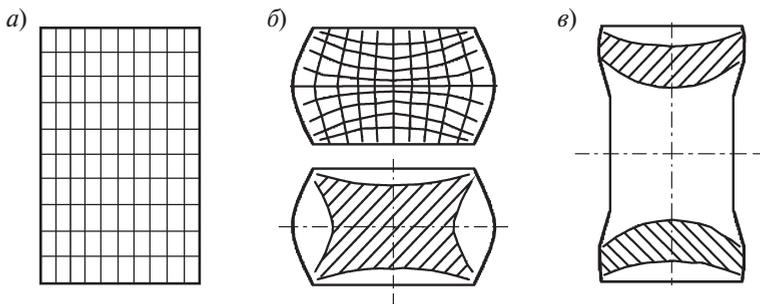


Рис. 2.8. Характер деформации средних и высоких образцов:
a — координатная сетка до деформации; *б* — изменение координатной сетки и зоны развитой деформации после осадки средних образцов; *в* — зоны развитой деформации после осадки высоких образцов

Неравномерность деформации при осадке и явление бочкообразования нежелательны с многих позиций. Они ведут к неравномерной структуре металла и, следовательно, к неравномерному распределению свойств металла по объему. Возникают остаточные напряжения по объему. При осадке литого образца в зонах затрудненной деформации могут сохраниться участки с непроработанной литой структурой, имеющей пониженные механические свойства.

Неравномерность деформации при осадке приводит к разной пластичности металла по объему. Непосредственно под бойком расположены участки, находящиеся в условиях трехстороннего сжатия, поэтому появление трещин здесь маловероятно. Боковая поверхность среднего цилиндрического образца находится в состоянии растяжения в тангенциальном направлении (по касательной к окружностям, образующим боковую поверхность). Здесь пластичность металла понижена. Именно в этих местах появляются первые трещины при осадке металла (рис. 2.9). Таким образом, испытание металла на осадку не является испытанием в условиях сжимающих нагрузок, как было задумано. Разрушение осаживаемых образцов происходит в условиях значительных растягивающих напряжений.

Оценка пластичности металла по той степени деформации, при которой появляется первая трещина на боковой поверхности осаживаемого среднего образца, широко используется как технологическая проба. Она дает некоторую количественную оценку пластичности металла во многих реальных технологических процессах.

Если металл имеет высокую пластичность, то трещины не появляются даже при больших обжатиях. В этих случаях необходимо увеличивать долю растягивающих напряжений, применяя для осадки крешеры, т. е. цилиндрические образцы, имеющие на боковой поверхности продольные надрезы (рис. 2.10, вид сбоку и сверху). Надрезы являются концентраторами растягивающих напряжений, пластичность металла на боковой поверхности уменьшается. Креше-

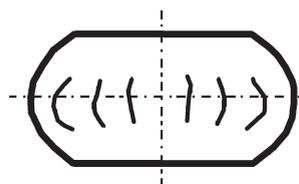


Рис. 2.9. Трещины на поверхности образцов при осадке

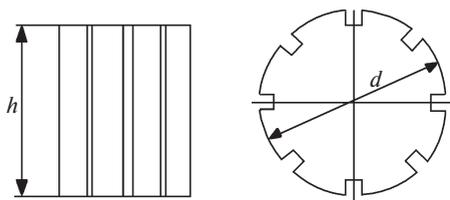


Рис. 2.10. Крешеры
(цилиндрические образцы
с боковыми надрезами)

ры разрушаются по надрезам при меньших обжатиях, чем гладкие образцы.

В реальных технологических процессах трещины появляются раньше всего именно на боковой поверхности. Чтобы повысить пластичность металла в этой области, предлагается много различных приемов, прежде всего описанные выше способы снижения неравномерности деформации — буртики, выточки, соответствующая форма бойков. Для трудноде-

формируемых сплавов широко распространено осаживание в обойме. Обойма — наружное кольцо вокруг образца — создает дополнительные сжимающие напряжения по боковой поверхности. При горячей деформации обойма также предотвращает основной металл от окисления при нагреве и деформации, способствует сохранению постоянной температуры металла.

При ковке крупных цилиндрических заготовок по схеме, представленной на рис. 2.4, наряду с центральными трещинами, очень опасны трещины, возникающие на боковой поверхности. Фасонные бойки, описанные выше (см. рис. 2.6), создают дополнительные сжимающие напряжения и снижают растягивающие напряжения не только в центральных слоях, но и на боковой поверхности, повышая пластичность металла.

Е.П. Унксову (1955) впервые удалось экспериментально изучить характер распределения сил трения на поверхности образцов при осадке. Для этого он (совместно с В.М. Заварцевой) применил бойки из оптически активного материала, в котором по характеру высвечиваемых в поляризованном свете полос можно рассчитывать нормальные и касательные контактные напряжения. В зоне контакта авторы выделили три участка (рис. 2.11, вид сверху), определяющиеся степенью развития сил трения. На периферийном участке I имеет место скольжение металла относительно бойков. Здесь контактные касательные напряжения изменяются по закону Кулона, т. е. пропорционально нормальному напряжению: $\tau_k = \mu \sigma_y$. Нормальное напряжение возрастает от периферии к центру по экспоненциальному закону. Эту зону Е.П. Унксов назвал зоной скольжения. Центральная часть образца называется зоной прилипания. Диаметр ее примерно равен двойной высоте образца. Она состоит из двух участков.

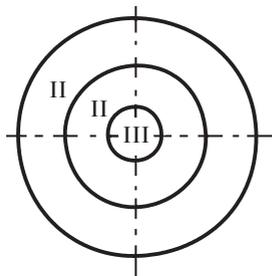


Рис. 2.11. Зоны контактных напряжений при осадке

Вблизи центральной точки имеется участок III, диаметр которого примерно равен высоте образца, на котором перемещение металла относительно инструмента практически полностью отсутствует (но имеют место не только упругие, но и пластические деформации). Этот участок зоны прилипания выделяют в самостоятельную зону застоя. В зоне застоя касательные напряжения снижаются по линейному закону и в центре образца рав-

ны 0: $\tau_k = \frac{K}{2} \frac{x}{r}$, где r — радиус участка застоя. Нормальные напряжения в центре образца максимальны.

Остальная часть зоны прилипания называется участком торможения (зона II). Здесь перемещения металла относительно инструмента значительно заторможены. Металл находится в пластическом состоянии, контактные силы трения достигают своего предельного значения $\tau_k = \frac{K}{2} = \frac{1,155\sigma_s}{2}$, а нормальные напряжения продолжают нарастать по направлению к центру.

В зоне прилипания металл практически не перемещается относительно бойков, и силы трения имеют другую природу, чем в зоне скольжения. В зонах скольжения имеет место трение движения, а в зоне прилипания — трение покоя.

На рис 2.12, а приведены эпюры распределения касательных и нормальных напряжений на поверхности контакта, полученные экспериментально. Расположение сил трения τ выше и ниже нулевой оси вызвано тем, что на контактной площадке они направлены к центральной точке, меняя знак в центре (рис. 2.12, б). Силы трения создают сжимающие напряжения в приконтактных слоях.

Было установлено, что при осадке образца, имеющего диаметр меньше половины высоты ($R/h < 0,25$), зона скольжения отсутствует, и всю контактную площадку занимает зона прилипания (рис. 2.13, а). Такой образец называется высоким. Напомним, что на высоком очаге деформации неравномерность деформации обусловлена непроникновением пластической деформации от действия бойков на всю высоту образца.

Наоборот, при малых высотах образца, когда радиус значительно больше высоты (примерно при $R/h > 4$), зона прилипания практически вырождается, и по всей контактной площадке господствуют зоны скольжения. Такие образцы относятся к разряду низких. На низких образцах напряжения на контактной

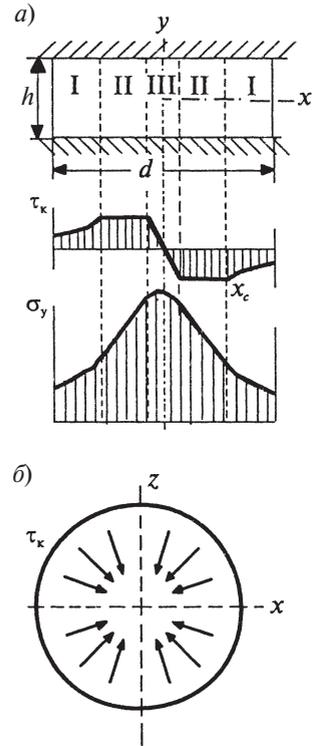


Рис. 2.12. Эпюра контактных напряжений при осадке (а) и векторная диаграмма контактных сил трения (б)

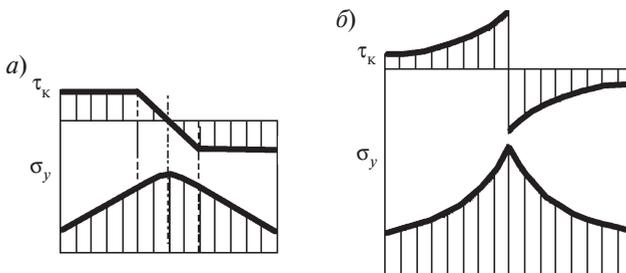


Рис. 2.13. Эпюры касательных и нормальных контактных напряжений на высоком (а) и низком (б) очагах деформации

площадке и в других сечениях по высоте практически одинаковы (рис. 2.13, б). Можно принять гипотезу плоских сечений, согласно которой напряжения и деформации по высоте неизменны, и квадратная сетка до деформации остается прямоугольной и после деформации (рис. 2.14).

На средних образцах, располагающихся примерно в интервале $4 > R/h > 1/4$, деформация распространяется на всю высоту (см. рис. 2.12). В центральных слоях она протекает более интенсивно, чем в приконтактных. Неравномерность деформаций по высоте не позволяет использовать гипотезу плоских сечений. Неравномерность определяется полностью законом распределения контактных сил трения. При этом на контактной площадке развиты обе зоны — скольжения и прилипания.

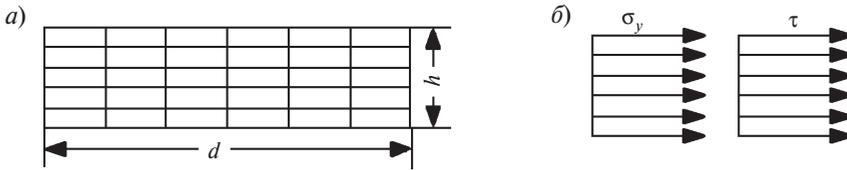


Рис. 2.14. Координатная сетка после деформации на низких образцах (а) и эпюры напряжений (б)

Следует подчеркнуть, что в основе разделения образцов на высокие, средние и низкие лежит не их геометрические размеры, не отношение R/h , а характер деформации и влияния сил трения на деформацию. Геометрически точной границы разделения высоких, средних и низких образцов не существует, и приведенные выше значения R/h являются условными. Некоторые исследования показывают, что в интервале $1/4 < R/h < 1$ еще велика роль неравномерности деформации от действия бойков, а при $R/h > 2$ не всегда можно пренебрегать зонами прилипания. Резко меняются эти соотношения с повышением температуры. Необходимо учесть также, что в процессе осадки происходит смена очагов деформации. Так, в начальный момент осадки возможен высокий образец, а по мере уменьшения высоты он переходит в разряд средних, а затем и низких.

Рассмотренная выше картина распределения сил трения на среднем образце наблюдается в тонком приконтактном слое металла. По мере заглубления внутрь металла протяженность зоны прилипания, точнее, зоны затрудненной деформации уменьшается (рис. 2.15). Эта зона имеет вид конуса с вершиной на оси образца и основанием на контактной площадке. В центральных слоях зона прилипания вырождается.

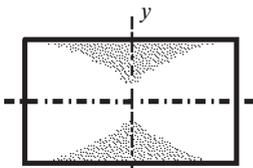


Рис. 2.15. Характер затухания зон прилипания по высоте

Чтобы понять характер пластической деформации в зоне прилипания, лучше всего рассмотреть элементарный кубик на вертикальной оси образца. Понятно, что он не может перемещаться относительно инструмента, но его высотная и радиальная деформации могут быть весьма значительными. Здесь протекает не только упругая, но и пластическая деформация разной интенсивности, хотя перемещение металла относительно инструмента незначительно.

Имеются исследования, несколько иначе представляющие картину течения металла при осадке. Их авторы считают, что при начальной осадке зона прилипания всегда простирается на всю контактную площадь. В этой зоне имеет место максимальное значение трения покоя. Вглубь сечения зона прилипания простирается в виде конуса, деформации в котором могут быть только упругими. Этот конус является своеобразным продолжением инструмента, внедряемого в деформируемые объемы металла. По мере уменьшения высоты образца увеличивается диаметр контактной площадки, и примерно при их равенстве зона прилипания перестает увеличиваться. Дальнейшее увеличение площади контакта происходит за счет выхода боковой поверхности образца в зону контакта. Эти объемы металла скользят относительно поверхности инструмента, создавая зоны скольжения. В зоне скольжения действует трение движения, имеющее меньшее значение, чем трение покоя.

В целом такая точка зрения имеет право на существование, с ее помощью удастся объяснить многие вопросы деформации образца при осадке. Однако более глубокие исследования, вскрывающие механизм пластической деформации в зонах скольжения и прилипания, опровергают основные положения приведенных представлений.

Современная точка зрения, которая закрепилась в последних работах по теории ОМД, прежде всего в трудах А.П. Грудева [4], основана на фундаментальном законе природы, в соответствии с которым деформация при осадке должна подчиняться условию минимума суммарной энергии, расходуемой на поверхности контакта и в объеме образца. Когда металлу скользить по контактной поверхности энергетически выгоднее, чем деформироваться в центральных объемах, на контактной площадке реализуется закон трения Кулона. С увеличением нормального давления σ напряжение трения τ_k возрастает, и скольжение по поверхности требует больших затрат энергии. При предельном значении напряжений трения $\tau_k = K/2$ энергетически выгоднее приостановить скольжение на контактной поверхности, образовав зону прилипания, и переместить деформацию в более глубокие слои образца. При этом меняется механизм деформации металла. Нормальное напряжение в зоне прилипания также растет, но при наличии скольжения оно росло бы быстрее. На поддержание скольжения по контакту потребовалось бы больше энергии, чем на деформацию глубинных слоев при наличии зоны прилипания на контакте. Отсюда следует, что переход от зоны скольжения к зоне прилипания, а также соотношение между этими зонами определяются не геометрическим параметром R/h , а затратами энергии на контактную и объемную деформацию.

2.3. Теоретический анализ напряжений при осадке

Для теоретического описания силовой картины осадки примем гипотезу плоских сечений. Согласно этой гипотезе деформации неизменны во всех слоях по высоте образца. Следовательно, зоны скольжения, торможения и застоя также простираются на всю высоту. Напряжения по высоте имеют постоянные значения, равные контактными. Выход бокового металла на контактную площадку отсутствует, и она увеличивается во времени одинаково по всей высоте

образца. Как видно, гипотеза плоских сечений грубо искажает истинную картину деформации среднего и высокого образца. Однако при правильном задании сил трения на контакте она позволяет рассчитать давление металла на бойки, поскольку давление полностью определяется силами трения. Конечно, речь идет только о средних и низких очагах деформации, так как при высоких, наоборот, все, в том числе силовые, параметры определяются характером распределения деформации по объему. На высоких образцах гипотеза плоских сечений неприменима даже для описания силовой картины.

Рассмотрим в такой постановке задачу об осадке параллелепипеда, имеющего высоту h , ширину b и очень большую длину l . При большой длине можно выделить в этом направлении среднюю часть образца, равную 1, и считать, что в ней в направлении длины деформации равны 0, металл находится в условиях плоской деформации. Для описания напряжений достаточно рассмотреть одну плоскость образца с размерами h и b .

Выделим элемент hdx (рис. 2.16) протяженностью dx и спроектируем на ось x все силы, действующие на элемент. Получим уравнение равновесия сил

$$-\sigma_x h + (\sigma_x + d\sigma_x)h - 2\tau_k dx = 0.$$

После упрощений

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2\tau_k}{h} = 0.$$

Условие пластического течения имеет вид

$$\sigma_x - \sigma_y = K.$$

К этим уравнениям следует добавить условие трения $\tau_k = f(\sigma_y)$ отдельно для зоны скольжения, торможения и застоя.

Зона скольжения. Продифференцируем условие пластичности, получим

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{d\sigma_y}{dx}.$$

Подставим это выражение, а также закон трения $\tau_k = \mu\sigma_y$ в уравнение равновесия:

$$\frac{d\sigma_y}{\sigma_y} = -2\mu \frac{dx}{h}.$$

После интегрирования получаем

$$\sigma_y = Ce^{-\frac{2\mu}{h}x}.$$

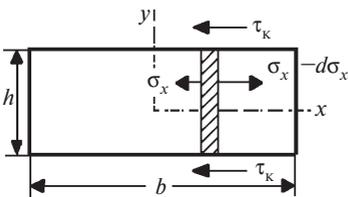


Рис. 2.16. Равновесие сил при осадке

При $x = b/2$ $\sigma_x = 0$ (на боковой поверхности) и по условию пластичности $\sigma_y = -K$, поэтому находим постоянную интегрирования C :

$$C = -Ke^{\frac{\mu b}{h}}.$$

Таким образом, в зоне скольжения

$$\sigma_y = -Ke^{\frac{2\mu}{h}\left(\frac{b}{2}-x\right)} \quad \text{и} \quad \tau_k = -\mu Ke^{\frac{2\mu}{h}\left(\frac{b}{2}-x\right)}.$$

Нормальные напряжения изменяются по экспоненциальному закону, как и на экспериментальных эпюрах (см. рис. 2.12 и 2.13).

Зона торможения. Так как в выделенном элементе силы трения направлены в отрицательном направлении оси x , то подставим в уравнение равновесия закон трения в виде

$$\tau_k = -\frac{K}{2}.$$

Получим $d\sigma_y = +K \frac{dx}{h}$. Отсюда $\sigma_y = K \frac{x}{h} + C$. В точке $x = x_c$ на границе зон скольжения и торможения (см. рис. 2.12) должны быть равными нормальные

и касательные напряжения. Из равенства нормальных напряжений $K \frac{x_c}{h} + C = -Ke^{\frac{2\mu}{h}\left(\frac{b}{2}-x_c\right)}$ находим константу C . Получаем

$$\sigma_y = -\frac{K}{h}(x_c - x) - Ke^{\frac{2\mu}{h}\left(\frac{b}{2}-x_c\right)}. \quad (2.1)$$

Из равенства касательных напряжений

$$-\mu Ke^{\frac{2\mu}{h}\left(\frac{b}{2}-x_c\right)} = -\frac{K}{2}. \quad (2.2)$$

Подставив (2.2) в (2.1), получаем окончательное выражение:

$$\sigma_y = -\frac{K}{h}(x_c - x) - \frac{K}{2\mu}.$$

Прологарифмируем равенство (2.2):

$$\frac{2\mu}{h}\left(\frac{b}{2} - x_c\right) = -\ln 2\mu.$$

Обозначив функцию от μ как $\frac{\ln 2\mu}{2\mu} = \varphi$, получим выражение для определения искомой координаты x_c :

$$\frac{x_c}{h} = \frac{b}{2h} - \varphi.$$

В зоне торможения нормальное давление на бойки нарастает по линейному закону (как и на участке торможения экспериментальной эпюры — см. рис. 2.12).

Зона застоя. Подставив в уравнение равновесия $\tau_k = -\frac{K}{2} \frac{x}{r}$ (со знаком “минус”), получим

$$d\sigma_y = +K \frac{x}{h^2} dx,$$

откуда

$$\sigma_y = +K \frac{x^2}{2h^2} + C.$$

Константу C находим из условия равенства нормальных напряжений на стыке зон застоя и торможения при $x = h/2$ (диаметр зоны застоя, как указывалось ранее, примерно равен h):

$$C = -K \frac{r^2}{2h^2} - \frac{K}{h} (x_c - r) - \frac{K}{2\mu}.$$

2.4. Сила осадки

Давление металла на бойки σ_y в крайних точках контактной площадки равно пределу текучести материала K , а затем нарастает к середине и может значительно превышать предел текучести. Эпюра давления представляет собой изменение сопротивления деформации металла по контактной площадке.

На этом примере удобно продемонстрировать различие терминов “предел текучести” и “сопротивление деформации”. Предел текучести материала получается в условиях равномерной деформации образца, т. е. при отсутствии сил трения и равномерном распределении деформации по высоте. Если при осадке исключить трение на контакте, то представленная выше эпюра напряжений σ_y превратится в горизонтальную линию, и по всей площади контакта давление σ_y будет равно пределу текучести K (рис. 2.17, а, штриховая линия). С ростом сил трения купол эпюры увеличивается (для примера приведена форма купола, реализуемого на низком образце). В каждой точке этой кривой нормальное напряжение σ_y представляет собой сопротивление деформации. Оно превышает предел текучести металла K и является напряжением, при котором металл в реальных условиях переходит из упругого состояния в пластическое. На высоких очагах деформации сопротивление деформации отличается от предела текучести из-за неравномерности деформации по высоте, а на средних и низких — из-за сил трения на контактной площадке.

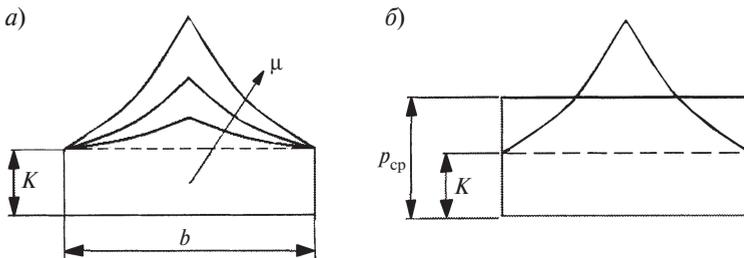


Рис. 2.17. Влияние сил трения на эпюру нормальных давлений (а) и определение среднего давления (б)

Так как давление металла на инструмент при осадке переменное и изменяется сложно, то для практических задач используется среднее давление $p_{\text{ср}}$, которое вычисляется путем усреднения напряжения σ_y по ширине площади контакта b (см. рис. 2.16):

$$p_{\text{ср}} = \frac{1}{b} \int \sigma_y dx$$

(в общем случае интегрирование и усреднение надо вести по площади контакта, но мы приняли $l = 1$).

На рис. 2.17, б представлена усредненная эпюра $p_{\text{ср}}$. Видно, что среднее давление превышает предел текучести, и это превышение можно оценить коэффициентом подпора, учитывающим влияние контактных сил трения:

$$n_{\sigma} = \frac{p_{\text{ср}}}{K}.$$

При отсутствии сил трения $n_{\sigma} = 1$, и по мере их роста n_{σ} возрастает.

Следует обратить внимание на то, что понятия “сопротивление металла деформации” и “среднее давление металла на инструмент” также не совпадают.

Полная сила, действующая на боек, такова:

$$P = p_{\text{ср}} bl.$$

Глава 3

ОЧАГ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ

3.1. Показатели деформации при прокатке

Существует несколько технологических схем прокатки. Вначале остановимся на простейшей из них — продольной прокатке в двух цилиндрических валках одинакового диаметра D (рис. 3.1). Прямоугольный образец высотой, шириной и длиной соответственно h_0, b_0, l_0 после прокатки приобретает размеры h_1, b_1, l_1 . Разность высот $\Delta h = h_0 - h_1$ называется абсолютным обжатием, разность ширины $\Delta b = b_1 - b_0$ — абсолютным уширением и разность длин $\Delta l = l_1 - l_0$ — абсолютным удлинением. Зона воздействия валков на металл называется *очагом деформации*. Различают *геометрический очаг деформации*, находящийся между двумя дугами контакта AB и двумя плоскостями — входа и выхода металла из валков (на рис. 3.1 заштрихован), и *фактический очаг деформации*, в котором металл находится в пластическом состоянии. Фактический очаг больше геометрического, так как напряжения в некоторых частях металла до плоскости входа и после плоскости выхода также превышают предел текучести металла. Точные границы фактического очага описать практически невозможно. За его пределами находятся зоны, в которых действуют только упругие деформации. Академик А.И. Целиков предлагает включить упругие зоны также в состав фак-

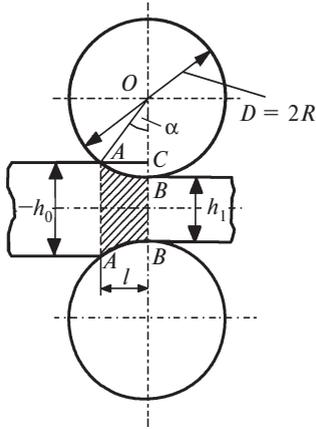


Рис. 3.1. Очаг деформации при продольной прокатке

тического очага деформации и называется пластической и упругую зоны за пределами геометрического очага деформации *внешними зонами очага деформации*. По терминологии И.М. Павлова все, что находится за пределами фактического очага деформации, т. е. зоны с упругими деформациями, — это “жесткие концы”. Он впервые показал, что “жесткие концы” оказывают существенное влияние на характер деформации металла в самом очаге деформации.

Дуга контакта AB называется *дугой захвата*. Соответственно центральный угол, опирающийся на дугу захвата, называется *углом захвата* α .

Из рисунка следует, что $CB = \Delta h/2 = D/2 - (D/2) \cos \alpha$, откуда

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D}. \quad (3.1)$$

Так как $1 - \cos \alpha = 2 \sin^2(\alpha/2)$ и при небольших углах захвата (до 15°) $\sin \alpha = \alpha$, то

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}},$$

где $R = D/2$ — радиус вала.

Длина дуги захвата $l = AB$ и ее горизонтальная проекция при реальных углах захвата мало отличаются по размерам. Поскольку $l = R\alpha$, то можно записать основную формулу для расчета длины дуги захвата в виде

$$l = \sqrt{R\Delta h}. \quad (3.2)$$

Для характеристики деформации при прокатке используются три группы показателей:

относительные обжатие, уширение и удлинение:

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}; \quad \varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0} \quad \text{и} \quad \varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0};$$

коэффициенты высотной деформации, уширения и вытяжки:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}; \quad \beta = \frac{b_1}{b_0} \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{l_1}{l_0};$$

логарифмические показатели:

высотной деформации:

$$\ln \frac{1}{\eta} = \ln \frac{h_0}{h_1};$$

уширения:

$$\ln \beta = \ln \frac{b_1}{b_0};$$

ВЫТЯЖКИ:

$$\ln \lambda = \ln \frac{l_1}{l_0}.$$

Для характеристики уширения применяется также показатель уширения:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h}.$$

Если логарифмы разложить в ряд и отбросить все члены, начиная с третьего, как малые, что справедливо при обжатиях $\Delta h/h_0 < 0,15$, то логарифмические показатели деформации совпадут с относительными деформациями.

Из условия постоянства объема

$$\frac{h_0 b_0 l_0}{h_1 b_1 l_1} = 1$$

получаем

$$\frac{\beta \lambda}{\eta} = 1 \quad \text{и} \quad \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{b_1}{b_0} + \ln \frac{l_1}{l_0}.$$

Если каждый член последнего равенства умножим на объем V прокатываемого образца, то, как и при осадке, получим смещенные объемы металла:

$$V_h = V \ln \frac{h_0}{h_1}; \quad V_b = V \ln \frac{b_1}{b_0}; \quad V_l = V \ln \frac{l_1}{l_0} \quad \text{и} \quad V_h = V_b + V_l.$$

Смещенный по высоте металл распределяется в поперечном и продольном направлениях, наращивая ширину и длину образца. На рис. 3.2, *а* приведен вид с торца прямоугольного образца до и после деформации, на котором показаны высотная F_h и поперечная F_b смещенные площади. Если их умножить на длину l , получатся смещенные объемы V_h и V_b . При переменной высоте образца, например при прокатке прямоугольной полосы в овальном калибре (для получения овальной полосы — рис. 3.2, *б*), смещенные площади (и смещенные объемы) нагляднее и полнее, чем относительные или логарифмические показатели, характеризуют деформацию металла.

Доля от смещенного по высоте объема металла, идущая на уширение,

$$A = \frac{V_b}{V_h} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{h_0}{h_1}} \quad (3.3)$$

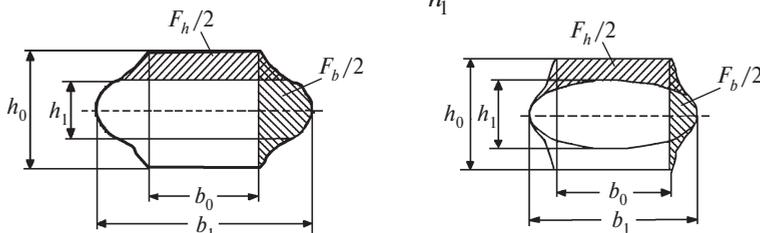


Рис. 3.2. Смещенные объемы по высоте и ширине при прокатке гладкой (*а*) и фасонной (*б*) полосы

будет характеристикой уширения металла. Показатель уширения A изменяется в пределах $0 \leq A \leq 1$. При $A = 0$ уширение отсутствует, очаг деформации становится плоским, так как металл деформируется только в направлении прокатки. При $A = 1$, наоборот, удлинение отсутствует, и весь металл устремляется в ширину, хотя такой случай при прокатке невозможен.

Доля металла, смещаемая в направлении длины, будет характеризоваться показателем $(1 - A)$.

Чаще всего при прокатке прямоугольных образцов на гладкой бочке в качестве характеристики высотной деформации используют показатели $\epsilon = \Delta h/h_0$

и $\epsilon = \ln(h_0/h_1)$, а для уширения — показатель A и отношение $\frac{\Delta b}{\Delta h}$. Для оценки деформации удлинения часто применяют показатель вытяжки λ или $\ln \lambda$.

В число характеристик деформации входит скорость деформации. Скорость деформации может быть определена в любом направлении, но при прокатке под скоростью деформации u подразумевают ее значение по высоте образца. Скоростью деформации называется изменение степени высотной деформации в единицу времени:

$$u = \frac{d\epsilon}{dt}.$$

Ее размерность — $1/с$.

При растяжении образца на разрывной машине $d\epsilon = \frac{dl}{l}$, а так как $\frac{dl}{dt} = C$ — скорость перемещения захватов машины (м/с), то

$$u = \frac{C}{l}.$$

Здесь l — величина переменная, изменяющаяся от l_0 до l_1 . Средняя скорость деформации получается при $l = 0,5(l_0 + l_1)$. Скорость деформации при растяжении образца почти постоянна при постоянной скорости захватов C .

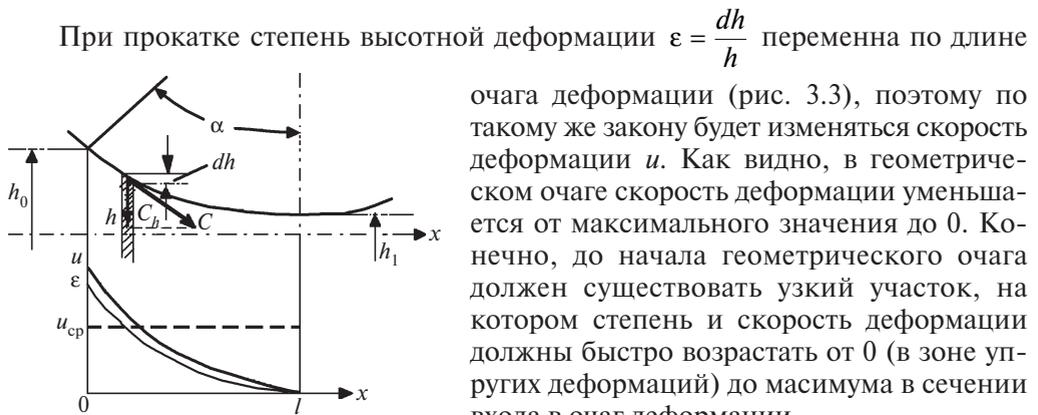


Рис. 3.3. Изменение степени и скорости деформации при прокатке

очага деформации (рис. 3.3), поэтому по такому же закону будет изменяться скорость деформации u . Как видно, в геометрическом очаге скорость деформации уменьшается от максимального значения до 0. Конечно, до начала геометрического очага должен существовать узкий участок, на котором степень и скорость деформации должны быстро возрастать от 0 (в зоне упругих деформаций) до максимума в сечении входа в очаг деформации.

Поскольку скорости деформации изменяются по-разному, результаты испытания металла на разрывной машине с постоян-

ной скоростью растяжения нельзя использовать для определения сопротивления деформации при прокатке. Необходимо иметь машину (пластометр), на которой скорость деформации C во времени изменяется по требуемому закону. Современные разрывные машины выпускаются с электронным блоком для регулировки скорости растяжения.

Средняя скорость деформации за период прохождения металлом всего очага деформации при прокатке

$$u = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dh}{dt} \frac{1}{h}.$$

Переменную высоту можно усреднить: $h = 0,5(h_0 + h_1) = h_{cp}$. Производная $\frac{dh}{dt}$ представляет собой линейную скорость обжатия, т. е. скорость C_h перемещения валков по высоте. Она переменна по очагу деформации, но ее можно усреднить, приняв равной значению, соответствующему середине дуги захвата (при угле $\alpha/2$). Тогда

$$u = 2C_h/h_{cp}.$$

Скорость C_h выразим через окружную скорость валков C :

$$C_h = C \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{C\alpha}{2}.$$

Так как длина дуги захвата $l = R\alpha$, то получим формулу

$$u = \frac{Cl}{Rh_{cp}}.$$

Подставив в нее $l = \sqrt{\Delta h R}$ и $\varepsilon_{cp} = \frac{\Delta h}{h_{cp}}$, получим окончательно формулу Целикова, широко применяемую для расчета средней скорости деформации при прокатке:

$$u = \frac{C\varepsilon_{cp}}{l}. \quad (3.4)$$

Можно усреднить скорость деформации иначе. Запишем исходное выражение для скорости деформации в следующем виде:

$$u = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dh}{h} \frac{1}{dt}.$$

Суммарная деформация $\varepsilon = \int_{h_1}^{h_0} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_0}{h_1}$, и суммарное время прохождения ме-

талла через очаг деформации $t = \int dt = \frac{l}{C}$. Подставив эти выражения в исходную формулу, получим среднюю скорость деформации в виде той же формулы Целикова, в которой по-иному вычисляется степень деформации ε . В первом

случае $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{\text{ср}}}$, во втором $\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_1}$. Можно встретить формулу Целикова, в которой $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$. При малых деформациях (при $\alpha < 15^\circ$) все они дают примерно одинаковый результат и считаются равнозначными. При больших обжатиях $\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_1}$.

3.2. Условия захвата и установившегося процесса

В момент захвата металла валками на полосу действуют нормальные P и касательные T силы (рис. 3.4). Причем $T = \mu P$. Очевидно, для захвата полосы валками необходимо, чтобы проекция сил трения T_x на ось x превышала проекцию нормальных сил P_x : $T_x \geq P_x$ или $T \cos \alpha \geq P \sin \alpha$. Далее, $\mu P \cos \alpha \geq P \sin \alpha$, и окончательно $\mu \geq \tan \alpha$.

Из последнего неравенства следует ряд практически важных выводов. Угол захвата определяется коэффициентом трения металла, поэтому все отмеченные ранее факторы, повышающие коэффициент трения, также повышают предельный угол захвата.

Следовательно, условия захвата улучшаются:

- при снижении скорости валков;
- при горячей прокатке;
- при снижении температуры металла (при наличии окалины);
- при снижении углерода и легирующих элементов в стали;
- при снижении твердости металла;
- при закруглении поверхности валков (состояние поверхности самого металла при горячей прокатке мало влияет на условия захвата, но при холодной прокатке влияет состояние обеих поверхностей).

Помимо коэффициента трения на захват полосы влияют и другие факторы, среди которых необходимо отметить два: скорость подачи полосы в валки и инерционные силы при захвате крупных заготовок. Оба фактора определяют протяженность площадки смятия, которая образуется в начальный момент захвата и без которой захват вообще невозможен, так как сила трения T есть произведение контактных напряжений трения на площадь смятия. Процесс формирования площадки смятия называется первичным захватом. Далее следует вторичный захват, который определяется величиной сил трения, втягивающих полосу в валки, и инерционными силами.

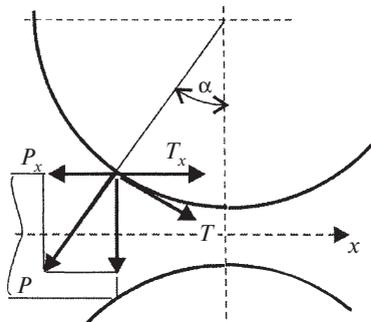


Рис. 3.4. Схема действующих сил при захвате

Скорость подачи полосы в валки по-разному влияет на условия первичного захвата, в зависимости от окружной скорости вращения валков и наличия люфтов между деталями привода. Экспериментально установлено, что на захват полосы влияет как сама скорость подачи полосы в валки, так и разность скорости подачи полосы c_0 и горизонтальной проекции окружной скорости валков $c_{\text{вх}}$. Кинетическая энергия движения полосы $0,5mc_0^2$ (m — масса полосы) расходуется на образование площадки смятия. Чем больше скорость подачи полосы в валки и чем массивнее полоса, тем больше площадка смятия и надежнее захват. При подаче крупных слитков (например, на блюминге) с высокой скоростью за очень короткое время образуется мощная площадка смятия, за счет чего обеспечивается захват полосы при больших углах захвата.

В начальный момент вторичного захвата сил трения T суммируется с силами инерции, которые зависят от разности скоростей полосы и валков. На силы, обеспечивающие вторичный захват, существенное влияние оказывает также наличие или отсутствие люфтов в системе привода валков. Следует рассмотреть два случая:

1. Скорость подачи полосы c_0 меньше горизонтальной проекции окружной скорости валков $C_{\text{вх}0}$. При таком соотношении скоростей после формирования площадки смятия полоса ускоряется, поэтому сила инерции $J = ma$ (a — ускорение полосы) направлена против хода прокатки, что уменьшает силу T и ухудшает условия захвата. Когда в системе привода люфты отсутствуют, скорость валков падает незначительно и ускорение полосы меньше, чем при их наличии. Захват лучше, чем при наличии люфтов. Из-за люфтов на участке первичного захвата скорость валков падает до 0, поэтому в начале вторичного захвата ускорение полосы велико, инерционная сила резко ухудшает условия захвата. Это самый неблагоприятный для захвата случай из всех здесь рассмотренных.

2. Скорость подачи полосы c_0 превышает скорость валков $c_{\text{вх}}$. Энергия движения полосы выше, чем в случае 1, что способствует образованию более сильной площадки смятия, что улучшает захват. При вторичном захвате при отсутствии люфтов в приводе скорость полосы падает до скорости валков, поэтому сила инерции направлена по ходу прокатки и складывается с силой трения. Рассмотренные условия захвата являются наилучшими. Если есть люфты в системе привода, то при первичном захвате скорость валков и полосы резко падает. При вторичном захвате полоса разгоняется, поэтому сила инерции вычитается из силы T , что не способствует захвату. Захват протекает труднее, чем без люфтов, но лучше, чем при обратном соотношении скоростей.

Таким образом, захват представляет собой сложный процесс и для прокатки в целом является наиболее ответственной операцией. Необходимо всеми средствами обеспечивать надежность и устойчивость захвата полосы валками. Многие авторы приходят к выводу о целесообразности создания вспомогательных механизмов для осуществления искусственного захвата на прокатных станах.

При выборе режимов обжатий при прокатке необходимо считаться с предельно допустимыми углами захвата, при которых силы трения достаточны для обеспечения нормальных условий захвата. В табл. 3.1 приведены предельные углы захвата в градусах для различных условий прокатки.

Предельные углы захвата

Условие прокатки	Предельный угол захвата
Холодная прокатка со смазкой на шлифованных валках	3–4
Холодная прокатка без смазки на расточенных валках	5–8
Горячая прокатка стального листа	15–18
Горячая прокатка стальных сортовых профилей	22–24
Горячая прокатка алюминиевых сплавов	18–22
Горячая прокатка медных сплавов	20–24
Горячая прокатка на валках с насечкой или наваркой	27–30

Предельный угол захвата определяет предельно допустимое обжатие за проход. Согласно (3.1)

$$\Delta h_{\max} = D(1 - \cos\alpha_{\max}). \quad (3.5)$$

При установившемся процессе прокатки нормальные силы и контактные силы трения действуют по всей контактной площадке. Результирующая их приложена в некоторой средней точке N (рис. 3.5). Если угол, соответствующий этой точке, обозначить γ , то по аналогии с предыдущими вычислениями получим условие, при котором сил трения будет достаточно, чтобы процесс прокатки протекал нормально: $\mu \geq \operatorname{tg}\gamma$.

Угол γ примерно в два раза меньше угла α , следовательно, если условие $\mu \geq \operatorname{tg}\alpha$ выполнялось при захвате металла, то в установившемся процессе условие $\mu \geq \operatorname{tg}\gamma$ подавно выполняется почти с двойным запасом по силам трения. Самым трудным является захват металла валками, а после заполнения очага деформации процесс прокатки может протекать нормально почти при двукратном обжатии.

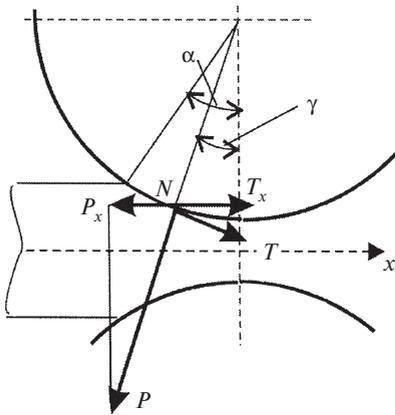


Рис. 3.5. Схема действующих сил при установившемся процессе прокатки

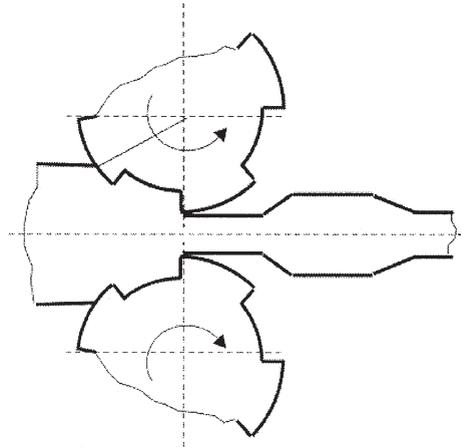


Рис. 3.6. Схема продольной периодической прокатки

Это обстоятельство широко используют на практике. При реверсивной прокатке за несколько пропусков полоса в нечетном пропуске прокатывается в одном направлении, а в четном — в другом. В конце первого пропуска можно сблизить валки, увеличив обжатие почти в два раза по ходу прокатки. Тогда в следующем пропуске захват утоненного конца будет облегчен, а прокатка остальной части полосы пройдет при повышенном обжатии. Реверсивная прокатка с дополнительным обжатием концов полосы позволяет получить нужную толщину полосы за меньшее количество пропусков и повысить производительность стана.

Другой пример. При производстве периодических профилей, имеющих разную высоту по длине (рис. 3.6), захват полосы осуществляют на утолщенных участках, сильно обжимаемые участки прокатываются без пробуксовки при углах захвата, превышающих предельно допустимые по табл. 3.1.

3.3. Общая характеристика очага деформации

Чтобы проанализировать характер напряжений и деформаций при установившемся процессе прокатки, необходимо рассмотреть характер распределения сил трения в очаге деформации. Можно считать, что мгновенная картина прокатки представляет собой мгновенную картину осадки двумя цилиндрическими валками как наклонными бойками. На поверхности контакта напряжения трения τ должны нарастать от периферии к центру очага деформации в соответствии с кривой Епифанова: сначала по закону Кулона $\tau = \mu\sigma$, а затем, достигнув предельного значения, по прямой $\tau = K/2$ (рис. 3.7, а).

Как и при осадке, на контакте металла с валками имеются зоны скольжения и прилипания. Зона прилипания также разделяется на зоны торможения и застоя. В последней силы трения меняют направление на обратное, проходя через 0. Отметим, что, как и при осадке, силы трения являются векторными величинами, поэтому их максимальные значения в зоне торможения и переход через 0 в зоне застоя следует рассматривать с учетом направления действия этих сил. Равенство 0 сил трения в точке перехода означает, что вектор сил изменяет знак на обратный, но сами напряжения трения не равны 0 (рис. 3.7, б, вид сверху).

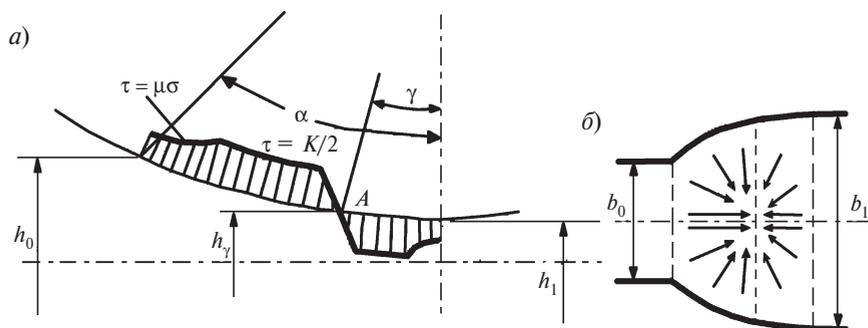


Рис. 3.7. Эпюра сил трения при прокатке (а) и векторная диаграмма сил трения (б)

Экспериментально показано, что точка A , в которой силы трения как вектор в направлении прокатки равны 0, практически совпадает с точкой N (см. рис. 3.5), в которой приложены равнодействующие нормальных и касательных сил в очаге деформации (хотя теоретически их совпадение необязательно). До точки N силы трения направлены по ходу, а после — против хода прокатки. Очевидно, так же как при осадке, соотношение между зонами скольжения и прилипания может быть выражено через геометрические параметры очага деформации, хотя оно определяется не геометрией очага, а характером деформации и условиями трения на контакте. И.Я. Тарновский установил, что характеристикой геометрии очага деформации служит критерий l/h_{cp} , где l — длина дуги захвата и h_{cp} — средняя высота очага деформации:

$$h_{cp} = (h_0 + h_1)/2.$$

Примерно при $l/h_{cp} < (0,5-1)$ очаги деформации считают высокими, зоны скольжения на таких очагах практически вырождены. Как видно, граница высоких образцов указана не точно, а в интервале от 0,5 до 1,0. Экспериментальные исследования, в том числе на крупных промышленных слитках, показали, что эта граница зависит от многих технологических факторов, прежде всего от свойств деформируемого металла. Чем мягче металл (меньше предел текучести), тем легче деформация распространяется вглубь сечения. При снижении количества углерода и легирующих элементов в стали, при повышении температуры, снижении скорости прокатки, а также при снижении ширины полосы деформация при меньших значениях фактора l/h_{cp} проникает в центральные слои слитка. Для определенности мы установим границу высоких очагов на значении $l/h_{cp} = 1$.

При отношениях примерно $1 < l/h_{cp} < 4$ развиты как зоны скольжения, так и прилипания, и очаг деформации становится средним. При $l/h_{cp} > 4$ очаг деформации практически полностью занят зонами скольжения и называется низким. Важно еще раз подчеркнуть, что высокие, средние и низкие очаги деформации определяются особенностями деформации, а не геометрическими параметрами, и границы деления очагов весьма условны.

3.4. Нейтральный угол

Пусть прокатывается тонкая полоса и очаг деформации является низким. Для таких очагов, как и при осадке, применима гипотеза плоских сечений, в соответствии с которой плоскость входа при прохождении через очаг деформации остается плоской. Скорости перемещения частиц металла не зависят от координаты y , а все напряжения в любой плоскости постоянны по высоте полосы. Очаг деформации для таких полос представляет собой две зоны, в каждой из которых происходит скольжение металла относительно валков. В передней зоне левее точки N (см. рис. 3.5) металл скользит относительно валков в направлении сечения входа, скорость его перемещения меньше, чем окружная скорость валков, металл отстает от валков, поэтому часть очага деформации от сечения входа до сечения NN называется зоной отставания. Соответственно правее точки N металл опережает валки, поэтому этот участок очага деформации называется зоной опережения. Се-

чение NN , разделяющее эти зоны, называется *нейтральным*, а угол γ , соответствующий ему, — *нейтральным углом*. В точке N и по всему нейтральному сечению NN скорости полосы и валков совпадают. Высоту полосы в нейтральном сечении обозначим h_γ .

Нейтральный угол γ и нейтральное сечение найдем, спроектировав все силы, действующие на контактной площадке очага деформации, на ось x . На рис. 3.8 выделен элемент в зоне опережения на угловом расстоянии φ от сечения выхода протяженностью $r d\varphi$ (площадью $r b d\varphi$), где r — радиус валка и b — ширина полосы. На этот элемент действуют контактные нормальные p и касательные τ напряжения, имеющие знак “минус”, так как они направлены противоположно осям y и x . Для подобного элемента в зоне отставания τ имеет знак “плюс”.

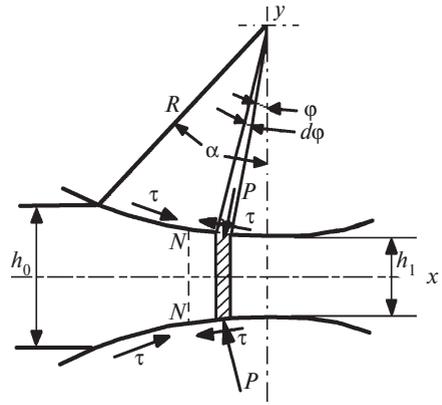


Рис. 3.8. Равновесие сил в очаге деформации

Для контактной площадки в целом имеем условие равновесия сил:

$$-\int_0^{\alpha} p \sin \varphi r b d\varphi - \int_0^{\gamma} \mu p \cos \varphi r b d\varphi + \int_{\gamma}^{\alpha} \mu p \cos \varphi r b d\varphi = 0.$$

Здесь в первом слагаемом $p \sin \varphi$ — горизонтальная проекция напряжения p , $r b d\varphi$ — элементарная площадка.

По остальным слагаемым силы формируются аналогичным образом отдельно по зоне опережения и отставания.

Если положить, что уширение при прокатке отсутствует ($b = \text{const}$), а также усреднить напряжение p по очагу, то можно сократить на $p r b$. После интегрирования и подстановки пределов получим

$$\cos \alpha - \cos 0 - \mu \sin \gamma + \mu \sin 0 + \mu \sin \alpha - \mu \sin \gamma = 0.$$

Простые преобразования приводят к выражению

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{2} - \frac{1 - \cos \alpha}{2\mu}.$$

При малых углах $\sin \alpha \approx \alpha$, $\sin \gamma \approx \gamma$ и $1 - \cos \alpha = 2 \sin^2(\alpha/2) \approx \alpha^2/2$, поэтому получаем формулу И.М. Павлова

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\mu} \right). \quad (3.6)$$

Она позволяет вычислить нейтральный угол.

Несмотря на то что формула получена со многими допущениями и только для низкого очага деформации, ее применяют и на средних очагах.

3.5. Опережение при прокатке

Продолжим рассмотрение низкого очага деформации, для которого применима гипотеза плоских сечений.

Для характеристики процессов опережения и отставания применяются показатели, носящие те же названия:

опережение:

$$S = \frac{c_1 - c}{c} = \frac{c_1}{c} - 1;$$

отставание:

$$S_{\text{от}} = \frac{c - c_0}{c} = 1 - \frac{c_0}{c}.$$

Здесь c_0 , c_1 — скорости полосы на входе и выходе из валков, c — окружная скорость валков.

Из условия постоянства объема металла на входе и выходе получаем

$$b_0 h_0 c_0 = b_1 h_1 c_1.$$

При $b_0 = b_1$, что характерно для низких очагов деформации,

$$c_0 = c_1 h_1 / h_0 = c_1 / \lambda.$$

Отсюда можно записать $1 - S_{\text{от}} = \frac{c_0}{c} = \frac{c_1}{c\lambda} = \frac{1 + S}{\lambda}$ и окончательно $S_{\text{от}} = 1 - \frac{1 + S}{\lambda}$.

Опережение и отставание связаны между собой через вытяжку, поэтому можно изучать только опережение, и следует иметь в виду, что чем больше опережение, тем меньше отставание.

Запишем условие постоянства объема для выходного и нейтрального сечений, в котором горизонтальная составляющая скорости $c_\gamma = c \cos\gamma$:

$$h_\gamma c \cos\gamma = h_1 c_1.$$

Отсюда $\frac{c_1}{c} = S + 1 = \frac{h_\gamma \cos\gamma}{h_1}$. Высота полосы в нейтральном сечении

$$h_\gamma = h_1 + \Delta h_\gamma = h_1 + D(1 - \cos\gamma).$$

Опережение

$$S = \frac{[h_1 + D(1 - \cos\gamma)] \cos\gamma}{h_1} - 1 = (1 - \cos\gamma) \left(\frac{D}{h_1} \cos\gamma - 1 \right).$$

Мы получили формулу Финка, которую в таком виде не применяют, а предварительно упрощают. Если положить, что $1 - \cos\gamma = \gamma^2/2$, то получим

$$S = \frac{\gamma^2}{2} \left[\frac{D}{h_1} \left(1 - \frac{\gamma^2}{2} \right) - 1 \right].$$

Пренебрегая γ^4 как величиной малой, получим формулу Экелунда

$$S = \frac{\gamma^2}{2} \left(\frac{D}{h_1} - 1 \right).$$

При листовой прокатке, для которой чаще всего требуется рассчитывать опережение, отношение D/h_1 всегда на два-три порядка выше 1, поэтому приходим к формуле Головина—Дрездена, которая широко используется в практических расчетах:

$$S = \frac{D}{2h_1} \gamma^2. \quad (3.7)$$

Опережение чаще всего оценивают в процентах ($S \cdot 100 \%$), и для обычных процессов прокатки тонких листов и лент оно лежит в пределах 3–5 %.

Формула (3.7) совместно с формулой Павлова (3.6) дает возможность вычислять и анализировать величину опережения. Естественно, она дает хорошие результаты при прокатке тонких полос, для которых выведена. Чем толще полоса, тем больше расхождения между расчетными и экспериментальными данными.

Из последней формулы следует, что опережение увеличивается с ростом нейтрального угла, диаметра валков и уменьшением толщины полосы. По формуле Павлова опережение растет с ростом коэффициента трения μ , а с ростом угла захвата α и связанного с ним обжатия изменяется неоднозначно.

На рис. 3.9 построены кривые по уравнению (3.6), из которых видно, что при малых обжатиях и малых углах захвата с возрастанием этих параметров опережение растет, а при больших, наоборот, падает. Опыты также подтверждают, что при прокатке тонких полос наблюдается максимальное опережение при обжатиях 7–10 %.

Следует заметить, что опережение, как и отставание, переменено по длине дуги захвата. В нейтральном сечении опережение равно 0, а по мере приближения к сечению выхода оно возрастает. Приведенные выше значения относятся к сечению выхода, поскольку практический интерес представляют конечные значения опережения. Отставание, соответственно, увеличивается к сечению входа.

При непрерывной прокатке, когда прокатываемая полоса находится одновременно в нескольких парах валков (рис. 3.10), полоса может испытывать переднее и заднее натяжение со стороны соседних валков. Силы заднего и переднего натяжения T_0 и T_1 возникают также при наматывании листа на моталки.

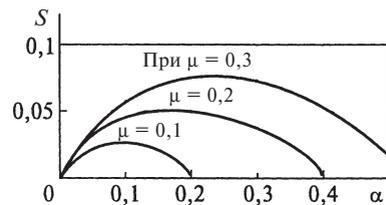


Рис. 3.9. Зависимость опережения S от угла захвата α и коэффициента трения μ (по формуле Павлова)

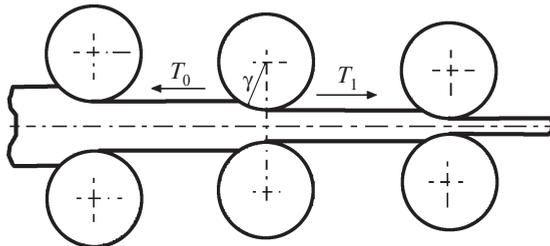


Рис. 3.10. Схема непрерывной прокатки

При наличии переднего натяжения T_1 полоса вытягивается из валков, равновесие очага деформации достигается тогда, когда нейтральное сечение смещается в сторону, противоположную направлению прокатки, при этом зона опережения увеличивается, опережение растет и отставание уменьшается. В пределе зона отставания может полностью исчезнуть, весь очаг деформации будет занят только зоной опережения. В этом случае равновесие очага деформации достигается за счет того, что проекции сил нормального давления и контактного трения полностью уравниваются тянущей силой T_1 . Для вращения валков не требуется привода, они будут вращаться за счет тянущей силы. Мы получаем процесс волочения через валки. Роликовые или валковые волокнистые материалы широко применяются при волочении проволоки, листов и профилей в холодном состоянии.

Картина будет обратной, если применить заднее натяжение полосы силой T_0 . При заднем натяжении опережение уменьшается, а отставание растет. Очевидно, при одновременном воздействии переднего и заднего натяжения положение нейтрального сечения и протяженность зон опережения и отставания определяются разностью сил $T_1 - T_0$.

Приведенные зависимости по опережению выведены в предположении, что деформация металла плоская, когда ширина прокатываемой полосы в пять-шесть и более раз больше ее толщины. Экспериментально показано, что ширина полосы влияет на опережение только на узких полосах (рис. 3.11), когда условия деформации приближаются к плоскому напряженному состоянию. Деформация в направлении ширины достаточно развита, часть смещенного высотного объема устремляется в ширину, следовательно, меньшая доля металла идет в длину. С ростом ширины полосы показатель уширения уменьшается, и опережение при этом возрастает до какого-то значения, а затем оба показателя перестают зависеть от ширины. Это свидетельствует о том, что на широких полосах металл находится в условиях плоской деформации.

Показано также, что по ширине полосы опережение не постоянно. Так как кромки имеют возможность уширяться, то меньше металла течет в длину. Но

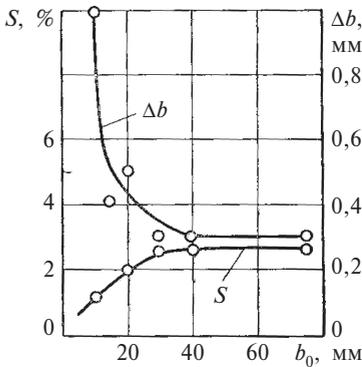


Рис. 3.11. Зависимость опережения S и уширения Δb от ширины полосы b_0

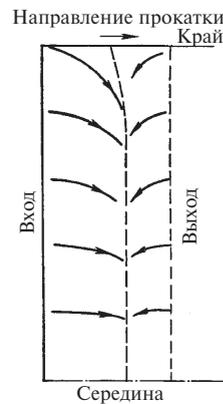


Рис. 3.12. Положение нейтрального сечения на широкой полосе (вид сверху)

на широких полосах средняя часть полосы массивна, она воздействует на кромки и принудительно вытягивает их. Кромки подвержены растягивающим напряжениям. Как и при воздействии переднего натяжения, на кромках опережение выше, чем в середине. Нейтральное сечение искривляется выпуклостью в сторону сечения выхода (рис. 3.12), а контактные силы трения переменны по ширине.

3.6. Коэффициент трения при прокатке

На низких и средних очагах деформации практически все деформационные и силовые параметры прокатки определяются коэффициентом трения μ . Общие сведения о коэффициенте трения уже были изложены при рассмотрении процесса осадки. Для прокатки экспериментально получены более глубокие результаты. Подробно трение при прокатке изучено А.П. Грудевым. Если за коэффициент трения по-прежнему принимать отношение касательных напряжений к нормальным, то приходится признать, что он непостоянен по длине дуги захвата. Коэффициентом трения часто называют некоторое среднее его значение, хотя это принципиально неправильно. Только при трении, подчиняющемся закону Кулона $\tau = \mu\sigma$, т. е. в зонах опережения и отставания, коэффициент трения μ выступает как постоянная величина и служит физической характеристикой трения. При пластической деформации на средних и высоких очагах деформации, когда закон Кулона в зонах прилипания не выполняется, можно говорить только о “кажущемся”, или условном, коэффициенте трения. В таких условиях коэффициент трения следует рассматривать только как усредненное отношение напряжений контактного трения к нормальным напряжениям. В связи с этим он должен зависеть как от метода, так и от места определения тех и других напряжений.

В зависимости от метода определения при прокатке различают три разновидности коэффициента трения, которые существенно отличаются при одинаковых условиях на контактной площадке и состоянии поверхности металла и валков:

- при захвате;
- при буксовании по контактной поверхности;
- при установившемся процессе.

Коэффициент трения при захвате определяется по методу предельного захвата. К валкам, зазор между которыми заведомо мал, подводится прямоугольный образец, захвата полосы не происходит. Затем валковый зазор медленно увеличивается до захвата образца. В этот момент имеем равенство $\mu = \alpha$. Угол захвата вычисляется по формуле $\alpha = \arccos(1 - \Delta h/D)$.

Полученный коэффициент трения — это не тот коэффициент трения, который формируется при установившемся процессе. Коэффициент трения при захвате отражает взаимодействие сил, формирующихся на площадке смятия, которая образуется в момент захвата. Коэффициент трения при захвате хорошо изучен и используется при исследовании вопросов захвата. Впервые С. Экелунд экспериментально получил численные значения такого коэффициента трения. Широко известна формула Экелунда

$$\mu_{\text{зах}} = k_1 k_2 k_3 (1,05 - 0,0005 t \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Коэффициент k_1 зависит от материала валков: $k_1 = 1,0$ для стальных валков и $k_1 = 0,8$ для чугуновых валков. Коэффициент k_2 учитывает влияние скорости прокатки на условия трения. Ранее указывалось, что с увеличением скорости коэффициент трения снижается (см. рис. 1.19). Коэффициент k_3 учитывает влияние химического состава стали. Для углеродистых сталей $k_3 = 1,0$, для перлитно-мартенситных (ШХ15 и др.) $k_3 = 1,3$, для сталей аустенитного класса типа 12Х18Н9Т $k_3 = 1,4-1,47$, для ферритных сталей (1Х17Ю5) $k_3 = 1,55$. Как видно, с ростом температуры коэффициент трения по Эжелунду снижается, по этой формуле он определяется только для процессов горячей прокатки ($t \text{ } ^\circ\text{C} > 700 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Коэффициент трения можно вычислить методом пробуксовки полосы при прокатке. Существует несколько экспериментальных методов создания условий пробуксовки. Например, можно клещами удерживать полосу в очаге деформации при вращающихся валках и померить усилие, при котором движение полосы прекращается. Чаще используют другой прием: в момент прокатки быстро сближают валки до пробуксовки полосы в валках. В этот момент горизонтальные составляющие сил трения T_x и нормального давления P_x (см. рис. 3.5) равны, выполняется условие $\mu = \gamma$. Нейтральный угол γ рассчитывается по формуле Павлова. Такой коэффициент трения отражает отношение касательных напряжений к нормальным в условиях скольжения металла относительно валков в экстремальном случае установившейся прокатки.

Экспериментальное значение коэффициента трения $\mu_{\text{букс}}$ всегда ниже, чем при захвате (для углеродистых сталей — в 1,25–2,00 раза). Это объясняется тем, что, как и при осадке, отношение касательных напряжений к нормальным снижается с ростом нормального напряжения. Последнее, естественно, больше в установившемся процессе, чем при захвате. По той же причине коэффициент трения твердых сталей будет ниже, чем мягких. Смазка сильно влияет на коэффициент трения при установившемся процессе, но меньше изменяет коэффициент трения при захвате. Для горячей прокатки (при $t \text{ } ^\circ\text{C} > 700 \text{ } ^\circ\text{C}$) клещевым методом Н.Н. Гетом получена формула

$$\mu_{\text{букс}} = 0,55 - 0,00024t \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Например, при $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ и при $k_1 = k_2 = k_3 = 1$ по формуле Эжелунда $\mu = 0,55$, а по формуле Гета $\mu = 0,3$. Это — разные коэффициенты трения, поскольку получены разными методами.

При нормальных условиях установившегося процесса прокатки коэффициент трения можно определить методом опережения. Если на валках нанести два керна на расстоянии L_B , то после прокатки расстояние между отпечатками

кернов увеличится до $L_{\text{П}}$, и опережение будет таким: $S = \frac{L_{\text{П}} - L_B}{L_B}$. Измеренное

таким способом опережение можно подставить в формулу Головина—Дрездена и найти значение нейтрального угла γ , а затем из формулы Павлова определить коэффициент трения.

Помимо описанных существует несколько методов, в которых непосредственно в процессе прокатки измеряются касательные и нормальные напря-

жения, а коэффициент трения является их отношением. Можно усреднить его значение по дуге захвата. Естественно, коэффициент трения в этих случаях получается отличным от полученных при захвате, пробуксовке и опережении.

Каждый новый метод определения коэффициента трения вносит дополнительные сведения о его свойствах. Например, с помощью методов непосредственного замера напряжений было установлено, что коэффициент трения при прокатке (усредненный, “кажущийся” коэффициент трения) зависит от высоты очага деформации, которая характеризуется отношением l/h_{cp} . Чем больше это отношение, т. е. чем ниже очаг деформации (или чем тоньше полоса), тем ниже коэффициент трения.

Несмотря на то что коэффициент трения при прокатке не является физической константой, он широко используется в теории ОМД. С его помощью можно достаточно емко характеризовать условия контактного трения. Исследование влияния на коэффициент трения различных технологических параметров позволяет правильно выбрать оптимальные значения этих параметров и правильно отразить общие закономерности изменения средних условий трения на контакте при изменении технологических условий прокатки. Например, по значению коэффициента трения, независимо от способа его определения, из многих смазок легко выбрать ту, которая наилучшим образом снижает силы трения на контактной площадке. Другой пример. Понятие “коэффициент трения” можно использовать при анализе поперечной и продольной деформации металла при прокатке. Ранее говорилось, что поперечную деформацию можно оценить показателем A , а продольную — соответственно $1 - A$. Сопротивление истечению в продольном и поперечном направлении определяется силами трения. На узком образце с увеличением коэффициента трения, каким бы способом его ни определяли, уширение растёт, соответственно, уменьшается вытяжка. На широких образцах зависимость обратная. Это объясняется законом наименьшего периметра: с ростом коэффициента трения подпирающие силы трения по длинной стороне очага деформации в плане возрастают более интенсивно, чем по короткой стороне.

Глава 4

ХАРАКТЕР ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ

4.1. Средние очаги деформации

Средние очаги деформации реализуются примерно в интервале $1 < l/h_{cp} < 4$. Они характеризуются тем, что на поверхности контакта достаточно развиты зоны скольжения и зоны прилипания. Эпюры контактного трения и нормального давления имеют вид (рис. 4.1), аналогичный рассмотренным при осадке. Видно, что на участке AB реализуется зона отставания, на участке CD — зона опережения, а средняя часть дуги захвата занята зоной прилипания.

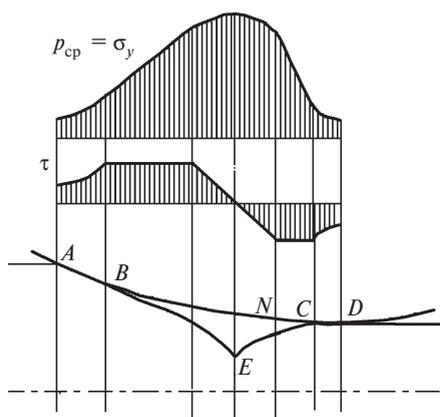


Рис. 4.1. Эпюры касательных и нормальных контактных напряжений на среднем очаге деформации

зона прилипания *BCE* быстро убывает (см. рис. 4.1). Эта зона может смещаться по дуге захвата под действием различных технологических факторов. Например, с увеличением толщины полосы и скорости прокатки, а также при использовании смазки зона прилипания смещаются к сечению выхода.

Если решить плоскую задачу в напряжениях по аналогии с приведенной выше задачей об осадке, то получим, что на участках скольжения давление p изменяется по экспоненте, в зоне торможения — прямолинейно и в зоне застоя — по параболе.

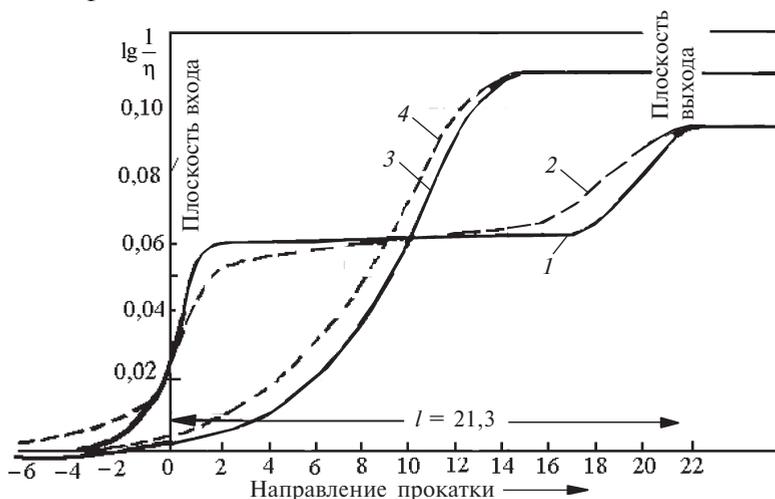


Рис. 4.2. Кривые нарастающих логарифмических коэффициентов относительного обжатия (медные и алюминиевые полосы сечением 20×80 мм, обжатие 21,5 %):

в середине ширины контактного слоя (1), у боковой кромки этого слоя (2), в середине ширины среднего слоя по высоте полосы (3), у боковой поверхности этого слоя (4)

В зоне прилипания, объединяющей зоны торможения и застоя, как и при осадке, не происходит физического схватывания частиц металла и валков, прилипание определяется кинематическими условиями течения металла относительно валков. Течение в форме скольжения здесь отсутствует, но деформация не упругая, а затрудненная пластическая. Экспериментально замечено, что в зоне прилипания происходит некоторое смещение металла относительно валков, однако фрикционные связи в значительной мере обнаруживают упругие свойства. В литературе такое смещение подробно описано и получило название “предварительное смещение”. Специальные исследования показали, что предварительные смещения находятся в пределах от тысячных долей до нескольких микрометров. С увеличением нормального давления это смещение увеличивается. Значение предварительного смещения определяют силы трения в зоне прилипания.

Для объяснения природы сил трения в зоне прилипания обратимся к известному в механике понятию о статических силах трения. Пусть тело A , прижатое к неподвижному телу нормальной силой N , испытывает действие сдвигающей силы Q (рис. 4.3). Пока сила Q мала, точнее, пока соблюдается неравенство $Q < \mu N$, скольжение тела A отсутствует. В этом случае тело A испытывает только стремление к сдвигу. Со стороны неподвижного тела на тело A действует статическая сила трения T , которая уравнивает силу Q : $T = Q$. Это трение покоя. Скольжение начнется тогда, когда сила Q достигает значения μN . Далее выполняется равенство $Q = \mu N$. Начинается трение скольжения.

Все изложенное справедливо и для очага деформации при прокатке. В зонах скольжения (опережения и отставания) касательные контактные напряжения $\tau = \mu \sigma_y$, а в зоне прилипания $\tau < \mu \sigma_y$, здесь выполняется условие $\tau = K/2$. В этом смысле напряжения трения в зоне прилипания не могут быть больше тех, которые реализовались бы, если бы было скольжение.

Силы трения в зоне прилипания — это статические силы трения. Они характеризуют стремление металла к сдвигу, но не являются следствием сдвигов. Кроме того, необходимо учитывать векторный характер сил трения. Рассмотрим направления действия сил трения при прокатке (см. рис. 3.7, б). Они направлены против движения частиц металла относительно валков. Это относится также к зоне прилипания, где скольжения нет, но имеются малые смещения. В любой точке контактной площадки вектор сил трения t имеет две составляющие t_x и t_y , связанные зависимостью $t^2 = t_x^2 + t_y^2$. В нейтральном сечении продольная составляющая равна 0 (см. рис. 3.7, а), стремление к сдвигу в этом направлении отсутствует. По мере удаления от нейтрального сечения стремление к продольному сдвигу увеличивается, растут удельные силы трения. В пределе они достигают предельного значения $\tau = K/2$ и дальше увеличиваться не могут, зона застоя заканчивается, и начинается зона торможения.

В зонах застоя и торможения, которые вместе образуют зону прилипания, реализуются статические силы трения, а в зонах скольжения — зонах опережения и отставания — динамические силы трения, или силы трения скольжения. И только в зонах скольжения физической характеристикой трущихся поверхностей служит коэффициент трения μ .

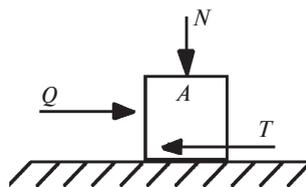


Рис. 4.3. К механизму развития сил трения

В литературе встречаются неточные суждения о силах трения при прокатке. Приведенная эпюра контактных напряжений (см. рис. 4.1) дала основания некоторым авторам утверждать, что силы трения в зоне прилипания максимальны и больше, чем в зоне скольжения. Некоторые считают также, что в зоне прилипания металл действительно прилипает к валкам, происходит некоторое схватывание трущихся поверхностей. Однако мы уже отметили, что в зоне прилипания происходит не схватывание или приваривание поверхностей, а заторможенное скольжение. Указывалось также, что силы трения не максимальны в зоне прилипания в том смысле, что были бы больше, если бы продолжалось скольжение. Прилипание отсутствовало бы, если бы металлу было энергетически выгодно скользить по поверхности валков. Правильнее считать, что в зонах прилипания напряжения трения предельные, а не максимальные. Металлу невыгодно реализовать максимальные силы трения в зоне прилипания, так как для этого потребовались бы силы трения $\mu\sigma > K/2$. На деформацию в целом затрачивается меньше энергии, если реализуются предельные, но меньшие, чем при скольжении, напряжения трения, и деформация металла осуществляется не за счет скольжения по поверхности, а за счет иного механизма деформации — деформации внутренних слоев металла. Деформация металла может осуществляться либо путем скольжения по поверхности контакта, либо, когда контактное скольжение затруднено, в подконтактных слоях. Действительная картина течения определяется законом минимума расхода энергии, и если работа сил трения скольжения оказывается больше работы дополнительных внутренних сдвигов, то реализуется течение за счет дополнительных сдвигов внутри металла, а на поверхности контакта появляется зона прилипания.

При горячей деформации на средних очагах в средней части дуги захвата на контакте металлу энергетически выгодно образовать зону прилипания, зоны скольжения остаются в начале и в конце очага деформации. Внутренние слои металла, интенсивно деформируясь, увлекают за собой приконтактные слои и вынуждают образовывать на контакте некоторые площадки скольжения. Кстати, за счет такого воздействия со стороны внутренних слоев в приконтактных слоях образуются дополнительные продольные растягивающие напряжения, которые могут привести к возникновению трещин. Практически всегда мелкие поверхностные трещины, образовавшиеся на металле при разливке, в дальнейшем при горячей прокатке не залечиваются, а, наоборот, за счет растягивающих напряжений только увеличиваются и раскрываются в виде более крупных трещин. Необходимо уже на слитках или, в крайнем случае, на ранних стадиях горячей прокатки удалять поверхностные дефекты.

На средних очагах все факторы, затрудняющие поверхностное скольжение, облегчают внутренние сдвиги и способствуют увеличению зоны прилипания и сокращению зон скольжения.

В силу разной природы сил трения в зонах прилипания и скольжения силы трения в этих зонах по-разному зависят от технологических факторов прокатки. Так, в зоне прилипания силы трения не зависят от шероховатости поверхности, от условий смазки, от скорости металла и т. д., а в зонах скольжения эти факторы существенным образом влияют на силы трения. Увеличение коэффициента трения и повышение высоты полосы увеличивают работу сил трения скольжения, следовательно, облегчают внутреннюю деформацию

и увеличивают зону прилипания. На протяженность зоны прилипания оказывают влияние внешние зоны полосы — “жесткие концы”. Внешние зоны выравнивают распределение вытяжек по высоте полосы, затрудняют внутренние перемещения, поэтому они способствуют уменьшению зоны прилипания. При осадке не было “жестких концов”, поэтому при осадке и при одинаковых границах геометрического очага деформации зона прилипания больше, чем при прокатке. Можно утверждать также, что натяжение полосы при прокатке — переднее и заднее — уменьшает протяженность зоны прилипания.

По высоте полосы зона затрудненной деформации резко сокращается (см. рис. 4.1). На контактной площадке протяженность ее равна BC , а на некоторой глубине (в точке E) она полностью исчезает, и очаг деформации занимают только зоны опережения и отставания. Поэтому иногда даже при развитой зоне прилипания на средних очагах в качестве некоторого упрощения, которое оправдано при решении многих задач о напряжениях и силах (но не о деформациях!), полагают, что очаг деформации состоит из зоны опережения и отставания с водоразделом по нейтральному сечению MN . При этом нейтральное сечение необязательно является плоским. Экспериментальные исследования показывают, что оно практически всегда искривлено по высоте образца куполом в сторону плоскости входа. Оперережение внутренних слоев металла выше, чем поверхностных.

Кратко проанализируем методы расчета протяженности зоны прилипания на площадке контакта средних очагов деформации. В литературе содержится ряд рекомендаций по расчету зоны прилипания. Наиболее простые прикладные формулы предложил А.И. Целиков:

для горячей прокатки $l_{\text{п}} = (0,5-2,0) h_{\text{ср}}$;

для холодной прокатки $l_{\text{п}} = (0,3-1,0) h_{\text{ср}}$.

Эти формулы дают широкие пределы изменения зоны прилипания и не учитывают факторов, влияющих на ее протяженность. Более полную формулу получил А.А. Королев, учтя коэффициент трения и геометрические параметры прокатки:

$$l_{\text{п}} = \frac{l}{\varepsilon} \left[\left(\frac{2\mu - \alpha}{1 - \alpha} \right)^{\frac{1}{\delta}} - (1 - \varepsilon) \left(\frac{1 - \alpha}{2\mu + \alpha} \right)^{\frac{1}{\delta}} \right],$$

где $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$; $\delta = \frac{2\mu l}{\Delta h}$.

Приведем еще формулу Динника, полученную из условия, что на границе зон скольжения и прилипания работа сил скольжения равна работе дополнительных внутренних сдвигов:

$$l_{\text{п}} = \frac{2\mu p_{\text{ср}}}{K} h_{\gamma},$$

$$0,75 - \left(\frac{\mu p_{\text{ср}}}{K} \right)^2$$

где K — предел текучести при прокатке; h_{γ} — высота нейтрального сечения,

$$h_\gamma = h_1 + \gamma^2 R,$$

если нейтральный угол γ вычислить по формуле Павлова.

Экспериментальному исследованию протяженности зоны прилипания посвящено много работ. Разработано несколько оригинальных методик, в основу которых положены непосредственные измерения нормальных и касательных напряжений в очаге деформации. Среди них следует отметить метод точечных месдоз, когда в тело валка под разными углами к поверхности ввинчиваются месдозы — тонкие стержни с наклеенными на них датчиками, воспринимающими нормальную и касательную нагрузки с поправкой на угол размещения месдозы. Расшифровав запись усилий на эти месдозы, можно проследить характер изменения отдельно нормальных и касательных напряжений по длине очага.

Касательные напряжения можно измерить также с помощью разрезного валка, содержащего подвижный сектор, опирающийся на вделанную внутрь валка месдозу. Касательные силы воздействуют на выделенный сектор валка, а следовательно, на месдозу, и по записи этого усилия расшифровываются сами напряжения. Если в такой сектор поместить еще месдозу, установленную по радиусу валка, то можно измерять также нормальное усилие. Такой разрезной валок с указанной месдозой становится прибором для измерения нормальных и касательных напряжений и называется торсиомером (разработка МИСиС).

Значительный вклад в описание трения на контакте внес поляризационно-оптический метод. Валки, изготовленные из оптически активных материалов, в поляризационном свете дают визуальную картину распределения напряжений по всему сечению валков, в том числе в зоне контакта. Сфотографировав эту картину и расшифровав по соответствующей методике, получают нормальные и касательные напряжения на контакте.

Все приведенные методы экспериментального исследования имеют определенные недостатки, поэтому они всегда дополняются теоретическим анализом и расчетами, основанными на методах теории упругости и пластичности.

4.2. Высокие очаги деформации

При увеличении высоты очага деформации зоны скольжения сокращаются и примерно при $l/h_{\text{ср}} < 1$ вырождаются, весь очаг деформации по контакту занимает зона прилипания. Очаг деформации становится высоким. Контактные силы трения и нормального давления имеют эпюры, характерные для зон торможения и застоя (рис. 4.4). Реализация подобного распределения напряжений на площадке подтверждается экспериментально. Металлу энергетически вы-

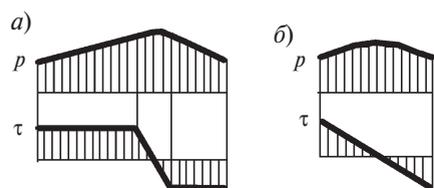


Рис. 4.4. Возможные (теоретические) эпюры контактных напряжений на высоком очаге деформаций

годнее, реализовав предельные (но не максимальные!) силы трения на контакте, затормозить течение по длине контакта. При этом протяженность зоны затрудненной деформации быстро убывает по высоте очага. Пластическая деформация осуществляется в подконтактных слоях. На некотором расстоянии от поверхности контакта располагаются слои с интенсивной пластической деформацией.

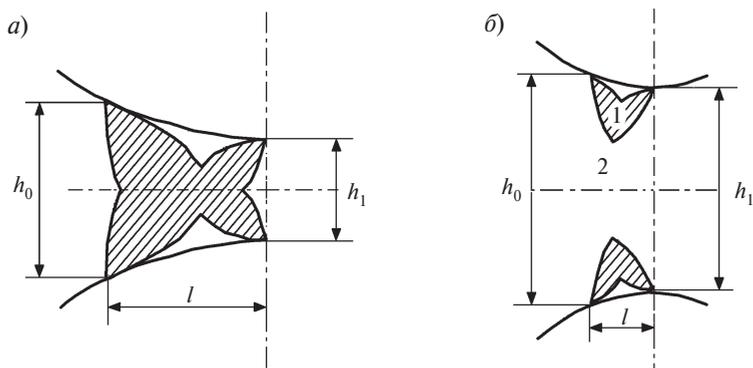


Рис. 4.5. Характер распространения зон интенсивной деформации на среднем (а) и высоком (б) очагах (в продольном сечении)

Характер деформации на среднем и высоком очагах принципиально различается (рис. 4.5). На среднем очаге зоны интенсивной деформации со стороны верхнего и нижнего валков встречаются в середине сечения (см. рис. 4.5, а). Как и при осадке среднего образца, зона интенсивной деформации имеет форму креста (рис. 4.6, а), откуда металл интенсивно течет не только в длину, но и в ширину. Образуется форма поперечного сечения в виде одинарной бочки. Таким образом, на среднем очаге деформации активная пластическая деформация металла проникает на всю толщину, достигая максимальной интенсивности на средней линии образца.

На высоком очаге зоны активной деформации не проникают на всю глубину сечения (см. рис. 4.5, б). В середине сечения существует зона 2, в которую активные пластические деформации от действия валков не проникают. Следует подчеркнуть, что границы между зонами не столь резки, как изображено на рисунках (этом и всех последующих), поэтому какие-то количественные характеристики из них получить трудно.

По изменению координатной сетки экспериментально установили, что в тонком приконтактном слое в зоне прилипания деформация незначительна, затем часть сечения занимает зона интенсивной деформации, а в центральных слоях пластическая деформация вновь мала. В отдельных центральных объемах могут быть только упругие деформации (рис. 4.6, б). Образец после деформации

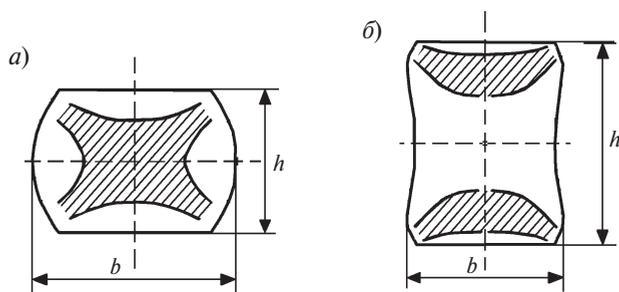


Рис. 4.6. Зоны интенсивной пластической деформации на среднем (а) и высоком (б) очагах (в поперечном сечении)

имеет форму двойной бочки. Создается очень высокая неравномерность деформации по высоте полосы, которая в большей мере, чем силы трения на контакте, определяют напряжения и деформации в очаге деформации в целом. В узкой полосе зоны прилипания в приконтактных слоях любые условия трения оказывают практически одинаковое влияние на основную часть очага деформации, где все определяется только неравномерностью деформации по высоте.

По ширине прокатываемой высокой полосы деформация также неравномерна. Зона *l* (см. рис. 4.5, б) имеет наибольшую глубину в средних по ширине слоях. Глубина зоны активной деформации сокращается к кромкам за счет того, что металлу энергетически выгоднее течь в ширину, чем в глубину сечения. Если приложить боковое усилие, сдерживающее уширение поверхностных слоев, например, прокаткой в калибре, то глубина проникновения активной пластической деформации увеличивается как на кромках, так и в средних по ширине слоях. Причем деформация по ширине полосы выравнивается. Зоны активной деформации при прокатке в калибрах смыкаются при меньших отношениях l/h_{cp} , чем при прокатке на гладкой бочке. Граница, разделяющая средние и высокие очаги деформации, находится при $l/h_{cp} < 1$.

Рассмотренная картина деформации значительно осложняет исследование явления опережения при прокатке высоких полос. По всей контактной площадке располагается зона прилипания, поэтому скорости валков и полосы совпадают, по определению опережение на контакте близко к 0. Но поскольку в зоне прилипания существует микроскопическое перемещение металла относительно валков, то существует водораздел сил трения. Условно можно считать, что частицы металла, находящиеся на площадке контакта от точки водораздела до сечения выхода находятся в зоне опережения, а до сечения входа — в зоне отставания. По высоте полосы зона прилипания быстро сокращается, и уже на некотором удалении от контактных площадок в глубине сечения присутствуют реальные, а не условные зоны опережения и отставания, разделенные нейтральным сечением. Экспериментально показано, что по всей высоте полосы существует нейтральное сечение, оно сильно искривлено в сторону входного сечения (рис. 4.7). При $l/h_{cp} < 0,2$ оно может выходить за пределы геометрического очага деформации. Практически весь металл, за исключением небольших объемов, находящихся у поверхностей контакта, находится в зоне опережения. Среднее по очагу деформации опережение на высоких очагах деформации может достигать больших значений.

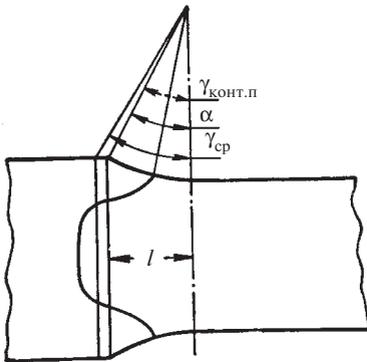


Рис. 4.7. Положение нейтральной линии по высоте полосы на высоком очаге деформации

На рис. 4.8 приведены экспериментальные данные по опережению при прокатке на промышленном слябинге. Видно, что в каких-то реальных условиях прокатки пластическая зона простирается на все сечение сляба уже при отношении $l/h_{cp} = 0,4-0,5$, и уже при таком отношении очаг деформации переходит от высокого к среднему. С уменьшением высоты полосы (с ростом l/h_{cp}) на высоких очагах опережение падает, а на средних растет.

На блюминге и слябинге обычно нижний валок больше верхнего. Опыты показывают, что опережение на большем валке меньше и может быть даже отрицательным, т. е. металл будет отставать от валка за счет тормозящего воздействия со стороны меньшего валка. Отрицательное опережение — это вредное явление при прокатке, поскольку часть сил трения, необходимых для нормального захвата и стационарной прокатки, выводится из процесса. Ухудшается захват полосы, появляется нестабильность установившейся прокатки. Кроме того, при разных окружных скоростях валков момент прокатки на большем валке может значительно превышать момент на меньшем валке (в два-три раза), поэтому стремятся не допускать рассогласование скоростей валков более 0,2 рад/с.

Между зонами 1 и 2 (см. рис. 4.5, б) существует взаимодействие, поэтому осевая (пассивная) зона 2 также находится в состоянии пластического течения. Если бы обе зоны не были связаны между собой, то в зоне 2 деформации оставались бы упругими, а металл активных зон без помех естественным образом растекался бы в направлении длины и ширины образца. Пассивные осевые зоны, воздействуя на активные, препятствуют течению металла в длину, и чем массивнее пассивные зоны, тем в активных зонах меньше вытяжка, следовательно, больше уширение металла и больше разница между фактической вытяжкой и той естественной, которая была бы при отсутствии связи между зонами. На элементарный объем металла, выделенный в активной зоне, действуют дополнительные продольные напряжения сжатия со стороны пассивных зон. Показатель уширения $A = \epsilon_3/\epsilon_1$ в активных зонах возрастает с увеличением объема пассивной зоны. Чем выше очаг деформации (меньше l/h_{cp}), тем больше уширение в активных зонах. На рис. 4.9 (кривая 1) показан примерный характер изменения показателя уширения в приконтактных слоях по мере изменения параметра l/h_{cp} . На очень высоких очагах показатель A близок к 1, а по мере снижения высоты очага (до $l/h_{cp} = 0,5-1,0$) постепенно уменьшается. При переходе к средним очагам ($l/h_{cp} > 1$) взаимодействие между зонами исчезает, но за счет сил трения, степень развития которых возрастает с увеличением l/h_{cp} , уширение начинает возрастать.

Рассмотрим характер деформации металла в пассивных зонах. При отсутствии взаимодействия между зонами показатели удлинения и уширения были бы равны 0, но под воздействием активных зон в пассивных имеет место и удлинение, и уширение (активные зоны принудительно тянут металл в обоих направлениях). Металл в пассивных зонах находится в пластическом состоянии.

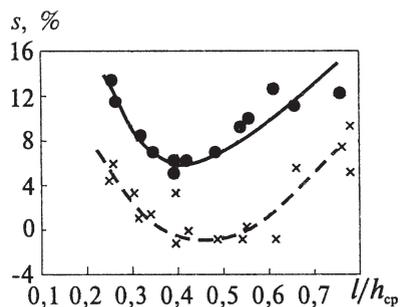


Рис. 4.8. Опережение при прокатке на слябинге на нижнем валке (сплошная линия) и на верхнем валке (пунктирная линия)

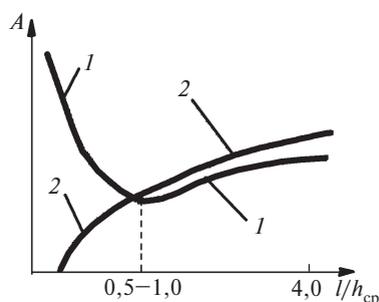


Рис. 4.9. Уширение в приконтактных (1) и осевых (2) зонах по мере снижения высоты очага деформации

Естественно, чем выше очаг деформации, тем больше объем пассивных зон и больше их роль в общем взаимодействии зон, тем в этих зонах уширение меньше. С ростом параметра l/h_{cp} уширение будет расти (см. рис. 4.9, кривая 2). Имеются экспериментальные данные, показывающие, что на очень высоких очагах деформации возможно отрицательное уширение, т. е. утяжка центрального слоя металла. Однако с большой вероятностью в этом случае уширение близко к 0, но не отрицательное.

Когда фактор $l/h_{cp} > 1$ и очаг деформации становится средним, уширение центральных слоев металла по-прежнему растет, но уже за счет сил трения. При этом силы трения сдерживают уширение приконтактных слоев, а центральные слои уширяются более свободно. Кривая 2 пройдет выше кривой 1. При дальнейшем увеличении фактора l/h_{cp} очаг деформации переходит в разряд низких, кривые уширения контактных и средних слоев сливаются, и при прокатке тонких листов и лент уширение падает до 0.

Рассмотрим силовую картину деформации на высоких очагах. Выделим элементарный объем в активной зоне 1 (см. рис. 4.5, б). Под действием валков по всем трем направлениям (рис. 4.10, а) действуют сжимающие главные напряжения σ_1, σ_3 (продольные) и σ_2 (поперечные). Наибольшее из них — σ_1 , наименьшее — σ_3 (с учетом знака), поэтому условие пластической деформации выделенного объема в форме Треска запишется в виде

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \nu K,$$

где K — предел текучести металла при прокатке; ν — коэффициент Лода.

Положим $\nu = 1$ и запишем условие пластичности следующим образом:

$$\frac{\sigma_1}{K} = 1 + \frac{\sigma_3}{K}.$$

Напряжение σ_1 определяет среднее давление металла на валки p_{cp} и в некотором приближении может быть ему приравнено. Если бы не было пассивных зон, металл выделенного объема испытывал бы практически слабое сопротивление течению в направлении длины, трение на контакте слабо влияет на характер деформации выделенного объема, поэтому σ_3 близко к 0, и отношение $\frac{p_{cp}}{K}$ близко к 1. Его значение при $\sigma_3 = 0$ называют базисным или базо-

вым и обозначают $\left(\frac{p_{cp}}{K}\right)_{баз}$. Но пассивные зоны создают дополнительный

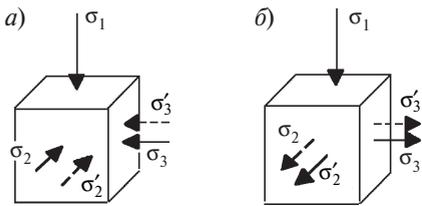


Рис. 4.10. Схема основных и дополнительных напряжений в активной (а) и пассивной (б) зонах

подпор течению металла в активной зоне, препятствуя удлинению. Дополнительное сжимающее напряжение σ'_3 суммируется с основным напряжением σ_3 . Чтобы металл деформировался пластически, т. е. выполнялось условие Треска, необходимо увеличивать напряжение σ_1 , т. е. давление металла на валки p_{cp} . Чем выше очаг деформации, тем выше сумма $\sigma_3 + \sigma'_3$ и выше давление металла на валки p_{cp} .

Отношение

$$\frac{\frac{p_{cp}}{K}}{\left(\frac{p_{cp}}{K}\right)_{баз}} = n_3 \quad (4.1)$$

характеризует влияние дополнительного подпора активных зон со стороны пассивных на увеличение давления металла на валки (как следствие неравномерности деформации). Оно называется коэффициентом подпора. На рис. 4.11 (левая ветвь) показано изменение n_3 на высоких очагах деформации.

На средних очагах деформации при снижении высоты очага деформации давление металла на валки также увеличивается, но причиной тому являются уже силы трения на контактных поверхностях. На средних очагах отношение

$$\frac{\frac{p_{cp}}{K}}{\left(\frac{p_{cp}}{K}\right)_{баз}} = n_{\sigma} \quad (4.2)$$

характеризует влияние сил трения на давление металла на валки. На рис. 4.11 правая ветвь кривой демонстрирует зависимость коэффициента n_{σ} от высоты среднего очага деформации. Поскольку оба коэффициента n_{σ} и n_3 зависят только от отношения l/h_{cp} , то можно рассматривать их произведение $n_{\sigma}n_3$ как единый коэффициент, причем на высоких очагах $n_{\sigma} = 1$ и $n_3 > 1$, а на средних $n_{\sigma} > 1$ и $n_3 = 1$.

Коэффициент n_3 можно вычислять по формуле Смирнова

$$n_3 = 2 - \sqrt{l/h_{cp}}. \quad (4.3)$$

Для вычисления n_{σ} на средних очагах предлагаются, например, формулы Бровмана

$$n_{\sigma} = 0,75 + 0,25l/h_{cp},$$

если $4 \geq l/h_{cp} > 2$;

$$n_{\sigma} = 0,5(l/h_{cp} + h_{cp}/l), \quad (4.4)$$

если $1 \leq l/h_{cp} \leq 2$.

На низких очагах деформации, характерных для листовых станов, давление на валки следует вычислять по методике Целикова [1]. Главным параметром здесь является критерий $\frac{2\mu l}{\Delta h} = \frac{2\mu}{\alpha}$, отражающий соотношение коэффициента трения μ и половины угла захвата α , примерно равного углу γ , что легко трансформировать в соотношение силы трения T и нормального усилия P при установившейся прокатке. Коэффициент n_{σ} определяется по номограмме Целикова (см. разд. 4.3, рис. 4.15).

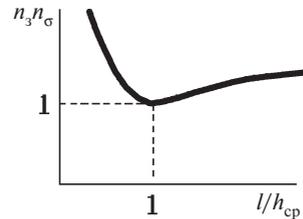


Рис. 4.11. Изменение коэффициентов подпора n_3 и коэффициента влияния трения n_{σ} на высоких и средних очагах деформации

Для низких очагов ($l/h_{cp} > 4$) при горячей прокатке иногда рекомендуют формулу

$$n_{\sigma} = 1 + \frac{l}{4h_{cp}}.$$

Для холодной прокатки при $l/h_{cp} > 6-8$ применима формула, полученная для осадки тонкой полосы под параллельными бойками:

$$n_{\sigma} = \frac{e^m - 1}{m + 1}, \quad (4.5)$$

где $m = \mu \frac{l}{h_{cp}}$.

Выше отмечалось, что граница высоких и средних очагов деформации может смещаться в зависимости от условий деформации. Для определенности мы приняли в качестве границы отношение $l/h_{cp} = 1$ (см. рис. 4.11). Будем считать, что активные зоны смыкаются на оси при этом отношении, тогда оба коэффициента n_3 и n_{σ} равны 1: $n_3 = n_{\sigma} = 1$. Давление на валки равно базисному и пределу текучести металла при прокатке K . Известно, что фактический предел текучести металла при прокатке отличается от полученного при растяжении стандартного образца. Они были бы равными, если бы при прокатке отсутствовало трение на контакте. Поэтому методика экспериментального определения предела текучести непосредственно *при прокатке* очень важна. Необходимо подобрать широкие образцы и прокатать их в базисных условиях (при $l/h_{cp} = 1$). Измерив усилие прокатки P и поделив его на площадь контакта $F = lb_{cp}$, вычислим среднее давление p_{cp} , которое по условию текучести Треска будет равно νK . На широких образцах $\nu = 1,155$. Отсюда вычисляется предел текучести металла при прокатке K . Надо заметить, что метод определения предела текучести прокаткой в базисных условиях не получил широкого распространения, поскольку не стандартизован и не так удобен, как растяжение стандартных образцов на разрывных машинах.

Активные зоны металла (см. рис. 4.10), благодаря дополнительному подпору, находятся в состоянии трехстороннего сжатия, что благоприятно сказывается на пластичности металла (способности деформироваться без разрушения). Наоборот, дополнительные напряжения в пассивных зонах (см. рис. 4.10, б) являются растягивающими как в продольном, так и поперечном направлениях. Это снижает пластичность металла, поэтому в центральных по высоте слоях возможны трещины (рис. 4.12), коварные тем, что они скрыты внутри проката.

Таким образом, при прокатке на блюминге и слябинге, когда реализуются высокие очаги деформации, со всех позиций вредны малые обжатия, обеспе-



Рис. 4.12. Характер трещинообразования при прокатке на блюминге

чивающие высокие очаги деформации. Во-первых, образуется лишнее течение металла в ширину в приконтактных зонах, следовательно, меньше вытяжка, и для получения конечного профиля (блюда или сляба) требуется дополнительная энергия и время. Во-вторых, образуются наплывы, искажающие форму поперечного сечения раската. В-третьих, давление металла на валки повышается. И наконец, пластичность центральных слоев слитка понижается. На блюмингах и слябингах при деформации крупных слитков, особенно в первых пропусках, когда высота проката велика, необходимо деформировать металл с максимально возможными обжатиями, увеличивая значение фактора l/h_{cp} . Для этого также полезно увеличивать диаметр валков стана. Первые блюминги имели диаметр валков 900–1000 мм, по мере роста массы слитков диаметры увеличивались до 1100–1250 мм. Большинство современных блюмингов имеет диаметр валков 1300 мм, а в составе балочного стана на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате имеется блюминг с валками диаметром 1500 мм. За рубежом спроектирован блюминг 1800.

4.3. Низкие очаги деформации

Низкий очаг деформации характеризуется пренебрежимо малыми зонами прилипания. В очаге деформации от сечения входа до нейтрального сечения существует зона отставания и после нейтрального сечения — зона опережения. Коэффициент трения μ представляет собой физическую характеристику трущихся поверхностей, а трение на контакте описывается законом Кулона $\tau = \mu\sigma$. Эпюры контактных касательных и нормальных напряжений имеют вид, как представлено на рис. 4.13.

Обычно считают, что низкие очаги реализуются при $l/h_{cp} > 4-5$. При таких значениях l/h_{cp} применима гипотеза плоских сечений. Конечно, гипотеза плоских сечений выполняется строго только при отсутствии трения на контакте. А поскольку даже при самых лучших смазках коэффициент трения не равен 0, то неравномерность деформации по высоте имеет место всегда, даже при очень низких очагах.

Для математического описания силовой картины деформации металла на низких очагах принятие гипотезы плоских сечений вполне корректно, и для плоской деформации задача разрешима в конечном виде. Плоская деформация имеет место при прокатке широкой полосы, когда деформация металла в направлении ширины почти отсутствует, и весь смещенный объем металла устремляется в длину.

Таким образом, достаточно правдоподобна следующая упрощенная модель деформации металла: в любом сечении очага деформации напряжения и деформации постоянны по

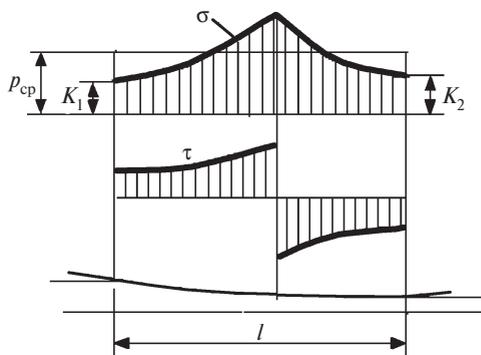


Рис. 4.13. Эпюры контактных напряжений трения и давления на низких очагах деформации

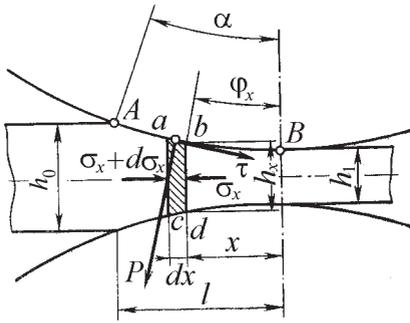


Рис. 4.14. Схема равновесия сил на низком очаге деформации

высоте и ширине образца, они изменяются только от сечения к сечению. Плоское сечение, проходя через очаг деформации, остается плоским, а любой прямоугольник, выделенный в сечении, остается прямоугольным. Приведенные упрощения составляют собой суть гипотезы плоских сечений и могут служить ее определением.

Выделим в низком и широком очагах деформации (например, в зоне отставания) на расстоянии x от сечения выхода элемент $abcd$ длиной dx (рис. 4.14). Ему соответствует центральный угол φ_x . Справа на выделенный элемент действует сила $\sigma_x h_x b$, где σ_x — напряжение сжатия, действующее противоположно направлению оси x . Аналогично на левую площадку высотой $(h_x + dh_x)$ действует сила $(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_x)b$, направленная по оси x . По поверхности контакта выделенного элемента действуют силы нормального давления p и трения τ , причем τ в зоне опережения действует по ходу прокатки (в положительном направлении по оси x), а в зоне отставания — в обратном направлении.

Для выделенного элемента сумма проекций всех сил на ось x равна 0:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_x)b - \sigma_x h_x b - 2p \sin \varphi_x b dx + 2\tau \cos \varphi_x b dx = 0.$$

Разделим на $\cos \varphi_x$ и, пренебрегая бесконечно малыми величинами высшего порядка, получим

$$\frac{1}{\cos \varphi_x} (\sigma_x dh_x + h_x d\sigma_x) - 2p \operatorname{tg} \varphi_x dx + 2\tau dx = 0.$$

Примем $\cos \varphi_x = 1$ ввиду малости угла и подставим в уравнение $dx = dh_x / 2 \operatorname{tg} \varphi_x$:

$$d\sigma_x - (p - \sigma_x) \frac{dh_x}{h_x} + \frac{\tau}{\operatorname{tg} \varphi_x} \frac{dh_x}{h_x} = 0.$$

Последнее слагаемое для элемента, выделенного в зоне опережения, будет иметь знак “минус”, а в зоне отставания “плюс”, поэтому в общем случае это слагаемое записывают со знаком “плюс минус”.

При малом угле φ_x можно приравнять нормальное напряжение σ_y давлению p . Тогда условие пластичности металла запишем в виде

$$p - \sigma_x = \nu K.$$

Коэффициент Лодэ ν на узких образцах (при плоском напряженном состоянии) равен 1,0, а на широких образцах (при плоской деформации) — 1,155. Продифференцировав условие пластичности, будем иметь

$$dp = d\sigma_x.$$

Подставим в уравнение равновесия условие пластичности, а также закон трения Кулона $\tau = \mu p$, получим уравнение прокатки — уравнение Кармана

$$dp = \left(\nu K \pm \frac{\mu p}{\operatorname{tg}\varphi_x} \right) \frac{dh_x}{h_x}$$

(для зоны опережения будет знак “плюс”).

Для решения этого уравнения требуется выразить $\operatorname{tg}\varphi_x$ через линейные параметры очага деформации. Самое простое выражение получится в том случае, когда дуга захвата (дуга окружности) заменяется хордой. Тогда средние значения $\operatorname{tg}\varphi_x$ в зоне отставания и опережения будут соответственно такими:

$$(\operatorname{tg}\varphi_x)_{\text{cp}} = \operatorname{tg}(\alpha + \gamma)/2 \quad \text{и} \quad (\operatorname{tg}\varphi_x)_{\text{cp}} = \operatorname{tg}\gamma/2.$$

Введем обозначения:

$$\delta_0 = 2\mu/\operatorname{tg}(\alpha + \gamma) \quad \text{и} \quad \delta_1 = 2\mu/\operatorname{tg}\gamma.$$

Тогда для зоны отставания и опережения получим соответственно

$$dp = (\nu K - \delta_0 p) \frac{dh_x}{h_x};$$

$$dp = (\nu K + \delta_1 p) \frac{dh_x}{h_x}.$$

Разделив переменные, получим выражение для зоны отставания

$$\frac{dp}{\nu K - \delta_0 p} = \frac{dh_x}{h_x},$$

или в более удобном виде: $-\frac{1}{\delta_0} \frac{-d(\delta_0 p)}{\nu K - \delta_0 p} = \frac{dh_x}{h_x}$. После интегрирования

$$-\frac{1}{\delta_0} \ln(\nu K - \delta_0 p) = \ln h_x.$$

Освобождаясь от логарифмов, получим:

для зоны отставания

$$p = C_0 h_x^{-\delta_0} + \nu K / \delta_0;$$

для зоны опережения

$$p = C_1 h_x^{\delta_1} - \nu K / \delta_1.$$

Константы интегрирования C_0 и C_1 получим из граничных условий на входе и выходе из очага деформации. Если нет натяжения полосы, то при $h_x = h_0$ и $h_x = h_1$ $\sigma_x = 0$ и по условию пластичности $p = \nu K$.

А.И. Целиков рассмотрел более общий случай, когда имеются напряжения заднего σ_0 и переднего σ_1 натяжения, которым следует приравнять напряжения σ_x на входе и выходе из очага деформации. Условие пластичности при $h_x = h_0$ будет иметь вид $p = \nu K - \sigma_0$. Если обозначить $\xi_0 = 1 - \sigma_0 / \nu K$, то $p = \xi_0 \nu K$. Аналогично для зоны опережения при $h_x = h_1$ $\xi_1 = 1 - \sigma_1 / \nu K$ и $p = \xi_1 \nu K$. Коэффициенты ξ_0 и ξ_1 называют коэффициентами натяжения.

При таких граничных условиях постоянные интегрирования будут следующими:

$$C_0 = \nu K (\xi_0 - 1 / \delta_0) h_0^{\delta_0}; \quad C_1 = \nu K (\xi_1 + 1 / \delta_1) h_1^{-\delta_1}.$$

Подставляя их в исходное уравнение, получаем известные в теории ОМД формулы Целикова для расчета нормальных напряжений на низком очаге деформации:

для зоны отставания

$$p = \frac{\nu K}{\delta_0} \left[(\xi_0 \delta_0 - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^{\delta_0} + 1 \right];$$

для зоны опережения

$$p = \frac{\nu K}{\delta_1} \left[(\xi_1 \delta_1 + 1) \left(\frac{h_x}{h_1} \right)^{\delta_1} - 1 \right]. \quad (4.6)$$

Высота h_x связана с координатой x (расстоянием до точки $x = 0$) соотношением, которое представляет собой уравнение окружности образующей валка:

$$x^2 + (a - h_x / 2)^2 = R^2,$$

где $a = R + h_1$ — расстояние между центром валка и осью образца (см. рис. 3.1).

Следует заметить, что приведенное решение задачи стало возможным при условии, что предел текучести K постоянен по длине дуги захвата. Однако при холодной прокатке происходит наклеп металла, и значение K от сечения к сечению изменяется. В.С. Смирнов сделал попытку решить эту задачу, задав степенной закон его изменения в виде

$$K_x = K_0 (h_0 / h_x)^n,$$

где n — коэффициент наклепа, зависящий только от марки металла.

Однако решение получилось очень сложным. В.С. Смирнов пришел к выводу, что результат мало искажается, если предел текучести усреднить по длине дуги захвата и считать его постоянным и равным K_{cp} :

$$K_{cp} = \frac{K_0 + K_1}{2},$$

где K_0 и K_1 — пределы текучести металла до и после прокатки, которые легко определяются по приведенным в литературе справочникам.

Формулы Целикова (4.6) показывают, что нормальное давление $p = \sigma$ по длине дуги захвата распределяется крайне неравномерно (см. рис. 4.13). К нейтральному сечению очага давление p быстро нарастает (по степенному закону) и вблизи этой точки может достигать очень больших значений. Многочисленные исследования показали, что характер изменения экспериментальных контактных напряжений полностью совпадает с теоретическим. Максимум эпюры давления совпадает с нейтральным сечением в очаге деформации. Максимальные напряжения в центре очага деформации являются основной причиной выкрошивания поверхности валков при холодной прокатке тонких листов. Такой характер изменения нормальных контактных напряжений — результат дей-

ствия подпирающих сил трения в очаге деформации. Пик напряжений сильно зависит от коэффициента трения μ . При $\mu = 0$ на протяжении всей дуги захвата давление постоянно и выглядит так: $p = K$ (следует из формул Целикова). С ростом коэффициента трения куполообразность эпюры давления резко увеличивается.

Площадь фигуры под куполом (если проинтегрировать эпюру) определяет силу прокатки:

$$P = \int p dx,$$

а среднее давление $p_{cp} = P/l$, где l — длина дуги захвата. Коэффициент подпора $n_{\sigma} = p_{cp}/K$ характеризует превышение сопротивления деформации p_{cp} над пределом текучести K за счет влияния сил трения на поверхности контакта.

Для практических расчетов p_{cp} (без натяжения) А.И. Целиков построил номограмму (рис. 4.15). По ней определяется значение коэффициента подпора n_{σ} в зависимости от обжатия $\epsilon = \Delta h/h_0$ и отношения $\delta = 2\mu/\alpha$, где α — угол захвата в радианах: $\alpha = \Delta h/R$.

Полезно проанализировать влияние других технологических факторов на эпюру давления. Уже отмечено, что с повышением коэффициента трения μ площадь купола эпюры давления на валки возрастает, поэтому n_{σ} также увеличивается (рис. 4.16, а). С увеличением длины дуги захвата $l = \sqrt{0,5\Delta h \cdot D}$ пик купола также возрастает, следовательно, среднее давление и сила прокатки увеличиваются с ростом как обжатия, так и диаметра валков (рис. 4.16, б, в). В целях уменьшения усилия прокатки полезно уменьшать диаметр рабочих валков.

При наличии переднего натяжения $\sigma_1 = \xi_1 \nu K$ часть эпюры, соответствующая зоне опережения, срезается, как показано на рис. 4.17, а (при $\xi_1 = 0,5$ и $\xi_1 = 0,2$). В сечении на выходе из очага деформации получим уменьшенное

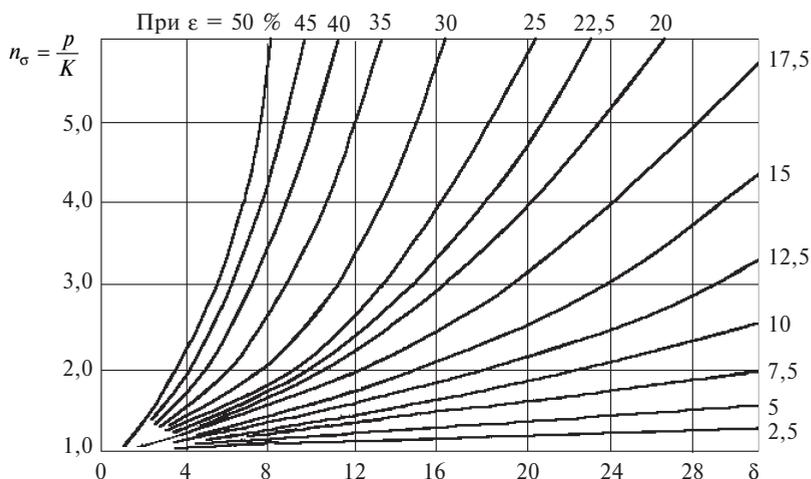


Рис. 4.15. Номограмма для определения среднего давления металла на валки на низком очаге деформации

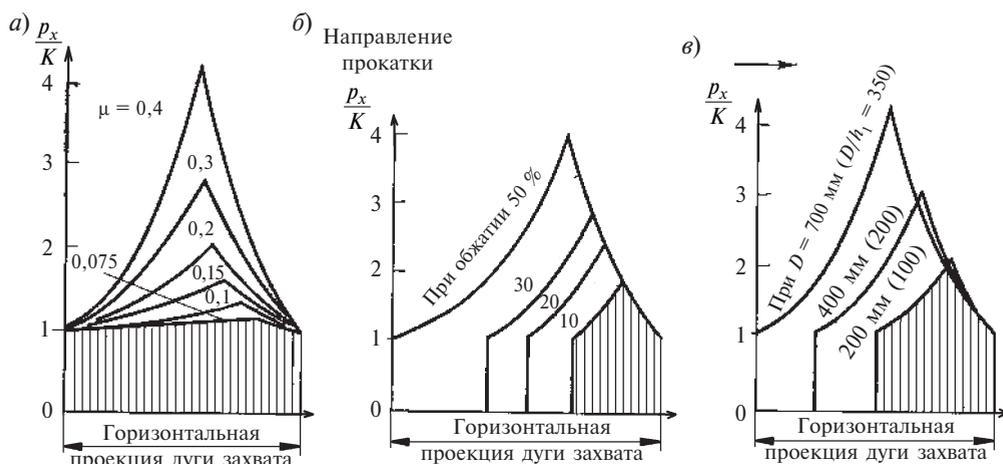


Рис. 4.16. Изменение эпюры давления металла на валки при увеличении коэффициента трения (а), длины дуги захвата за счет обжатия (б) и за счет диаметра валков (в)

давление $p = (1 - \xi_1)K$. Аналогично в зоне отставания, если прикладывается заднее натяжение $\sigma_0 = \xi_0 K$, срезается правая ветвь эпюры, и на входе в валки давление p упадет до значения $p = (1 - \xi_0)K$. При наличии переднего и заднего натяжения одновременно срезаются обе ветви, давление на валки резко снижается, уменьшается также пиковое значение давления (рис. 4.17, б). При одинаковых значениях коэффициентов натяжения $\xi_0 = \xi_1$ заднее натяжение более эффективно снижает давление, чем переднее. Это объясняется тем, что при прокатке без натяжения зона отставания больше зоны опережения, поэтому срезаемая часть левой ветви эпюры давления, относящаяся к зоне отставания, по площади больше правой.

Для учета влияния натяжения полосы на давление p вводится коэффициент натяжения $n_{\text{нат}}$, который равен 1 при отсутствии натяжения и меньше 1 при натяжении. Коэффициент $n_{\text{нат}}$ приближенно оценивают формулой

$$n_{\text{нат}} = 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2K}.$$

Эта формула предполагает, что переднее и заднее натяжения σ_0 и σ_1 одинаково воздействуют на давление на валки, но известно, что заднее натяжение снижает давление больше, чем переднее, поэтому при больших натяжениях, равных $(0,3-0,5)K$, в приведенную формулу следует ввести перед σ_1 коэффициент k , больший 1, учитывающий это различие. А.А. Королев подробно занимался этим вопросом и предложил несколько более точных теоретических формул. Например, для горячей прокатки листа на современных непрерывных станах применима формула

$$n_{\text{нат}} = \left[\left(1 - \frac{\sigma_1}{K} \right) (1 - \varepsilon) + \left(1 - \frac{\sigma_0}{K} \right) \right] \frac{1}{2 - \varepsilon}, \quad (4.7)$$

где $\varepsilon = \Delta h/h_0$.

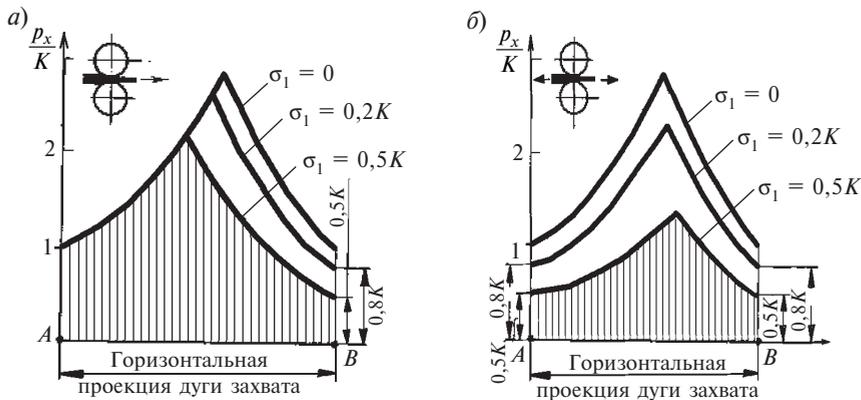


Рис. 4.17. Изменение эпюры давления металла на валки при наличии переднего (а) и совместного переднего и заднего натяжений (б)

При производстве холоднокатаного листа прокатку ведут при значительном переднем и заднем натяжении, чтобы снизить усилие прокатки, пиковое давление на валки и упругое сплющивание валков. Следует отметить, что с уменьшением давления уменьшается упругое сплющивание валков, что, в свою очередь, способствует снижению усилия прокатки.

Обобщим сказанное. При $l/h_{cp} < 1$ очаг деформации при прокатке высокий. Силы трения не влияют на характер деформации металла, коэффициент трения — это не физическая характеристика процесса, а только отношение касательных напряжений к нормальным, по всей контактной площадке действует зона прилипания, хотя можно говорить об условных зонах опережения и отставания. Все деформационные и силовые характеристики прокатки определяются неравномерностью деформации по высоте.

На средних очагах $1 < l/h_{cp} < 4$ на контакте, наряду с зонами прилипания, существуют развитые зоны скольжения. Степень их развития определяется коэффициентом трения, который для этих зон имеет вполне определенный физический смысл. В зоне прилипания по-прежнему коэффициент трения не является физической величиной. Неравномерный характер деформации в значительной мере определяется распределением сил трения на контакте, они же определяют эпюру нормальных давлений металла по длине очага деформации. Нормальные давления резче, чем на высоких очагах, возрастают к нейтральному сечению.

На низких очагах при $l/h_{cp} > 4$ на контакте полностью господствуют зоны скольжения, деформацию по высоте можно считать равномерной (хотя для оценки тонких эффектов приходится признать, что она неравномерна). Коэффициент трения — важная физическая характеристика процесса. Эпюра нормальных давлений еще резче (по экспоненте) возрастает к нейтральному сечению, создавая вблизи него большие давления. При холодной листовой и ленточной прокатке в этой точке давления достигают 2000–2500 Н/мм² (или

вертикальной линии CC , расположенной под углом γ . При рассогласовании скоростей валков на верхней контактной площадке точка, в которой скорости валков и полосы совпадают, смещается вправо относительно сечения CC в точку B , зона опережения уменьшается. На нижней площадке картина обратная, и зона опережения увеличивается; точка металла, имеющая скорость валков, смещается в противоположную сторону — в точку A . Вместо нейтрального сечения CC в середине очага деформации появляется область $ADBE$, которая по верхнему валку находится в зоне отставания, а по нижнему — в зоне опережения.

Силы трения в зоне отставания направлены по ходу прокатки, а в зоне опережения — в противоположную сторону. Если принять гипотезу плоских сечений, которая тем правдоподобней, чем ниже очаг деформации, то можно считать, что в зоне $ADBE$ силы трения верхнего и нижнего валков уравнивают друг друга. Это резко меняет характер напряженного состояния металла. На симметричном очаге деформации (см. рис. 4.13) подобный объем металла находился под действием подпирающих контактных напряжений трения, за счет этого нормальные напряжения на контакте вынуждены увеличиваться по степенному закону, достигая наибольших значений вблизи нейтрального сечения CC . При этом сила прокатки, равная площади эпюры контактного давления, также имела высокое значение. На несимметричном очаге деформации в рассматриваемой зоне подпирающие напряжения отсутствуют. В уравнении Кармана отсутствует слагаемое, зависящее от сил трения на контакте. Пик нормальных напряжений срезается, и сила прокатки уменьшается. Такой прием широко применяется при прокатке толстых и тонких листов, особенно эффективен он при холодной прокатке тонких листов, когда давление на валки особенно велико.

С увеличением рассогласования скоростей валков средняя зона $ADBE$ увеличивается, и эффект снижения давления на валки возрастает. Кривые давления перемещаются из положения 1 до положения 4 (см. рис. 4.18). Кривая 4 соответствует случаю, когда на верхнем валке весь очаг деформации находится в зоне отставания, и дальнейшее увеличение рассогласования скоростей валков приводит к пробуксовке верхнего валка. При пробуксовке сила прокатки изменяется мало, но количество энергии, подводимой в очаг деформации, возрастает значительно. Она впустую расходуется на контактное трение. При этом момент прокатки резко возрастает на верхнем и снижается на нижнем валке. Моменты на валках могут отличаться в два-пять раз. Следовательно, кривая 4 является предельным случаем. Он реализуется при рассогласовании окружных скоростей валков на 6–12 %. Сила прокатки при этом составляет 50–70 % от симметричной прокатки.

Исследования показали, что снижение давления на валки при несимметричной прокатке происходит не только за счет изменения схемы напряженного состояния металла, но и за счет изменения сил трения на контактных площадках. По этой причине эффект снижения давления различен при разных скоростях прокатки. Как известно, коэффициент трения при низких скоростях прокатки высок, при повышении скорости он сначала быстро падает и при высоких скоростях практически перестает зависеть от скорости, достигая минимальных значений. Поэтому рассогласование скоростей валков особенно эффективно при низких скоростях прокатки (0,2–5 м/с), применяемых

при прокатке листов и лент из специальных марок стали. На высокоскоростных станах эффективность рассогласования скоростей снижается и даже почти исчезает.

Следует напомнить, что с увеличением скорости прокатки смазка лучше нагнетается в очаг деформации, поэтому сила прокатки снижается независимо от рассогласования скоростей. Аналогичным образом влияет на давление качество смазки, применяемой при прокатке. Лучшие смазки обеспечивают низкий коэффициент трения, это способствует снижению силы прокатки. Но чем лучше смазка, тем меньше эффективность рассогласования скоростей.

Большое влияние на протяженность средней зоны при рассогласовании скоростей оказывает переднее и заднее натяжение полосы. Как известно, при симметричной прокатке применение натяжения снижает общее давление металла на валки, причем наибольший эффект достигается при заднем натяжении полосы. При несимметричной прокатке заднее натяжение сокращает протяженность средней зоны $ADBE$. Это снижает эффект, получаемый от рассогласования скоростей. Наоборот, переднее натяжение расширяет среднюю зону, поэтому эффект от рассогласования скоростей возрастает. Следовательно, на непрерывном стане для прокатки листа выгодно применять рассогласование скоростей валков в первой клети, когда заднее натяжение отсутствует. Высокое переднее натяжение при этом полезно. Но для второй клети это же натяжение становится задним, поэтому рассогласование скоростей валков во второй клети становится невыгодным. Но заднее натяжение эффективнее, чем переднее, снижает общее давление при симметричной прокатке, поэтому для второй клети рассогласование скоростей делать не следует. В третьей клети вновь полезно рассогласовать скорости валков. Очевидно, чередуя клети непрерывного стана с рассогласованием и без рассогласования скоростей и регулируя переднее и заднее натяжения, можно добиться наилучшего снижения суммарного давления металла на валки.

Для реализации эффекта несимметричной прокатки в последние годы предложено несколько оригинальных конструкций прокатных станов. Одной из разновидностей несимметричной прокатки является процесс прокатки—волочения (или ПВ-процесс), разработанный и изученный в Челябинском политехническом институте (рис. 4.19). Полоса охватывает два валка одинакового диаметра, вращающихся с разной скоростью, причем соотношение скоростей подчиняется условию

$$V_1/V_0 = \lambda,$$

где λ — вытяжка полосы.

Процесс возможен, если к концам полосы прикладываются соответствующие силы натяжения T_0 и T_1 . Валок со скоростью V_1 является ведущим, а второй валок — ведомым. При таком условии во всех точках на дугах охвата скорости металла и валков совпадают. В самом же очаге деформации (заштрихованном) эти скорости не совпадают. На ведущем валке скорость металла

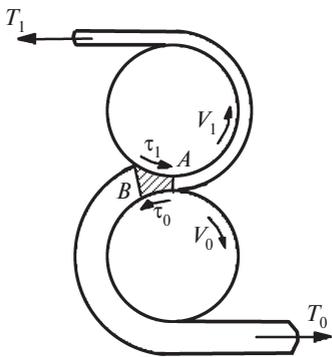


Рис. 4.19. Схема ПВ-процесса (прокатки—волочения)

возрастает от значения V_0 до V_1 , следовательно, во всех точках контакта скорость металла меньше скорости валков. На ведомом валке скорость металла больше скорости валков также во всех точках контактной площадки. Таким образом, со стороны ведущего валка металл находится полностью в зоне отставания, а на ведомом — полностью в зоне опережения. Соответственно, напряжения контактного трения τ направлены в разные стороны, как показано на рисунке.

Силовая картина в очаге деформации будет такой же, как и при несимметричной прокатке. Силы трения τ на верхней и нижней контактных площадках взаимно уравновешиваются, поэтому очаг деформации не испытывает продольных подпирющих напряжений. Нормальные контактные напряжения и сила прокатки ниже, чем при обычной прокатке. Чем меньше толщина полосы, тем выше эффект снижения силы прокатки, поэтому ПВ-процесс более всего используется для тонких листов и лент, когда сила прокатки в 1,5–3,0 раза ниже, чем при обычной прокатке.

В рассматриваемом процессе отсутствуют подпирющие напряжения, поэтому он становится нечувствительным к колебанию сил трения на контакте. Он не реагирует также на колебания коэффициента трения в очаге. Толщина полосы по длине остается постоянной при изменении условий трения в очаге деформации, например при изменении свойств смазки или условий ее подачи.

Большое влияние на ПВ-процесс оказывают резервные силы трения, возникающие на дугах охвата полосой верхнего и нижнего валков. За счет них процесс способен сам себя автоматически регулировать. Если по каким-то причинам условие $V_1/V_0 = \lambda$ не выполняется, то на дугах охвата имеется достаточный резерв сил трения, чтобы процесс вернуть в исходное состояние и выполнить это условие. Если случайно увеличится сила натяжения T_1 (в небольших пределах), то появится тенденция к проскальзыванию на ведущем валке. Но скольжения не произойдет, так как за счет резервных сил трения на верхнем валке эта тенденция будет погашена. На очаг деформации будет действовать прежнее растягивающее напряжение T_1 , и вытяжка возвратится к прежнему значению. Одна и та же вытяжка достигается при достаточно широком изменении натяжений T_1 и T_0 . Отпадает необходимость в очень точной настройке стана.

По той же причине процесс нечувствителен к колебаниям исходной толщины полосы. Если толщина полосы по длине колеблется, то при прокатке утолщенного участка обжатие увеличится. Это вызовет тенденцию к увеличению вытяжки λ , но она не увеличится, так как этого не допустят резервные силы трения. Вытяжка и обжатие по длине полосы будут постоянными. После прокатки полоса становится более ровной, чем до прокатки. Это используют для выравнивания толщины листа при прокатке.

Способность к саморегулированию возрастает с уменьшением жесткости клетки. Жесткостью клетки называется отношение изменения расстояния между валками при изменении силы прокатки:

$$M_k = \frac{dP}{dh}.$$

На жестких клетях разнотолщинность dh ведет к большему изменению силы dP , чем на мягких. Поэтому быстрее может быть превышен резерв сил трения на дугах охвата, за счет которых осуществляется саморегулирование процесса.

ПВ-процесс имеет ряд недостатков. Вытяжка λ ограничена предельно допустимым передним тянущим усилием T_1 , которое не может приближаться по напряжениям $\sigma_1 = T_1/F_1$ к пределу текучести металла σ_{s1} во избежание разрыва полосы (F_1 — площадь поперечного сечения полосы на выходе). Повышенное контактное скольжение в очаге деформации также нежелательно, так как ведет к различным дефектам полосы в виде царапин, при этом валки интенсивно изнашиваются и разогреваются, что также отрицательно влияет на качество полосы.

Несмотря на снижение силы прокатки, для реализации ПВ-процесса требуется больше энергии на одинаковую деформацию, чем при обычной прокатке, так как значительная часть энергии расходуется на поддержание резервных сил трения на дугах охвата. К ведущему валку подводится гораздо больше энергии, чем к ведомому. Указанные недостатки не позволяют широко внедрить ПВ-процесс в технологию прокатки тонких листов и лент. Однако в мире действует уже много прокатных станов, использующих идею ПВ-прокатки, построено несколько оригинальных конструкций станов, и в этом направлении продолжает появляться много патентов.

4.5. Упругое сплющивание валков

На низких очагах на описанную картину напряжений и деформаций накладывается еще один процесс — упругое сплющивание валков. На высоких и средних очагах при горячей прокатке упругое сплющивание пренебрежимо мало, но при горячей прокатке листов тоньше 2 мм и всегда при холодной прокатке оно становится существенным, а при дрессировке листа и холодной прокатке тонких листов и лент, когда очаг деформации становится сверхнизким, — определяющим процессом.

На рис. 4.20 приведен сплющенный валок при прокатке (пунктиром показана цилиндрическая поверхность валка без сплющивания). Видно, что в результате сплющивания длина дуги контакта увеличивается на величину x . С учетом сплющивания длину дуги захвата рассчитывают по формуле

$$l_c = x + \sqrt{R\Delta h + x^2}, \quad (4.8)$$

которая при $x = 0$ превращается в известную формулу $l = \sqrt{R\Delta h}$.

По экспериментальным данным А.А. Королева при прокатке тонких полос и лент приращение дуги захвата за счет

сплющивания $\left(\frac{l_c - l}{l} 100\%\right)$ может достигать 30–60%, а по данным Е.С. Рокотяна — даже 100%.

Для вычисления значения x пользуются формулой Хичкока

$$x = \frac{8(1 - m^2)}{\pi E} R p_{cp}, \quad (4.9)$$

где E — модуль упругости валков; m — коэффициент Пуассона материала валков.

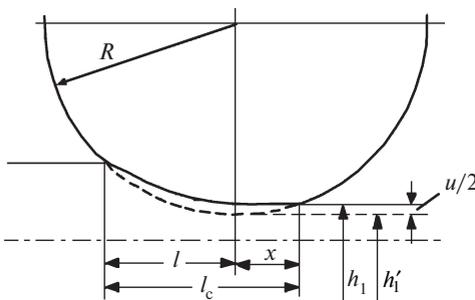


Рис. 4.20. Сплющивание валка при прокатке

Для стальных валков $E = 2,2 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ и $m = 0,3$, поэтому

$$x = \frac{p_{\text{ср}} R}{95000}$$

($p_{\text{ср}}$ имеет размерность Н/мм^2).

По формуле Хичкока для вычисления l_c необходимо знать $p_{\text{ср}}$, которое можно определить только после вычисления l_c . Используют итерационную схему расчета l_c : сначала вычисляют l без учета сплющивания (по формуле (4.8) при $x = 0$), затем рассчитывают $p_{\text{ср}}$ (например, по методике Целикова), затем x (по формуле (4.9)) и l_c с учетом сплющивания (по формуле (4.8)). Полученное значение l_c используется для пересчета $p_{\text{ср}}$ и уточнения значения l_c . Цикл расчета можно повторять до тех пор, пока старое значение l_c не совпадет с полученным. Обычно после двух-трех итераций достигается совпадение с приемлемой точностью, поэтому такой расчет легко осуществить даже вручную, хотя, конечно, лучше написать программу для расчета l_c на ЭВМ. Но бывают случаи, когда итерационный процесс расходится, это значит, что формулой Хичкока пользоваться нельзя, следует применять иную методику. Вероятно, это свидетельствует о том, что очаг деформации является свержнизким, и закономерности деформации в нем иные, чем на низком очаге.

Рост длины дуги захвата увеличивает силу, действующую со стороны металла на валки, так как в выражении для силы прокатки $P = p_{\text{ср}} b l_c$ увеличивается не только l , но и среднее давление $p_{\text{ср}}$.

Чтобы уменьшить упругое сплющивание, необходимо уменьшать диаметр рабочего валка $2R$, снижать давление на валки $p_{\text{ср}}$ за счет использования лучшей смазки, полировки валков, применения валков большей твердости (например, из карбидов вольфрама). Кстати, при уменьшении диаметра валков уменьшается не только значение длины дуги захвата l_c , но и среднее давление $p_{\text{ср}}$.

При сплющивании валков высота полосы h_1 после прокатки больше высоты h'_1 без учета сплющивания на величину u :

$$h_1 = h'_1 + u.$$

Для определения значения u многие исследователи решали довольно сложную задачу упругой деформации валков, но какой-либо приемлемой формулы для простого расчета не получили. Существуют несколько методик расчета u на ЭВМ. Однако более важны практические выводы, полученные при таких расчетах. Первый и основной состоит в том, что значение u определяется твердостью материала полосы и валков, величиной обжатия, коэффициентом трения и рядом других факторов. Главным из них является отношение диаметра валков к толщине полосы $2R/h$. Чем больше отношение $2R/h$, т. е. чем тоньше полоса и больше диаметр валков, тем больше упругое сплющивание u . При некотором отношении $2R/h$ упругое сплющивание u становится равным исходной толщине полосы h_0 , и прокатка полосы становится невозможной. На стальных валках такие условия наступают примерно при отношениях $2R/h = 1000-2000$. Например, на стане с валками диаметром 20–50 мм прокатывают стальную ленту толщиной около 20 мкм. Чтобы прокатывать более тонкие ленты, необходимо уменьшать диаметр валков. Для прокатки микронных лент (3–5 мкм и меньше) требуются валки диаметром 3–5 мм.

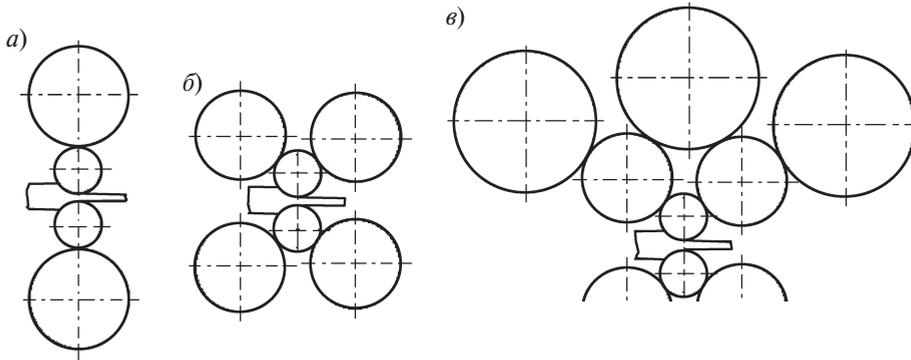


Рис. 4.21. Типы станов, применяемых для прокатки тонких полос:
a — 4-валковый (кварто); *б* — 6-валковый; *в* — 12-валковый

Прочность и жесткость малых по диаметру валков обеспечивается системой опорных валков, воспринимающих прогиб рабочих валков. Для производства сравнительно толстых листов и лент применяют 4-валковые станы с одной парой опорных валков (рис. 4.21, *a*). Для более тонких полос для повышения жесткости валковой системы используют 6-валковые станы, на которых каждый рабочий валок подпирается двумя опорными валками (рис. 4.21, *б*). Если над этими опорными валками поместить по три более крупных опорных валка, то получим более жесткий 12-валковый стан (рис. 4.21, *в*). Более распространены 20-валковые станы, которые имеют дополнительные верхний и нижний ряды из четырех опорных валков. Существует 36-валковый лабораторный стан, имеющий рабочие валки диаметром 1,5 мм, на котором можно прокатывать ленту толщиной 0,5 мкм и выше.

4.6. Сверхнизкие очаги деформации

Сверхнизкий очаг деформации — это самостоятельный вид очага деформации наряду с высоким, средним и низким. Он также имеет свои, только ему присущие особенности. Характер напряженно-деформированного состояния полосы в нем полностью определяется упругим сплющиванием валков. Такой очаг деформации реализуется при прокатке тонких полос в валках, поджатых друг к другу с усилием, превышающим ожидаемое усилие прокатки. Он образуется также при холодной прокатке фольг, поэтому его называют еще и фольговым.

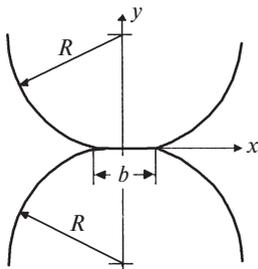


Рис. 4.22. Задача Герца об упругом сжатии двух цилиндров

Чтобы понять особенности сверхнизкого очага деформации, вспомним задачу Герца об упругом сжатии двух цилиндров, которая рассматривалась в курсе “Теория упругости и пластичности” (рис. 4.22). В результате сжатия двух цилиндров образуется контактная площадка смятия шириной b . Во вращающихся цилиндрах эта площадка не будет симметричной относительно вер-

тикали, проходящей через центры валков: на выходе из валков протяженность площадки смятия меньше, чем на входе, точка приложения равнодействующей силы сжатия сдвинута в сторону сечения входа. Но результаты, полученные в задаче Герца, принципиально применимы и к вращающимся валкам.

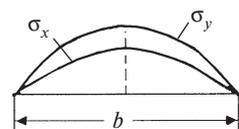


Рис. 4.23. Напряжения на контактной площадке

Воспользуемся ее решением в части распределения нормальных σ_y и тангенциальных напряжений σ_x на площадке смятия (рис. 4.23) (напряжения σ_x для удобства также отложены в направлении оси y). Нормальные и тангенциальные напряжения являются напряжениями сжатия, которые по параболическому закону возрастают к средней точке площадки. Разность этих напряжений ($\sigma_y - \sigma_x$) не достигает предела текучести материала валков νK_B , поэтому по условию Треска валки находятся в упругом состоянии, хотя сами напряжения σ_y и σ_x достигают огромных значений.

Будем рассматривать задачу Герца на поджатых вращающихся валках как предельный случай прокатки полосы, толщина которой близка к 0. В силу применимости гипотезы плоских сечений напряжения σ_y и σ_x действуют по всей толщине полосы. И если на контактной площадке нигде разность напряжений ($\sigma_y - \sigma_x$) не достигает предела текучести металла полосы νK_{II} , то ничего не изменится: полоса будет находиться в упругом состоянии, при прокатке не получит пластической деформации и выйдет из валков с первоначальными размерами, эпюры напряжений сохранят прежний вид (см. рис. 4.23). Но если в каких-то точках эпюры напряжений выполняется равенство $(\sigma_y - \sigma_x) = \nu K_{II}$, то появится пластическая зона.

Очаг деформации в общем случае состоит из трех участков (рис. 4.24, а). Два крайних по-прежнему будут находиться под действием упругих деформаций (заштрихованы), но на среднем участке осуществляется пластическая деформация. (Для металла валков условие текучести по-прежнему не выполняется.) При очень малых толщинах полосы и небольшом поджатии валков весь очаг деформации занят упругими зонами, полоса при прокатке не изменяет свои размеры. С увеличением толщины полосы или уменьшением поджатия валков появляется пластическая зона. Обжатия полосы при прокатке в таком очаге малы, иногда для ощутимого изменения толщины требуется 100 и более пропусков. При дальнейшем увеличении толщины полосы пластическая зона увеличивается, а протяженность упругих участков снижается. И когда упругие зоны исчезнут или будут пренебрежимо малы по сравнению с пластической зоной, очаг деформации перестанет быть сверхнизким и перейдет в разряд низких. Видимо, варьируя толщиной полосы и усилием поджатия валков, можно изменять границу перехода сверхнизких очагов в низкие. Сверхнизкий очаг может образоваться также при отсутствии предварительного поджатия валков при прокатке очень тонких полос.

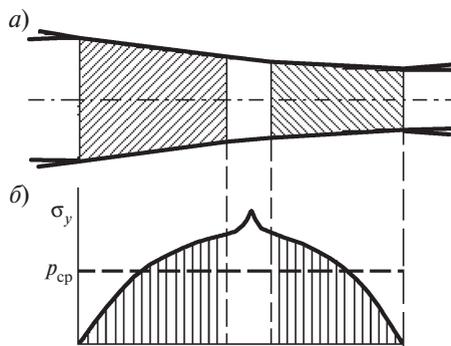


Рис. 4.24. Сверхнизкий очаг деформации (а) и эпюра давления (б)

Участок пластической деформации в сверхнизком очаге находится в середине очага в состоянии трехстороннего сжатия за счет напряжений σ_y и σ_x , развивающихся в упругих зонах (третье напряжение σ_z также сжимающее). Это очень большие по значениям напряжения, что способствует повышению пластичности металла. В состоянии трехстороннего сжатия даже традиционно хрупкие материалы становятся пластичными. Например, только на сверхнизком очаге деформации удается прокатывать в холодном состоянии бериллиевую фольгу. При прокатке в неподжатых валках (в условиях низких очагов) бериллий разрушается сразу же, почти при нулевой степени деформации. На сверхнизком очаге за большое число пропусков можно получить значительную суммарную деформацию без разрушения.

Чтобы увеличить обжатие за один проход на сверхнизком очаге деформации, необходимо увеличивать протяженность как пластической, так и упругих зон. Можно увеличить диаметр валков. Этому также способствуют невысокие значения твердости валков. Эти рекомендации используют на дрессировочных и фольгопрокатных станах. На низких очагах, наоборот, мы стремились уменьшать диаметр рабочих валков и увеличивать их твердость, чтобы снизить упругое сплющивание валков. Это еще раз свидетельствует о том, что сверхнизкий очаг деформации — это самостоятельный вид очагов деформации, а не разновидность низкого очага.

Металл, находящийся в пластической зоне, деформируется на сверхнизком очаге по-иному, чем на низком. На низком очаге при прокатке широких полос металл испытывает сильное сопротивление поперечному течению за счет развитых сил трения в этом направлении. Сопротивление течению в длину гораздо меньше, так как длина дуги контакта мала и силы трения в направлении длины не столь велики. Весь смещенный по высоте металл устремляется в длину, уширение практически равно 0. Только узкие участки по кромкам широкой полосы имеют тенденцию к уширению, но за счет связи с остальной частью полосы и эта часть металла полностью увлекается в направлении длины. Кстати, появляющиеся при этом растягивающие напряжения служат причиной разрушения на кромках листов и лент из некоторых марок стали.

На сверхнизких полосах сопротивление течению в поперечном направлении, создаваемое напряжением σ_z , соизмеримо с сопротивлением, создаваемым напряжениями по длине σ_x . В таких условиях значительная доля высотного смещенного объема устремится в ширину, уширение металла не равно 0, а показатель уширения A может достигать больших значений. Наблюдались случаи, когда $\sigma_z < \sigma_x$, и доля смещенного высотного объема металла, устремляющаяся в ширину, становилась больше доли, идущей на приращение длины: $A > 1 - A$. При прокатке в поджатых валках иногда полоса наращивает ширину быстрее, чем длину. Ни на одном из рассмотренных ранее очагов деформации такое явление невозможно.

Рассмотрим эпюру нормальных напряжений, т. е. давления на валки, в сверхнизком очаге (рис. 4.24, б). На упругих участках нормальные напряжения будут возрастать по параболе, как в решении задачи Герца. Но в пластической зоне напряжения должны быть меньше, чем по Герцу. Для реализации упругих напряжений металлу пришлось бы затратить больше энергии, чем в случае пластической деформации. Сам факт появления пластической зоны

внутри очага деформации с энергетических позиций свидетельствует о выгоде этого процесса. За счет снижения напряжений в пластической зоне (по сравнению с упругими напряжениями по Герцу) происходит общее снижение энергоемкости всего очага деформации.

Некоторые авторы считают, что в пластической зоне должно происходить резкое возрастание напряжений по степенному закону, который наблюдается в зонах скольжения металла относительно поверхности валков на низком очаге деформации (решение Целикова, показанное на рис. 4.24, б). Однако это, видимо, не соответствует действительности, поскольку в пластической зоне сверхнизкого очага скольжение полностью отсутствует. На таком очаге в пластической области резкого возрастания давления, как при скольжении, ожидать не следует. Это очередное отличие его от низкого очага. Но даже если бы эпюра напряжений имела вид купола, как на низком очаге, то добавленный купол в середине очага мало изменил бы площадь эпюры напряжений в целом: она осталась бы примерно такой же, как в решении Герца. Сила P , равная площади эпюры напряжений, и давление $p_{\text{ср}}$ на поджатых валках остаются неизменными как при прокатке полосы, так и при отсутствии полосы в валках. Если под нажимные винты стана установить месдозы, то показания их не будут изменяться при прокатке полосы и в паузах между пропусками. Этот факт широко известен на фольгопрокатных станах. Сила прокатки всегда постоянна и равна усилию предварительного поджатия валков. Это еще одна характерная особенность сверхнизкого очага деформации.

Такой эффект используют при прокатке тонких и очень широких алюминиевых листов и фольг для борьбы с продольной и поперечной разнотолщинностью полосы. Его используют также при холодной прокатке стальных листов на заключительной операции, которая называется дрессировкой. При дрессировке, т. е. при прокатке с малыми обжатиями на предварительно поджатых валках, удается выровнять толщину полосы по длине за счет того, что продольные колебания толщины исходной полосы никак не отражаются на усилиях дрессировки. Выходящая из валков полоса по всей длине будет иметь постоянную толщину.

4.7. Уширение при прокатке

Наиболее полное исследование механизма уширения при прокатке произведено А.И. Гришковым, который глубоко проанализировал существующие теоретические и экспериментальные данные и методы расчета уширения.

Очевидно, наибольший интерес представляет уширение на средних очагах деформации применительно к технологическим процессам прокатки на сортовых станах. На низких очагах, реализующихся на тонколистовых станах, уширение практически равно 0 и не рассчитывается. На высоких очагах, в связи с образованием двойной бочки, уширение приконтактных и средних по высоте слоев различно и изучается отдельно, кроме того, на блюмингах и слябингах уширение следует рассчитывать не столь точно, как на сортовых станах. Уширение на сверхнизком очаге, как показано, процесс сложный и требует отдельного исследования.

Кстати, в технологических процессах, реализующих средние или высокие очаги деформации, как правило, уширение нежелательно. Необходимо как

можно больше металла направить в вытяжку, интенсифицируя процесс, пытаясь за меньшее число пропусков получить конечную площадь поперечного сечения готового проката. На деформацию металла, ушедшего на уширение, необходимо затрачивать дополнительную энергию. Во многих случаях, однако, уширение становится полезным.

П.И. Полухиным установлено, что в создании уширения при прокатке на средних очагах задействованы два механизма. С одной стороны, металл при прокатке скользит относительно валков в поперечном направлении, с другой стороны, металл выходит на боковую поверхность из центральных слоев. Чем меньше коэффициент трения, тем больше металла перемещается в ширину за счет первого механизма. Экспериментально показано, что в этом направлении скольжение осуществляется не по всей ширине контакта, а только в прикромочных областях за пределами зоны прилипания (рис. 4.25). На контактной поверхности уширение за счет скольжения занимает незначительную долю (до 10%). Основное уширение, особенно при горячей прокатке, осуществляется при заторможенном поперечном скольжении по второму механизму — за счет выхода боковой поверхности металла на контактную поверхность.

Поэтапная картина формирования уширения (рис. 4.26) демонстрирует, что значительная часть уширения по мере заполнения очага деформации реализуется за счет второго механизма. Если считать, что все уширение формируется только за счет выхода боковой поверхности на контактную площадку, то теоретически можно показать, что ширина b образца по длине очага деформации будет нарастать по экспоненте (см. рис. 4.25). Е.Ф. Шарапин экспериментально наблюдал экспоненциальный закон увеличения ширины на средних очагах, который он описал зависимостью

$$b = b_0 e^{C\varphi(h_x)},$$

где $C = \frac{\ln \beta}{1 - \eta}$; $\varphi(h_x) = h_1 \frac{h_0 - h_x}{h_0 h_x}$; h_x — текущее

значение высоты по очагу.

Видно, что уширение интенсивно нарастает в начале очага деформации, а в зоне опережения, когда высота h_x уже изменяется мало, им можно пренебречь. Изменение уширения по экспоненте может служить косвенным доказательством утверждения, что основную долю в формировании уширения занимает второй механизм.

Выделим в очаге деформации узкую полоску металла шириной dx (см. рис. 4.25) на расстоянии x от сечения выхода и проследим ее

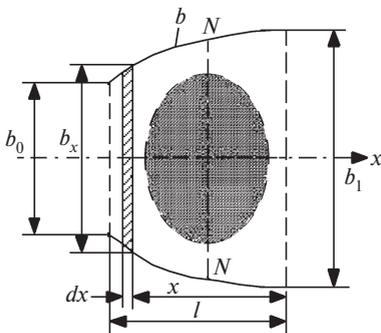


Рис. 4.25. Очаг деформации (вид сверху)

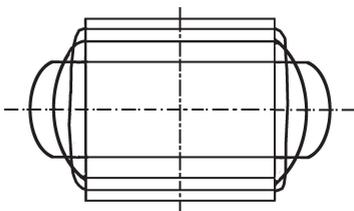


Рис. 4.26. Формирование ширины за счет выхода боковых объемов металла на поверхность контакта (вид с торца)

уширение при прохождении через очаг деформации. Оценкой уширения служит показатель A_x — отношение смещенных объемов по ширине и высоте:

$$A_x = \frac{\frac{db_x}{b_x}}{\frac{dh_x}{h_x}}.$$

Если положить, что показатель A_x неизменен по длине дуги захвата, т. е. $A = \text{const}$, то, интегрируя от входного до некоторого промежуточного сечения с координатой x , получим

$$\int_x^l db_x / b_x = A \int_x^l dh_x / h_x$$

или $\ln \frac{b_x}{b_0} = A \ln \frac{h_x}{h_0}$. Если закономерность изменения по очагу функции $\ln \frac{h_0}{h_x}$ обозначить $\phi(h_x)$, то получим

$$b_x = b_0 e^{A\phi(h_x)}.$$

Получена та же экспоненциальная закономерность изменения уширения, которая наблюдалась в экспериментах Е.Ф. Шарапина. Это служит доказательством того, что показатель уширения A действительно постоянен по длине дуги захвата. В многочисленных экспериментах, проведенных прежде всего учеными Уральского политехнического института под руководством И.Я. Тарновского, было показано, что на средних очагах деформации в широком интервале изменения технологических параметров прокатки показатель уширения A остается постоянным по длине дуги захвата.

Этот результат дал мощный толчок для теоретического изучения показателя A в зависимости от технологических параметров прокатки. Как правило, эти исследования проводились вариационными методами, в основе которых лежит закон минимума энергии, затрачиваемой на деформацию: истинное значение показателя A устанавливается в соответствии с минимумом энергии внутренних и внешних сил (напряжений), действующих на очаг деформации в целом. Однако подсчет энергии этих сил оказывается сложным и очень приближенным. Кроме того, чисто математические трудности решения вариационной задачи, преодолеваемые за счет упрощения и, следовательно, за счет искажения задачи, делают результаты сложными и в ряде случаев ненадежными. Вариационные методы дали большое число формул для расчета уширения при прокатке, хотя они всегда громоздки и обычно используются в виде номограмм или компьютерных алгоритмов.

Для практических целей вполне пригодной оказалась схема деления очага деформации на зоны, как это делалось при осадке, линиями, исходящими из угловых точек A и B под углом 45° к периметру (рис. 4.27). Если очаг деформации широкий ($b_{cp} > l$), то можно принять, что объем металла, смещаемый в ширину, будет пропорционален площади треугольника ABD , а смещаемый в длину — площади трапеции $ADDA$ (зоны I и II соответственно). На узком

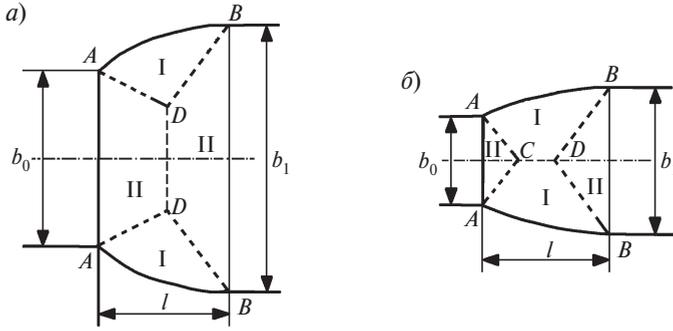


Рис. 4.27. Деление очага деформации на зоны преимущественного течения в длину и ширину на широком (а) и узком (б) очаге

очаге деформации ($b_{cp} < l$) (см. рис. 4.27, б) соотношение между зонами I и II меняется. Такая картина дает качественное представление о характере течения металла по ширине и длине образца.

Конечно, как и при осадке, это не означает, что металл из зоны ABD (см. рис. 4.27, а) устремляется только в ширину, а из второй зоны — только в длину. При осадке было показано, что площади этих зон связаны с энергией деформации металла в поперечном и продольном направлении и косвенно характеризуют поперечный и продольный смещенные объемы металла. При прокатке картина деформации сложнее, чем при осадке. Здесь имеются внешние зоны (“жесткие концы”, по И.М. Павлову), которые выравнивают деформацию по ширине полосы. Отметим, что прикромочные растягивающие напряжения вблизи точек A и B — задние σ_A и передние σ_B — уменьшают уширение, поскольку способствуют течению металла в продольном направлении (рис. 4.28). По мере удаления от точек A и B влияние внешних зон затухает по длине и ширине очага. Аналогичным образом действуют на уширение переднее σ_1 и заднее σ_0 натяжения при непрерывной прокатке, они также создают растягивающие напряжения по всей ширине полосы. При наличии переднего и заднего натяжения, а также под действием внешних зон площадь ABD сокращается.

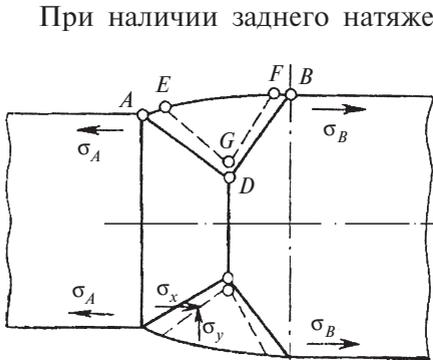


Рис. 4.28. Сокращение зон преимущественного течения металла в ширину под действием натяжения и внешних зон

При наличии заднего натяжения уширение уменьшается весьма значительно, но совсем немного — в зависимости от переднего натяжения. Это объясняется тем, что основной процесс уширения проходит в зоне отставания. При непрерывной прокатке заднее натяжение может колебаться, поэтому ширина полосы будет непостоянной по длине. Колебания переднего натяжения не столь опасны. Чтобы стабилизировать ширину полосы при непрерывной прокатке, необходимо стабилизировать натяжение между клетями.

Несмотря на то что зоны преимущественного течения лишь качественно ха-

рактизует соотношение между поперечной и продольной деформациями, эта схема широко используется для теоретического вывода формул уширения при прокатке. С.И. Губкин, Б.П. Бахтинов, а затем А.И. Целиков и А.И. Гришков показали, что получаемые при этом формулы правильно отражают основные зависимости уширения от различных технологических факторов и могут быть пригодны для технологических расчетов.

Итак, условно полагают, что металл из зоны ABD (см. рис. 4.27, a) деформируется только в направлении ширины. На расстоянии x от сечения выхода выделяют полоску металла шириной dx (рис. 4.29) и оценивают ее уширение. При перемещении по очагу деформации сечения ac , находящегося на расстоянии $(x + dx)$ от плоскости выхода, на величину dx элементарный объем, смещаемый в ширину, пропорционален части выделенного элемента, находящегося в зоне ABD . Далее, приравнявая продольные σ_x и поперечные σ_y напряжения на границе водораздела AD и записывая уравнение равновесия элемента du на ось y (направленную по ширине полосы), получают уравнение типа $db_x = f(x)$. Затем, интегрируя его по всей длине дуги захвата (по координате x), получают окончательное уравнение. Все математические преобразования можно посмотреть в книге [1]. Важнее запомнить, что в конечном итоге получится выражение для вычисления уширения Δb вида

$$\Delta b = \left(\sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) f \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right).$$

Эта общая формула для вычисления уширения при прокатке, полученная из анализа зон преимущественного течения.

Если принять

$$f \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right) = \mu \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right),$$

то получится формула Губкина. Гришков предложил считать $f \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right) = 0,54 \times$

$\times \ln \frac{h_0}{h_1}$, в формуле Бахтинова $f \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right) = \frac{1,15 \cdot \Delta h}{2h_0}$.

После соответствующих допущений и упрощений, справедливых для каких-то частных случаев прокатки, можно получить множество других формул. Всего для расчета уширения предложено более 100 формул, поэтому при пользовании ими необходимо знать, для каких условий прокатки они выведены.

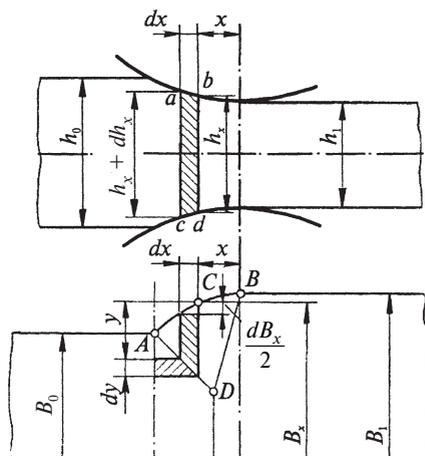


Рис. 4.29. Схема к выводу формулы уширения при прокатке

Приведенная выше общая формула уширения пригодна для анализа уширения на среднем очаге деформации. Видно, что с ростом диаметра валков и коэффициента трения уширение растёт. С ростом абсолютного обжатия Δh уширение изменяется неоднозначно, так как с ростом обжатия, по закону наименьшего периметра, быстрее растёт большая из двух зон преимущественного течения. Если очаг деформации широкий ($b_{cp}/l > 1$) (см. рис. 4.27, а), то зона II больше зоны I, поэтому с ростом обжатия Δh показатель уширения A будет падать. На узких очагах деформации при $b_{cp}/l < 1$ (рис. 4.27, б) с ростом обжатия показатель A возрастает. Для оценки изменения абсолютного уширения Δb от обжатия Δh необходимо воспользоваться приближенным равенством

$$A = \frac{h_1}{b_0} \frac{\Delta b}{\Delta h}, \text{ откуда могут получиться всевозможные зависимости } \Delta b = f(\Delta h).$$

Вывод общей формулы осуществлен без учета влияния на уширение внешних зон и заднего натяжения (если считать, что переднее натяжение не влияет на уширение). Поэтому окончательная формула уширения должна иметь вид

$$\Delta b = C_b C_n \left(\sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) f \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right), \quad (4.10)$$

где два введенных коэффициента будут учитывать влияние на уширение упомянутых факторов.

Для приближенного учета влияния заднего натяжения достаточно точна формула Калинина

$$C_n = 1 - \frac{2\sigma_0}{K}.$$

Коэффициент влияния внешних зон C_b по экспериментальным данным зависит как от ширины очага деформации (фактора b_0/l), так и от обжатия $\varepsilon = \Delta h/h_0$ (рис. 4.30, а). На узких очагах ($b_0/l < 1$) коэффициент C_b возрастает, а на широких ($b_0/l > 1$) падает. Для его расчета А.И. Гришковым предложена формула

$$C_b = 4(1 - \varepsilon)(b_0/l - 0,15)e^{1,5(0,15 - b_0/l)} + \varepsilon.$$

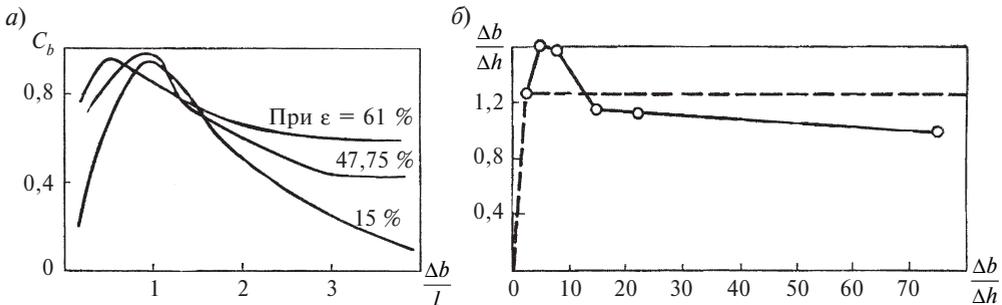


Рис. 4.30. Экспериментальные данные по влиянию ширины полосы на уширение при прокатке в зависимости от фактора b_0/l (а) и параметра $\Delta h/h_0$ (б)

На основании экспериментальных данных Ю.М. Чижикова, П.И. Полухина и др. (рис. 4.30, б) В.С. Смирнов установил, что влияние ширины полосы на уширение может быть учтено проще. Коэффициент C_b можно вычислять по формуле

$$C_b = \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^v,$$

где показатель степени v зависит от ширины полосы. При $b_0/h_0 < 1$ уширение почти прямолинейно возрастает с ростом отношения b_0/h_0 , поэтому $v = 1$, а при $b_0/h_0 > 1$ уширение практически перестает зависеть от ширины полосы во всем диапазоне средних очагов деформации, поэтому $v = 0$. Б.П. Бахтинов также считает, что для расчета уширения при горячей прокатке простых профилей на сортовых станах, когда ширина и высота полосы отличаются незначительно, можно положить $C_b = 1$ (т. е. $v = 0$).

Более строгие исследования показали, что фактором, учитывающим влияние ширины полосы на уширение, следует считать не отношение b_0/h_0 , а отношение b_0/l , где l — длина дуги захвата, поэтому поправка В.С. Смирнова является приближенной, хотя практически вполне приемлемой и удобной.

Глава 5

СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОКАТКИ

5.1. Распределение контактных напряжений по ширине полосы

При прокатке узких и средних по ширине полос напряжения непостоянны по ширине, они отличны от средних также на краях широких полос. На металл, находящийся в рамках геометрического очага деформации, оказывают влияние внешние зоны, находящиеся за его пределами. Строго говоря, для того чтобы определить характер распределения деформаций и напряжений по ширине полосы, необходимо решить трехмерную задачу о прокатке. Обычно решают такую задачу для прокатки низкой полосы, когда зона скольжения занимает всю контактную площадку, а напряжения равномерно распределяются по высоте полосы (гипотеза плоских сечений). При этом вектор касательного контактного напряжения τ имеет проекции на оси x и z , пропорциональные составляющим V_x и V_z вектора скорости V перемещения металла относительно поверхности вала:

$$\tau_x = \tau \frac{V_x}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} \quad \text{и} \quad \tau_z = \tau \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}}.$$

Задача решается обычно вариационными методами со многими допущениями, настолько существенными, что доверие к результатам снижается, и качество получаемого решения может быть оценено только путем многосторон-

него сравнения с экспериментальными данными. В связи с этим предпочитают накапливать экспериментальный материал. А.И. Целиков [1] осуществил полный анализ существующих экспериментальных данных и сделал важные для теории ОМД выводы. Рассмотрим их подробнее.

Известно, что внешние зоны выравнивают деформацию полосы по ее ширине. Причиной тому являются те дополнительные напряжения, которые возникают в очаге деформации в результате его взаимодействия с внешними зонами.

Основопологающей для построения напряженно-деформационной картины очага деформации является правильная модель скоростей течения металла внутри и за пределами очага. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что направление сил трения вблизи кромок иное, чем на средних по ширине участках, что является следствием растягивающих напряжений со стороны внешних зон. На кромках с убывающей интенсивностью по длине дуги захвата происходит течение металла в сторону ширины (уширение). Продольная составляющая скорости металла по очагу деформации всегда нарастает, вплоть до сечения выхода, но под действием уширения на кромках скорость нарастания замедляется. По мере удаления от кромок к середине продольная скорость возрастает быстрее, так как количество металла на уширение сокращается.

Рассмотрим часть очага деформации, расположенную вблизи сечения выхода. На узких полосах нарастание продольной скорости происходит до середины ширины полосы (рис. 5.1, а). На широких полосах нарастание скорости происходит только на кромках (рис. 5.1, б). К ним прилегают зоны, компенсирующие скорости течения в предыдущих зонах. Здесь продольные скорости течения металла несколько снижаются. При дальнейшем движении к середине полосы они остаются постоянными. В сечении входа скорости должны изменяться обратным образом, чтобы обеспечить одинаковый расход металла во всех сечениях очага деформации. На узких полосах возрастание скорости внутри очага и убывание ее в сечении входа происходит до самой середины (см. рис. 5.1, а). На широких полосах на среднюю часть полосы воздействие

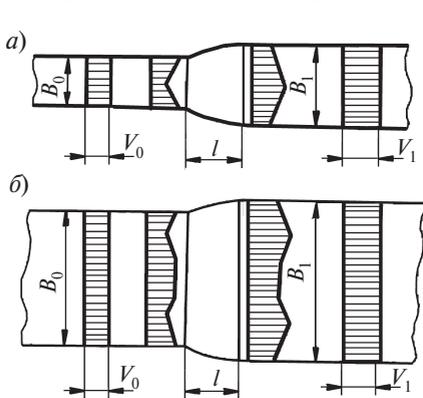


Рис. 5.1. Эпюры распределения по ширине полосы скоростей течения металла на узком (а) и широком (б) очагах деформации

внешних зон постоянно, здесь скорости по ширине не меняются. В связи с этим развитие взаимодействие между объемами металла на кромках и в прикромочных зонах. Рост скорости на кромках компенсируется падением ее в прикромочной области (см. рис. 5.1, б).

На некотором расстоянии от геометрического очага деформации влево и вправо под действием внешних зон во всех случаях продольные скорости V_0 и V_1 по ширине выравниваются.

В соответствии с описанной картиной аналогичным образом изменяются продольные напряжения σ_x по ширине полосы. На узком очаге (рис. 5.2, а) на кромках полосы в сечении входа возникают растягивающие напряжения, и соответственно им уравнове-

шивают сжимающие напряжения в середине полосы. Аналогично выравнивание скорости на выходе вызовет растягивающие продольные напряжения на кромках и сжимающие — в средних объемах по ширине. Внутри очага деформации растягивающие напряжения на кромках падают и часто переходят в сжимающие напряжения. В средней части по ширине они всегда сжимающие.

На широких полосах (рис. 5.2, *в*) в сечениях входа и выхода в средней части полосы напряжения должны отсутствовать, поскольку влияние внешних зон не распространяется на эти области. Поэтому растягивающие напряжения на кромках уравновешиваются сжимающими напряжениями в прикромочных областях. На полосах, находящихся на границе между широкими и узкими (рис. 5.2, *б*), напряжения σ_x изменяются по промежуточным эпюрам.

На основании этих закономерностей можно представить также распределение по ширине нормальных контактных напряжений σ_y или близкое к ним давление металла на валки p . Эти напряжения вычисляются из условия текучести $p - \sigma_x = \nu K$, поэтому их эпюры, представленные на рис. 5.3, следуют из эпюр продольных напряжений σ_x .

Напряжения σ_y всегда сжимающие. В сечении входа (нижние кривые) напряжения на кромках будут ниже, а в середине по ширине — больше предела текучести νK . Внутри очага деформации и на выходе из него напряжения σ_y на самих кромках равны пределу текучести K , а в средних объемах превыша-

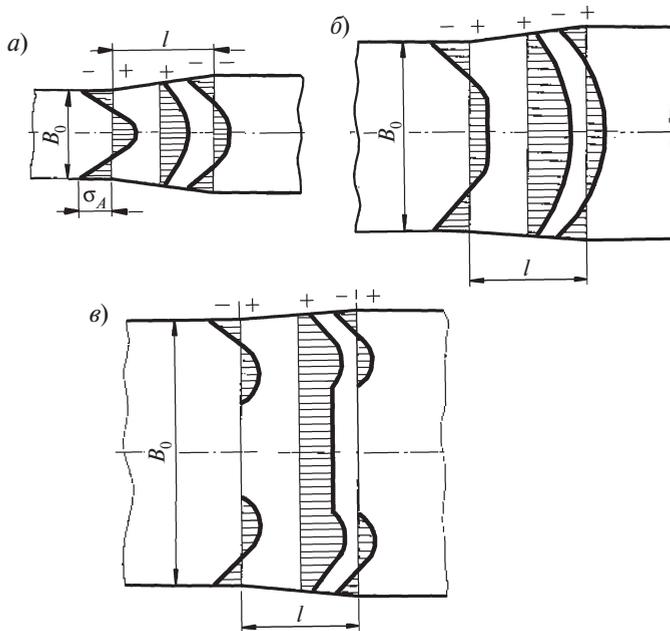


Рис. 5.2. Эпюры распределения продольных напряжений σ_x по ширине прокатываемой полосы на входе, посередине и на выходе из очага деформации при различных отношениях b_{cp}/l (знак “плюс” — напряжения сжатия, знак “минус” — напряжения растяжения) на узком (*а*), среднем (*б*) и широком (*в*) очаге

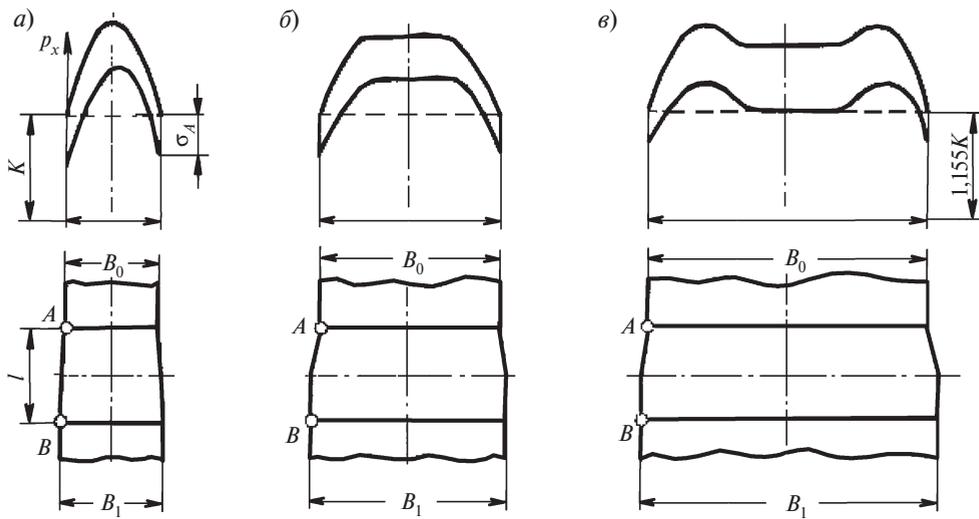


Рис. 5.3. Эпюры распределения контактного давления по ширине прокатываемой полосы в плоскости входа (нижние кривые) и по середине дуги захвата (верхние кривые) при разных отношениях B_0/l : а — меньше 1; б — 1-4; в — больше 4

ют его (верхние кривые). На широких полосах в средней части по ширине нормальные напряжения постоянны и теоретически равны значению $1,155K$, характерному для плоской деформации. В прикромочных областях неизбежно повышение давления металла на валки как компенсация его снижения на самих кромках. По экспериментальным данным прикромочная область простирается на ширину $(1,5-2,0)l$. Экспериментальная прокатка полос разной ширины подтверждает описанную картину распределения давления металла на валки (рис. 5.4).

Неравномерность давления металла на валки отрицательно влияет на качество полос, особенно при прокатке широких и тонких листов. Это ведет к их поперечной разнотолщинности, неравномерному износу поверхности валков, который также увеличивает поперечную разнотолщинность при прокатке. От эпюры распределения давления по ширине зависит также упругое сплющивание валков, которое будет полностью повторять эпюру давления. На тонких

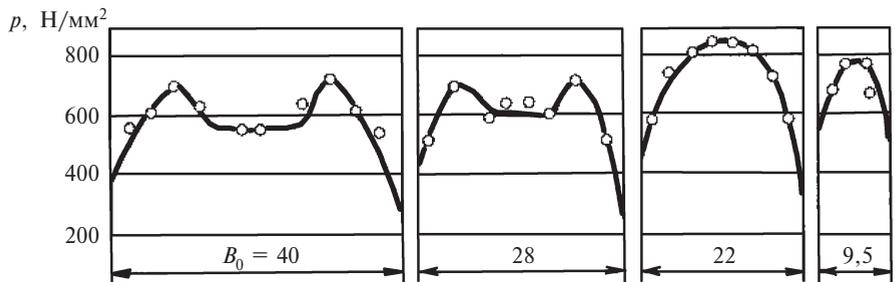


Рис. 5.4. Экспериментальные эпюры распределения по ширине давления на валки на полосах разной ширины

полосах упругие деформации валков ведут к дополнительной разнотолщинности и волнистости полосы при прокатке.

Растягивающие продольные напряжения на кромках полосы — существенный недостаток процесса прокатки в целом. Они, как известно, способствуют снижению пластичности металла, и при прокатке малопластичных и легированных сплавов на кромках полосы возможны трещины. Чтобы устранить этот недостаток, применяют прокатку в калибрах, в которых создается дополнительный подпор металла в направлении ширины вблизи кромок.

До некоторых пределов полезно переднее и заднее натяжение металла во время прокатки. Напряжения натяжения складываются с действующими продольными напряжениями, и суммарные напряжения по ширине будут более равномерными, хотя значение растягивающих напряжений на кромках возрастает. Натяжение больше влияет на растяжение полосы по кромкам, чем в середине. За счет этого, с одной стороны, склонность к разрушению металла на кромках будет выше. Но, с другой стороны, за счет выравнивания по ширине напряжений σ_x склонность к образованию трещин по кромкам снижается. При этом также выравниваются и снижаются давление металла на валки σ_y и упругое сплющивание валков. Все это устраняет разнотолщинность полосы по ширине и ее волнистость. Конечно, значительные напряжения натяжения вредны, так как вместо эффекта выравнивания напряжений появится эффект снижения пластичности от дополнительных растягивающих напряжений.

Представленный характер распределения продольных напряжений в очаге деформации отражается на деформации полосы и в самих внешних зонах. Экспериментально установлено, что пластические деформации простираются за пределы геометрического очага деформации, и напряжения во внешних зонах сильно зависят от напряжений в геометрическом очаге деформации.

Натяжение полосы при прокатке непосредственно влияет на ее ширину. При натяжении она уменьшается. Рассмотрим схему напряжений по ширине полосы при действии заднего натяжения, так как переднее натяжение, как отмечалось, мало влияет на ширину полосы. На продольные напряжения σ_x (см. рис. 5.2) накладываются дополнительные напряжения натяжения $\sigma_{xн}$. При этом при равномерном приложении нагрузки со стороны устройства, осуществляющего заднее натяжение, напряжения $\sigma_{xн}$ оказываются неравномерными по ширине. Они максимальны на кромках, где скорости продольного сечения ниже, чем в середине. На кромках суммарные напряжения будут растягивающими, за счет этого увеличивается доля металла, смещаемого в направлении прокатки, и уширение уменьшается.

5.2. Методика расчета силы прокатки

На основании вышеизложенного сформулируем методику расчета среднего давления металла на валки p_{cp} и силы прокатки $P_{пр}$ на высоком, среднем и низком очагах деформации.

Сила прокатки

$$P_{пр} = p_{cp} b_{cp} l,$$

где площадь контактной площадки $F_k = b_{cp} l$ вычисляется как произведение средней ширины очага $b_{cp} = 0,5(b_0 + b_1)$ и длины дуги захвата $l = \sqrt{R\Delta h}$. На

низких очагах деформации длина дуги захвата рассчитывается с учетом упругого сплющивания по итерационной методике, описанной выше:

$$l_c = x + \sqrt{R\Delta h + x^2},$$

$$x = \frac{p_{cp}R}{95000}.$$

Среднее давление металла на валки

$$p_{cp} = n_z n_\sigma n_b n_{нат} K, \text{ Н/мм}^2.$$

Коэффициенты n_z и n_σ определяются геометрическим критерием l/h_{cp} (ранее приведены формулы для их вычисления). Коэффициент натяжения $n_{нат}$ также уже рассмотрен. Студенту полезно самому просмотреть соответствующие разделы пособия и собрать приведенные в них формулы.

Коэффициент n_b учитывает влияние на давление ширины полосы. Из теории пластичности известно, что на очень узких очагах деформации средняя часть очага деформации находится в условиях, близких к плоскому напряженному состоянию, поскольку на самой боковой поверхности металла поперечное напряжение σ_z равно 0. Коэффициент Лодэ равен 1. По мере увеличения ширины полосы в средней части полосы в очаге деформации σ_z возрастает. На широких очагах середина проката находится в условиях плоской деформации, поперечная деформация $\epsilon_z = 0$. В этих условиях $\sigma_z = 0,5(\sigma_x + \sigma_y)$, коэффициент Лодэ возрастает до 1,155. Коэффициент n_b — это технологическая интерпретация коэффициента Лодэ. На основании экспериментальных данных В.С. Смирнов установил, что на узких полосах коэффициент n_b изменяется примерно линейно и зависит от коэффициента трения:

$$n_b = 1 + \frac{\mu}{3} \frac{b_0}{h_0}.$$

Если по этому уравнению значение n_b получится больше 1,155, то очаг деформации относится к разряду широких, и следует положить $n_b = 1,155$.

Предел текучести при прокатке K в общем случае определяется температурой, степенью и скоростью деформации. При равенстве этих параметров пределы текучести при растяжении σ_s и при прокатке K должны быть равными, если не учитывать трение при прокатке и различие схем напряженного состояния. В расчетах их приравнивают еще и потому, что на практике для силовых параметров требуются, как правило, верхние оценочные значения и некоторые неточности вполне допустимы.

5.3. Силы и крутящие моменты на валках

При симметричной прокатке, когда на верхнем и нижнем валках условия одинаковы и натяжения отсутствуют (рис. 5.5), со стороны валка действуют нормальная сила Q и две силы трения T_1 и T_2 . Первая из них действует в зоне отставания, а вторая — в зоне опережения.

Если прокатка протекает равномерно, то равнодействующая этих сил — сила прокатки $P_{пр}$, действующая со стороны валка на металл (см. рис. 5.5, б, пунктирная линия), должна уравновешиваться такой же равнодействующей

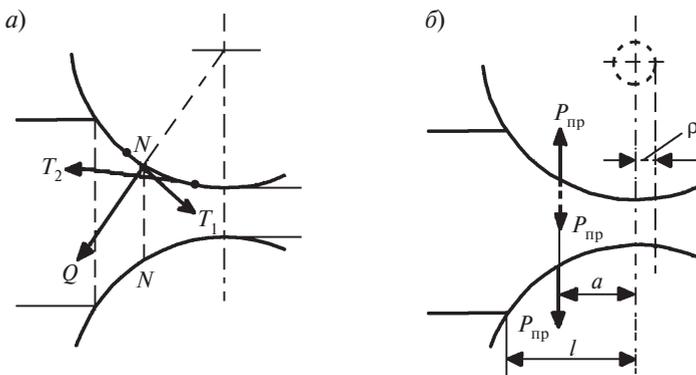


Рис. 5.5. Силы Q , T_1 и T_2 , действующие на полосу в очаге деформации (а), и их равнодействующая $P_{пр}$ (б)

$P_{пр}$ со стороны полосы на валок (см. рис 5.5, б, сплошная линия). Необходимо правильно ориентироваться в том, какая из сил участвует в том или ином анализе. Если речь идет о равновесии полосы, то используется равнодействующая, приложенная к полосе. При анализе сил, действующих на валок, следует применять равнодействующую, приложенную к валку.

Так как оба валка находятся в равновесии, то сила $P_{пр}$, действующая на верхний валок, должна уравниваться равной ей силой, приложенной к нижнему валку. Отсюда следует, что равнодействующие на обоих валках должны быть направлены вертикально навстречу друг другу.

Рассмотрим момент силы $P_{пр}$, действующей со стороны металла на валок. Точка приложения ее в общем случае не совпадает с нейтральным сечением NN и с точкой максимума эпюры давления металла на валки, хотя расхождение невелико.

Момент прокатки, необходимый для вращения одного валка при прокатке:

$$M_{пр} = P_{пр} a = P_{пр} \psi l,$$

где a — плечо приложения равнодействующей.

Коэффициент плеча равнодействующей $\psi = a/l$ зависит от многих технологических параметров: коэффициента трения, наличия натяжения и т. д. При нормальных условиях прокатки стальной полосы в стальных валках без натяжения коэффициент ψ определяется главным образом параметром $l/h_{ср}$. Экспериментальные данные показывают, что на высоких очагах деформации ψ находится на уровне 0,57–0,50, а на низких — уменьшается до 0,28–0,30 (рис. 5.6). А.П. Чекмарев аппроксимирует зависимость параболой:

$$\psi = 0,79 - 0,887l/h_{ср} + 0,444(l/h_{ср})^2,$$

хотя, как видно, экспериментальная кривая сложнее.

Сила $P_{пр}$ создает силу трения в подшипниках валка $T = \mu_{тр} P_{пр}$, и момент трения в подшипниках

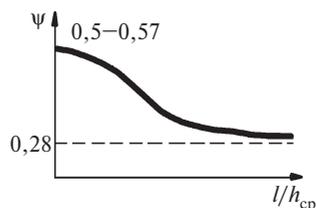


Рис. 5.6. Зависимость коэффициента приложения равнодействующей от геометрии очага деформации

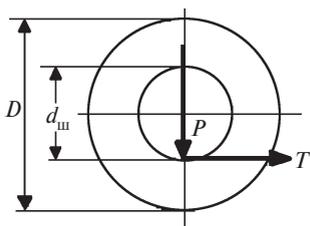


Рис. 5.7. Момент трения $M_{тр}$ силы P в подшипниках

$$M_{тр} = \mu_{тр} P_{пр} d_{ш} / 2,$$

где $d_{ш}$ — диаметр шейки валка; $\mu_{тр}$ — коэффициент трения в подшипниках, зависящий от типа подшипников (рис. 5.7). Суммарный момент на одном валке

$$M = M_{пр} + M_{тр} = P_{пр}(\psi l + \mu_{тр} d_{ш} / 2) = P_{пр}(\psi l + \rho),$$

где $\rho = \mu_{тр} d_{ш} / 2$ — радиус некоторой окружности, который называется радиусом трения (см. рис. 5.5).

Можно считать, что суммарный момент M образуется силой $P_{пр}$, приложенной на плече $(\psi l + \rho)$.

Момент M уравнивается подводимым к валку моментом привода. Фактически привод должен обеспечивать больший момент, так как валки и другие детали прокатного стана необходимо вращать еще и на холостом ходу. Но момент холостого хода привода как постоянную и незначительную величину мы пока рассматривать не будем.

При наличии заднего натяжения силой R_0 равновесие сил, действующих на полосу, будет достигаться в том случае, когда равнодействующая P , действующая со стороны валков на металл, будет наклонена к вертикали в сторону выхода металла из валков и ее горизонтальная проекция P_x будет уравнивать силу натяжения (рис. 5.8, а). Вертикальная проекция силы P равна силе прокатки: $P_y = P_{пр}$. Как видно, при заднем натяжении плечо приложения равнодействующей a увеличивается, поэтому увеличивается момент прокатки.

Очевидно, при наличии переднего натяжения силой R_1 равнодействующая P наклонена к входному сечению, плечо a уменьшается, момент прокатки падает. Потребление энергии от привода валков сокращается, но недостающая для деформации металла энергия подводится за счет силы R_1 . Возможен случай, когда равнодействующая P пройдет через центр окружности валка, плечо a будет равно 0 (рис 5.8, б), момент прокатки также будет равен 0.

Суммарный момент $M = M_{пр} + M_{тр}$ станет равным 0 тогда, когда равнодействующая пройдет по касательной к кругу трения правее центра валка (рис. 5.8, в). Получим процесс протягивания (волочения) полосы через не приводные валки, когда вся энергия, необходимая для деформации, подводится

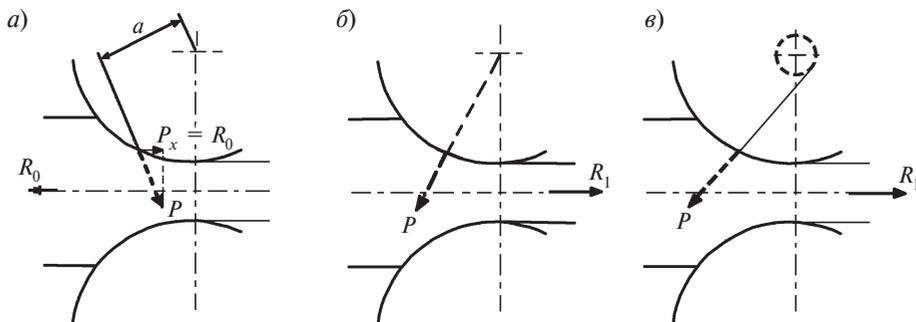


Рис. 5.8. Смещение равнодействующей при натяжении: заднем (а), переднем без учета (б) и переднем с учетом (в) трения в подшипнике

только за счет тянущего усилия R_1 . Такой технологический процесс также применяется в обработке давлением.

Понятно, что при наличии одновременно переднего и заднего натяжения равнодействующая P будет отклоняться от вертикали в зависимости от соотношения сил R_0 и R_1 . Если $R_1 > R_0$, то равнодействующая P , приложенная к валку, будет наклонена против хода прокатки, в противном случае, наоборот, по ходу прокатки. Горизонтальная составляющая равнодействующей будет такой:

$$X = (R_0 - R_1).$$

Эта сила создает дополнительное давление на подшипник, т. е. дополнительный момент трения в подшипнике, который по аналогии с $M_{тр}$ вычисляется по формуле

$$M_d = X\rho.$$

Таким образом, с учетом натяжения полосы суммарный момент на валке будет следующим:

$$M = P_{пр}(a + \rho) + X\rho.$$

Заметим, что при увеличении натяжения полосы (переднего и особенно заднего) усилие $P_{пр}$ снижается.

Рассмотрим прокатку металла на стане с одним (пусть нижним) приводным валком (рис. 5.9). В этом случае равнодействующая со стороны полосы на верхний холостой валок без учета сил трения P должна проходить через осевую точку верхнего валка, а равнодействующая P на нижнем валке должна располагаться на той же линии и уравнивать первую. При учете сил трения верхняя равнодействующая P' пройдет по касательной к окружности трения, а нижняя — на той же прямой в противоположном направлении. Плечо a приложения равнодействующей на нижнем валке увеличится примерно в два раза по сравнению с прокаткой в двух приводных валках. Нижний валок подводит к очагу деформации всю энергию, необходимую для деформации. Момент прокатки на нижнем валке будет равен сумме моментов, которые имеют место при симметричной прокатке. Таким образом,

$$M_b = 0; \quad M_n = P(a + \rho) + X\rho.$$

Приближенно сила $P = P_{пр}$, $a = 2a$.

Практический интерес представляют силы при прокатке на валках разного диаметра. На блюминге обычно нижний валок больше верхнего на 10 мм, а на сортовых станах, наоборот, верхний валок больше нижнего на 1–3 мм. Есть станы, у которых разница в диаметрах валков выше. На листовых станах создают условия несимметричной прокатки также за счет разности диаметров валков. Во всех случаях окружные скорости металла по верхней и нижней поверхности полосы различны, полоса выходит из валков искривленной в сторону меньшего валка. На блюминге полоса изгибается вверх и не ударяет в ролики рольганга. На сортовом стане полоса отгибается книзу и, прижимаясь к проводке, выправляется (рис. 5.10). Из-

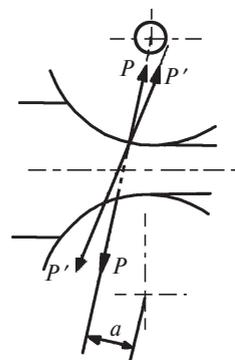


Рис. 5.9. Схема сил, действующих на валок, при одном приводном валке

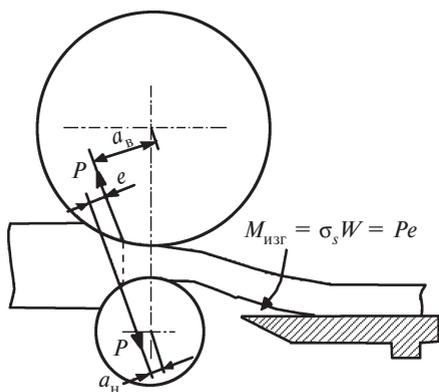


Рис. 5.10. Схема сил и моментов при прокатке в валках разного диаметра

Силы P , действующие на оба валка, разложить на вертикальную и горизонтальную составляющие, то получим момент на верхнем валке:

$$M_B = P(a_B + \rho_B) + X\rho_B.$$

Он больше, чем момент на нижнем валке:

$$M_H = P(a_H + \rho_H) + X\rho_H.$$

Соотношение моментов M_B/M_H очень быстро нарастает с увеличением разницы в диаметрах валков, и на реальных сортовых станах, когда, казалось бы, разница в диаметрах валков не столь уж велика, достигает 2, а при прокатке сложных профилей — даже 5.

Примерно такая же картина распределения сил, когда полоса имеет неодинаковые свойства по верхней и нижней поверхностям. При неравномерном по высоте нагреве или при прокатке биметаллической полосы сопротивление деформации верхнего и нижнего слоев металла различно. Пусть при прокатке биметалла (рис. 5.11) предел текучести верхнего слоя металла $\sigma_{с.в}$ меньше, чем нижнего $\sigma_{с.н}$. В этом случае верхний валок осуществляет большее высотное обжатие, чем нижний.

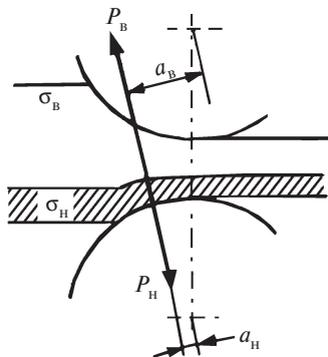


Рис. 5.11. Силы, действующие на валки при прокатке биметалла

Вытяжка верхнего слоя выше, чем нижнего, и полоса на выходе из валков изгибается вниз. Силы, действующие со стороны валков на полосу, уравновешены:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{p_{ср.в} b l_B}{p_{ср.н} b l_H} = \frac{\sigma_{с.в}}{\sigma_{с.н}} \frac{\sqrt{\Delta h_B \cdot R}}{\sqrt{\Delta h_H \cdot R}} = 1.$$

Отсюда

$$\frac{\Delta h_B}{\Delta h_H} = \frac{\sigma_{с.н}^2}{\sigma_{с.в}^2}. \quad (5.1)$$

гибющий момент, необходимый для выправки полосы, может быть оценен выражением

$$M_{изг} = \sigma_s W,$$

где σ_s — предел текучести; W — момент сопротивления прокатываемой полосы.

Изгибающий момент уравновешивается моментом, образующимся при смещении и наклоне равнодействующих сил, приложенных к полосе со стороны верхнего и нижнего валков на плече e . Отсюда

$$Pe = \sigma_s W.$$

Чем больше σ_s и W полосы, а также разность диаметров валков, тем больше плечо e и больше наклон равнодействующих

Обжатия верхнего и нижнего слоев распределяются обратно пропорционально квадратам сопротивлений деформации слоев. Подставив уравнение (5.1) в формулу обжатия $\Delta h = \Delta h_{\text{н}} + \Delta h_{\text{в}}$, вычисляем обжатия каждым из валков $\Delta h_{\text{н}}$ и $\Delta h_{\text{в}}$. Длины дуги захвата по обоим валкам

$$l_{\text{в}} = \sqrt{\Delta h_{\text{в}} D_{\text{в}}}; \quad l_{\text{н}} = \sqrt{\Delta h_{\text{н}} D_{\text{н}}}$$

не равны, и точки приложения равнодействующих не могут находиться на одной вертикали. В то же время при отсутствии крутящих моментов, прикладываемых к полосе извне (помимо валков), эти силы должны быть на одной прямой, поэтому они должны быть наклонены к вертикали. Появляется горизонтальная составляющая сил X , оказывающая дополнительное давление на подшипники стана: $X_{\text{в}} = P_{\text{в}} \sin \alpha_{\text{в}}$ и $X_{\text{н}} = P_{\text{н}} \sin \alpha_{\text{н}}$, где $\alpha_{\text{в}}$ и $\alpha_{\text{н}}$ — углы наклона сил к вертикали. Момент прокатки на верхнем валке может быть значительно больше, чем на нижнем. Если принять, что точки приложения равнодействующих находятся посередине длин дуги захвата, что допустимо при горячей прокатке толстых биметаллических листов, то все углы, силы и плечи находятся геометрически. По-прежнему вертикальная проекция равнодействующей P равна силе прокатки $P_{\text{пр}}$ и может быть вычислена по обычной методике.

5.4. Силы и моменты при прокатке на стане кварто

На большинстве листовых станов используют 4-валковые клетки. Рабочие валки имеют меньший диаметр, чем опорные. Привод осуществляется либо за опорные, либо за рабочие валки. В обоих случаях вращение неприводных валков происходит за счет сил трения на контакте с приводными валками.

При приводных рабочих валках сила прокатки $P_{\text{пр}}$ передается на опорный валок как сила $P_{\text{оп}}$, которая должна пройти по касательной к кругу трения радиусом $\rho_{\text{оп}}$ опорного валка, поскольку опорные валки неприводные. Второй точкой, через которую проходит сила $P_{\text{оп}}$, должна быть точка касания рабочего и опорного валков (рис. 5.12).

Видно, что сила $P_{\text{оп}}$ вычисляется геометрически:

$$P_{\text{оп}} = P_{\text{пр}} / \cos \theta,$$

где θ — угол трения, определенный выше (угол между направлениями сил $P_{\text{пр}}$ и $P_{\text{оп}}$).

На опорном валке момент

$$M_{\text{оп}} = P_{\text{оп}} \rho_{\text{оп}}.$$

Так как приводным является рабочий валок, то момент на рабочем валке, необходимый для преодоления трения в подшипниках опорного валка, таков:

$$M_1 = M_{\text{оп}} D_{\text{раб}} / D_{\text{оп}}.$$

На рабочем валке сила $P_{\text{пр}}$ на плече a образует момент

$$M_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} a.$$

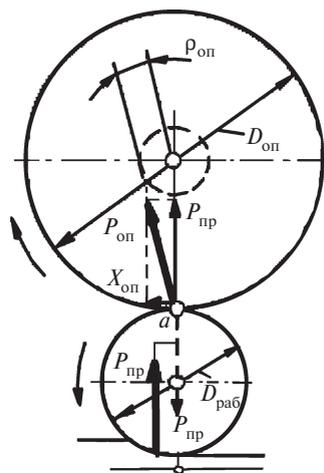


Рис. 5.12. Силы, действующие на рабочий и опорный валки стана кварто

Горизонтальная составляющая силы $P_{\text{оп}}$ ($X_{\text{оп}} = P_{\text{пр}} \sin\theta$) со стороны опорного валка воздействует на подшипники рабочего валка и создает в рабочем валке дополнительный момент трения:

$$M_{\text{д.раб}} = X_{\text{оп}} \rho_{\text{раб}}.$$

Таким образом, к рабочему валку подводится суммарный момент:

$$M = M_{\text{пр}} + M_{\text{д.раб}} + M_1.$$

Сила $P_{\text{оп}}$, действующая на опорный валок, не будет зависеть от переднего R_1 или заднего R_0 натяжения, воздействующего на рабочий валок. Эти силы отражаются только на моменте рабочего валка. Сила $P_{\text{пр}}$ отклонится от вертикали. Ее вертикальная проекция останется равной силе прокатки $P_{\text{пр}}$. Горизонтальная составляющая

$$X = (R_0 - R_1)$$

создает на рабочем валке дополнительный момент трения

$$M_{\text{д}} = X \rho_{\text{раб}},$$

который необходимо прибавить к моменту M .

Фактическая картина немного сложнее. Под действием силы $P_{\text{оп}}$ происходит упругое сплющивание рабочего и опорного валков. Образуется площадка смятия, протяженность которой можно оценить по решению задачи Герца об упругом сжатии двух цилиндров.

Отличие состоит в том, что задача Герца решена при отсутствии вращения валков, а на вращающихся валках площадка смятия несимметрична, и часть ее на выходе из валков существенно меньше, чем на входе. В связи с этим точка приложения силы $P_{\text{оп}}$ смещается от линии центров валков на величину плеча m в сторону, противоположную вращению валков (рис. 5.13). Плечо m может быть определено по формуле $m = (0,02-0,1)b$, где b — половина ширины площадки смятия из решения задачи Герца:

$$b = 1,52 \sqrt{\frac{PR_1R_2}{E(R_1 + R_2)}}.$$

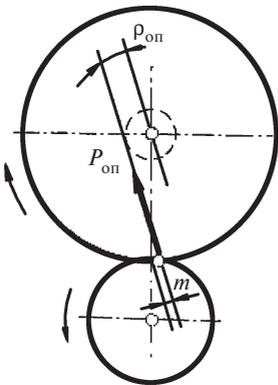


Рис. 5.13. Смещение точки приложения силы $P_{\text{оп}}$ на площадке смятия

Здесь R_1, R_2 — радиусы валков, E — модуль упругости материала валков.

Чем мягче валок и меньше скорость его вращения, тем выше коэффициент в формуле для вычисления m .

Таким образом, момент на неприводном опорном валке от силы $P_{\text{оп}}$

$$M_{\text{оп}} = P_{\text{оп}}(\rho_{\text{оп}} + m).$$

Горизонтальная проекция силы $P_{\text{оп}}$ — сила $X_{\text{оп}}$ — также немного изменится, что отразится на вычислении момента $M_{\text{д.раб}}$. Можно считать, что расстоянию m соответствует центральный угол

$$\nu = \arcsin(m/R_{\text{оп}}).$$

Тогда можно записать

$$M_{\text{оп}} = P_{\text{оп}} \sin(\theta + \nu).$$

Остальные составляющие полного момента M останутся прежними.

На листовых станах часто вертикальную ось рабочих валков смещают вперед по отношению к осям опорных валков на значение $c = 5-10$ мм (рис. 5.14), что необходимо для уменьшения разнотолщинности прокатываемого листа. При этом площадка смятия смещается по направлению прокатки, и точка приложения силы $P_{\text{оп}}$ располагается на расстоянии $m' = AB + m$, если точка A расположена на линии центров опорных валков, а точка B — на линии OE , соединяющей центры опорного и рабочего валков.

Из подобия треугольников OAB и OFE видно, что

$$AB = c \frac{R_{\text{оп}}}{R_{\text{оп}} + R_{\text{раб}}}.$$

Соответственно, $M_{\text{оп}} = P_{\text{оп}}(\rho_{\text{оп}} + m')$.

Сила $P_{\text{оп}}$ до смещения действовала под углом трения θ к вертикальной оси, а после смещения угол возрастает до некоторого значения $\theta + \delta$. Горизонтальная проекция силы

$$X_{\text{оп}} = P_{\text{оп}} \sin(\theta + \delta)$$

и дополнительный момент

$$M_{\text{д.раб}} = X_{\text{оп}} \rho_{\text{раб}}$$

возрастут. Все углы можно вычислить геометрически.

При наличии переднего и заднего натяжения R_1 и R_0 от разности этих сил возникает дополнительный момент в подшипниках $M_{\text{д}} = X \rho_{\text{раб}}$.

Суммарный момент, действующий на один рабочий валок:

$$M = M_{\text{пр}} + M_{\text{д.раб}} + M_1 + M_{\text{д}}.$$

Рассмотрим случай, когда приводными являются опорные валки и через опорный валок передается суммарный момент обоих валков. Сила $P_{\text{оп}}$ должна быть направлена так, чтобы момент всех сил P , $P_{\text{оп}}$ и X на рабочем валке (рис. 5.15) был равен 0:

$$M_{\text{раб}} = M_P + M_{P_{\text{оп}}} + M_X = 0.$$

Сила X , создающая дополнительный момент трения на рабочем валке, проходит параллельно оси x через радиус трения $\rho_{\text{раб}}$. Направление силы P также известно: если нет сил натяжения R_0 и R_1 , то она

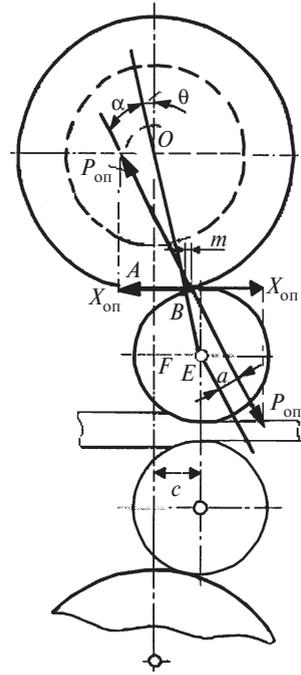


Рис. 5.14. Расположение силы $P_{\text{оп}}$ при смещении рабочих валков вперед

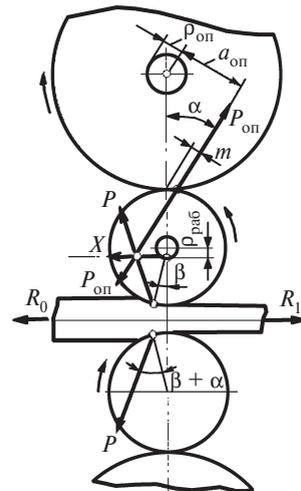


Рис. 5.15. Силы, действующие на рабочий валок при приводном опорном валке

направлена вертикально и равна силе прокатки $P_{\text{пр}}$, а при их наличии отклоняется от вертикали. Момент этих двух сил уравновешивается моментом силы трения в подшипнике рабочего вала $M_{\text{тр}} = P_{\text{оп}}\rho_{\text{раб}}$, поэтому все три силы должны пересекаться в одной точке. Это определяет одну точку направления силы $P_{\text{оп}}$. Второй точкой должна быть точка на площадке смятия (с плечом m) при контакте рабочего и опорного валков. Плечо $a_{\text{оп}} = m + R_{\text{оп}} \sin\alpha$.

Модуль силы

$$P_{\text{оп}} = P_{\text{пр}} / \cos\alpha,$$

где α — угол между вертикальной осью и направлением силы $P_{\text{оп}}$.

Угол α можно найти геометрически (см. рис. 5.15). Суммарный момент на приводном опорном валке

$$M = P_{\text{оп}} (a_{\text{оп}} + \rho_{\text{оп}}).$$

5.5. Силы, действующие на валки 12-валкового стана

Аналогичным образом могут быть проанализированы силы, действующие на валки многовалкового стана. Рассмотрим 12-валковый стан, представленный на рис. 5.16. Валки пронумерованы цифрами 1, 2, 3, 4, 5 и 6. Приводными являются промежуточные опорные валки 2 и 3.

Обозначим точки касания валков буквами A, B, C, D, E, F , а силы в этих точках соответственно P_A, P_B, P_C, P_D, P_E и P_F . Силы, действующие на основные опорные неприводные валки 4, 5 и 6, должны проходить по касательной к окружности трения через точку на площадке смятия на расстоянии m_i (i — номер точки касания валков) от линии, соединяющей центры основного и промежуточного опорных валков. Они дают моменты трения в опорах этих валков:

$$\begin{aligned} M_4 &= P_C (\rho_4 + m_C); & M_6 &= P_F (\rho_6 + m_F); \\ M_5 &= P_D (\rho_5 + m_D) + P_E (\rho_5 + m_E). \end{aligned}$$

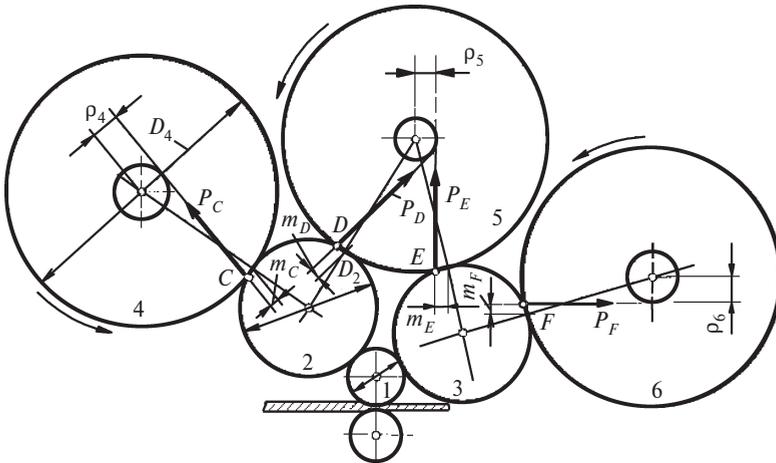


Рис. 5.16. Силы, действующие на основные опорные валки 12-валкового стана

На рабочий валок 1 (рис. 5.17) действуют: сила P , которая при наличии переднего или заднего натяжения может отклоняться от вертикали, но вертикальная составляющая ее должна быть равна силе прокатки $P_{пр}$; реакции со стороны промежуточных опорных валков P_A и P_B ; сила X трения в подшипнике рабочего валка.

Так как валки 2 и 3 симметричны относительно вертикали, то силы, действующие от них на рабочий валок, уравниваются друг друга. Поэтому силу X можно положить равной 0, если отсутствуют силы натяжения, и при их наличии она будет такой: $X = (R_1 - R_0)$.

Суммарный момент сил, действующих на рабочий валок как на неприводной, равен 0, следовательно, силы P , P_A и P_B пересекаются в одной точке. Модули сил P_A и P_B находятся из условия равновесия рабочих валков, т. е. равенства 0 суммы проекций на оси x и y сил, действующих на валок. Если углы между этими силами и вертикалью обозначить φ_i , то получим

$$P_{пр} \cos\varphi + P_A \cos\varphi_A + P_B \cos\varphi = 0;$$

$$P_A \sin\varphi_A + P_B \sin\varphi + X = 0.$$

Так же при известном значении силы P_A из условия равновесия основного опорного валка находятся модули сил P_C и P_D .

На приводной опорный валок 2 (рис. 5.18) действуют силы P_D и P_C со стороны основных опорных валков и сила P_A со стороны рабочего валка. На-

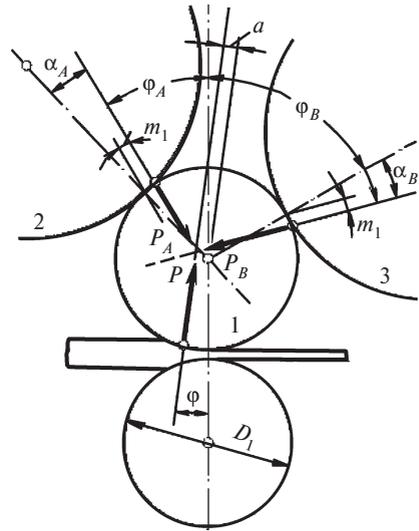


Рис. 5.17. Силы, действующие на рабочий валок 12-валкового стана

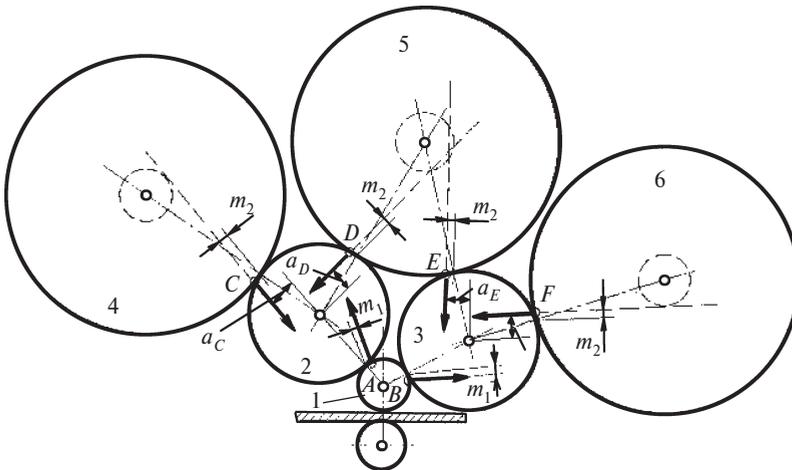


Рис. 5.18. Силы, действующие на приводные опорные валки 12-валкового стана

правления этих сил и их модули также определяются из условия равновесия валков.

Окончательно составляем уравнение момента относительно центра валка M_2 , который необходимо подвести к левому промежуточному опорному валку:

$$M_2 = P_C a_C + P_D a_D + P_A a_A.$$

Также определяется момент второго приводного валка M_3 . От рабочего валка на приводной опорный переходят дополнительные моменты трения в подшипниках, а также моменты смещения сил P_A и P_B , умноженные на отношение диаметров D_2/D_1 :

$$M_{\text{раб}} = (P_A m_A + P_B m_B + X_{\text{р.раб}}) D_2/D_1.$$

Суммарный момент на оба приводных валка

$$M = M_2 + M_3 + (M_4 + M_5 + M_6) D_2/D_4 + M_{\text{раб}}.$$

5.6. Сопротивление металла деформации

Сопротивление металла деформации в общем виде рассмотрено в гл. 1. Применительно к процессу прокатки необходимо конкретизировать основные положения. Основными факторами, влияющими на сопротивление деформации, являются температура, степень и скорость деформации металла. Но, помимо них, оказывают существенное влияние ряд других факторов:

- физико-химическая природа и структура деформируемого металла;
- различные виды обработки, которые предшествовали деформированию (предшествующая пластическая деформация, термическая или иная обработка);
- вид испытания образцов;

- физико-механические и химические изменения в процессе деформирования.

Физико-химическая природа деформируемого металла определяет сопротивление деформации на основе глубинных связей между атомами, входящих в кристаллическую решетку металла. В гл. 1 рассмотрены особенности деформирования металлов, имеющих разную кристаллографическую решетку. На значение сопротивления деформации влияет также наличие примесей. У сплавов оно всегда выше, чем у чистых металлов. Большое влияние оказывает также структура металла и величина зерна. Обычно значение величины зерна поликристалла находится в пределах 1,00–0,01 мкм, хотя может быть значительно меньше. С уменьшением величины зерна сопротивление деформации может возрасти в 10 и более раз. С.И. Губкин объясняет это увеличением отношения поверхности зерен к их объему и поверхностных сил натяжения и адгезии. На значение сопротивления деформации влияет также химический состав, структура и фазовое состояние границ зерен.

Предшествующие виды обработки металла оказывают существенное влияние на сопротивление деформации. Условия литья (температура, скорость и пр.), параметры кристаллизации при разливке, условия модификации и т. п. оказывают влияние на прочностные свойства металла. Последующая горячая и холодная пластическая деформации существенным образом изменяют как структуру, так и сопротивление деформации металла, однако наследственные литые свойства сохраняют свое влияние не только в процессе деформации, но и на готовом

изделии. Большое влияние на сопротивление деформации оказывает термическая обработка металла. Например, после отжига металл вновь приобретает свойства повышенной пластичности при низком сопротивлении деформации. Но металл на всех стадиях “запоминает” историю его обработки, и все стадии обработки вносят свой вклад в формирование его конечных механических свойств.

На величину показателей сопротивления деформированию большое влияние оказывает вид деформирования. Причем вид деформации, а точнее, схема напряженного состояния при деформации влияет не только на свойства металла в процессе деформирования, но и на конечные свойства после деформации. Так, при одной и той же степени деформации после осадки сопротивление деформации выше, чем после растяжения, еще выше оно после прокатки, особенно в калибрах, в свою очередь, после прессования оно выше, чем после прокатки. В общем случае чем больше сжимающих напряжений в схеме напряженного состояния металла при его пластической обработке, тем выше прочностные характеристики металла готового изделия.

Следует заметить, что эффект влияния схемы деформации на конечные свойства металла не очень велик. В теории пластичности им принципиально пренебрегают, в практических расчетах также не всегда принимают во внимание. Гораздо больше этот эффект заметен в процессе пластической деформации. В зависимости от схемы напряжений разность в сопротивлении деформированию будет значительно более ощутимой. Например, при осадке сопротивление деформации примерно на 10 % выше, чем при растяжении, при прокатке оно еще выше. С этих позиций для снижения сопротивления металла деформированию полезно вводить в схему напряженного состояния растягивающие напряжения. Например, при прокатке или волочении можно ввести дополнительное заднее натяжение (при прокатке — также переднее), чтобы снизить нагрузку на инструмент как за счет изменения эпюры нормальных контактных напряжений, так и за счет снижения сопротивления металла деформированию. Но при наличии растягивающих напряжений снижается пластичность металла, поэтому данная рекомендация справедлива для высокопластичных металлов, и пользоваться ею следует осторожно.

По той же причине сопротивление металла деформации зависит от вида испытания образца. При растяжении сопротивление деформации имеет меньшее значение, чем при испытаниях на осадку. При кручении образца напряжения сжатия или растяжения отсутствуют, образец деформируется под действием касательных напряжений, поэтому сопротивление деформации будет средним между растяжением и сжатием. Кручение соответствует нулевой схеме напряженного состояния, поэтому используется для оценки стандартной характеристики сопротивления деформации, не зависящей от нормальных напряжений.

Температура металла существенным образом влияет на сопротивление деформации. Для всех металлов, как общая закономерность, сопротивление деформации снижается, а пластичность повышается с ростом температуры до предельных температур, близких к температурам начала плавления границ зерен. С.И. Губкин предложил следующую формулу, описывающую снижение сопротивления деформации с увеличением температуры в интервале t_1-t_2 :

$$\sigma_{t_2} = \sigma_{t_1} e^{-\alpha(t_2-t_1)}.$$

Если прологарифмировать эту зависимость, то получим уравнение прямой линии

$$\ln \sigma_{t_2} = \ln \sigma_{t_1} - \alpha(t_2 - t_1).$$

Однако практически прямая линия в полулогарифмических координатах (рис. 5.19, а) наблюдается лишь для однородных металлов, когда в рассматриваемом температурном интервале не происходит никаких фазовых и структурных изменений в металле. Как правило, в широком температурном интервале сплавы всегда претерпевают изменения, поэтому зависимость в полулогарифмических координатах состоит из нескольких прямолинейных отрезков, как это видно на примере с медью и латунью с содержанием 30 и 40 % цинка (рис. 5.19, б). Часто на кривых прямолинейные участки представляются в виде единой плавной кривой.

Сходство кривых сопротивления деформации в зависимости от температуры для многих сталей и сплавов привело к мысли найти общую закономерность для этих сплавов и свести множество кривых к одной. Для этого в качестве температуры выбрана соответствующая температура $T/T_{\text{пл}}$, где $T_{\text{пл}}$ — температура плавления сплава. Однако оказалось, что при одной и той же соответствующей температуре разные сплавы находятся в разном физико-химическом состоянии, поэтому единая кривая не получается. Но уже при $T/T_{\text{пл}} > 0,5$ кривые сближаются, а при $T/T_{\text{пл}} = 0,95$ практически сливаются. По данным С.И. Губкина при $T/T_{\text{пл}} = 0,95$ и скорости растяжения 40–50 мм/мин однокомпонентные сплавы имеют предел прочности $\sigma_{\text{в}} = 40\text{--}50$ Н/мм², двух- и многофазные сплавы — 45–55 Н/мм², а твердые растворы в зависимости от концентрации — 40–60 Н/мм².

Зависимость сопротивления деформации от скорости деформации u определяется соотношением процессов упрочнения и разупрочнения в металле. С увеличением скорости деформирования сопротивление деформации возрастает, так как меньше времени дается на протекание процессов разупрочнения. Однако характер роста сопротивления деформации не всегда определяется только этими процессами. С позиций разупрочнения и упрочнения скорость деформации не должна влиять на сопротивление деформации при холодной дефор-

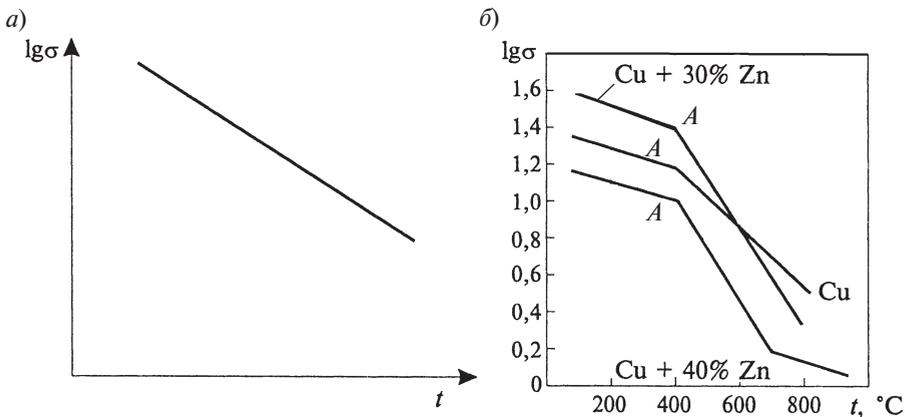


Рис. 5.19. Изменение сопротивления деформации от температуры для чистых металлов (а) и некоторых сплавов (б)

мации, так как в этом случае полностью доминируют процессы наклепа металла, возврат протекает с незначительной скоростью, а рекристаллизация отсутствует. При горячей деформации полностью протекают процессы разупрочнения металла, поэтому следует ожидать, что в большом диапазоне скоростей деформации, когда наклеп полностью снимается, скорость деформации не будет влиять на сопротивление деформации, последняя будет иметь постоянное значение при всех скоростях этого диапазона. И только при высоких скоростях, когда разупрочнение не успевает протекать полностью, появится зависимость сопротивления деформации от скорости деформации. Степень деформации, определяющая наклеп, также не должна влиять на сопротивление деформации, когда наклеп полностью снимается. Следовательно, в каком-то широком диапазоне скоростей сопротивление деформации должно зависеть только от одной температуры металла.

Однако эксперименты опровергают эти рассуждения. Увеличение скорости деформации практически всегда увеличивает сопротивление деформации. Дело в том, что при высоких температурах металл проявляет вязкие свойства. Для вязких материалов зависимость между сопротивлением деформации и скоростью деформации u в общем случае выглядит следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0 + \eta u, \quad (5.2)$$

где η — коэффициент вязкости, зависящий от температуры.

С повышением температуры доля вязкой составляющей в общей картине деформации увеличивается, поэтому при больших температурах рост сопротивления деформации от скорости будет более интенсивным, чем при низких. На меди и многих сталях, например нержавеющей типа 12Х18Н9Т, наблюдается именно такой эффект (рис. 5.20): производная от кривой при 1200 °С выше,

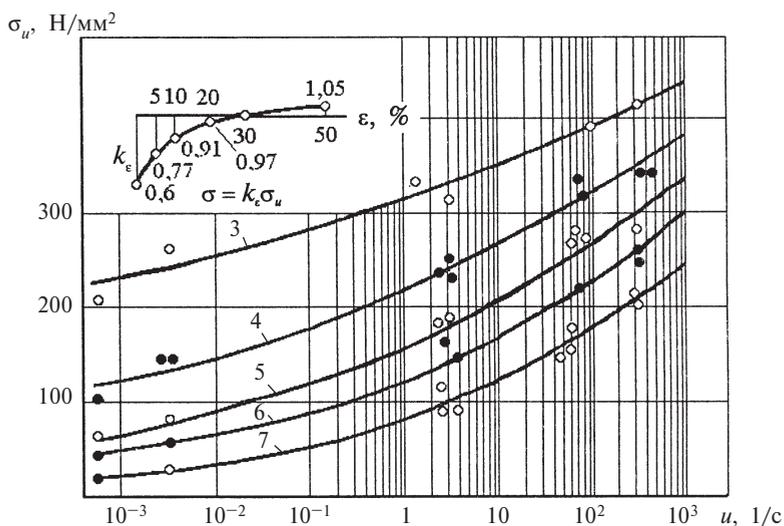


Рис. 5.20. Предел текучести стали 12Х18Н9Т при температурах, °С:
1 — 600; 2 — 700; 3 — 800; 4 — 900; 5 — 1000; 6 — 1100; 7 — 1200

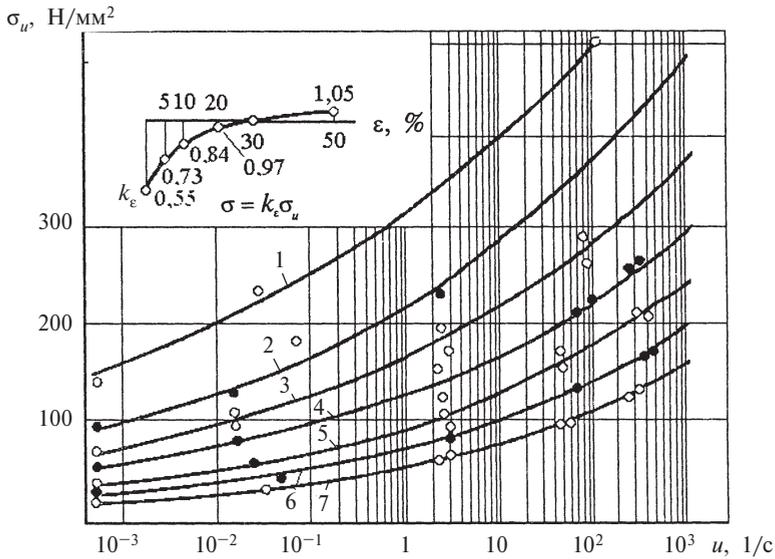


Рис. 5.21. Предел текучести стали 3сп при температурах, указанных на рис. 5.20

чем при 900 °С, доля вязкой составляющей в формировании сопротивления деформации велика. Однако на СтЗсп (рис. 5.21) сопротивление деформации изменяется медленно при высоких и быстрее при низких температурах. Доля вязкой составляющей здесь не так велика. С позиций упрочнения-разупрочнения так и должно быть, потому что при высоких температурах разупрочнение проходит интенсивнее, чем при низких.

Заметим, что скорость деформации на обоих графиках изображают в логарифмических координатах, потому что осязательное изменение сопротивления деформации наблюдается только при увеличении скорости деформации на порядок. В реальных технологических процессах скорости деформации различаются на несколько порядков. При лабораторном статическом испытании образцов скорости деформации изменяются в интервале 10^{-2} – 10^0 1/с, на блюмингах и крупных сортовых и листовых станах — 1–10 1/с, на скоростных сортовых и листовых станах возрастают до 10^2 1/с, на проволочных — до 10^3 1/с, при высокоскоростной штамповке — до 10^4 1/с. В связи с этим весь диапазон скоростей 10^{-2} – 10^4 1/с в процессах обработки давлением является рабочим.

Приведенные экспериментальные данные показывают, что сопротивление деформации возрастает со скоростью не по прямой линии, как следует из формулы (5.2), а медленнее. Некоторые авторы считают, что, наряду с вязкой составляющей, в общей деформации большую роль играет релаксационная составляющая, зависящая от уровня напряжений в металле. Релаксация — это самопроизвольное снижение напряжений во времени. Как правило, она сопровождается ползучестью, т. е. дополнительной самопроизвольной деформацией нагруженного образца. Релаксационная модель Максвелла учитывает этот эффект и устанавливает зависимость между скоростью деформации и сопротивлением деформации в виде степенного уравнения

$$\sigma = \sigma_0 + B u^n,$$

где B , n — коэффициенты, зависящие от материала, причем всегда $n < 1$, а для стали этот коэффициент не превышает 0,3.

Релаксация заметна при высоких температурах и низких скоростях деформации. Разупрочнение протекает пропорционально скорости деформации, а релаксационные процессы — пропорционально уровню напряжений, получаемых в результате наклепа, который зависит от степени деформации. Таким образом, при постоянной температуре приращение сопротивления деформации должно содержать две составляющие:

$$\frac{d\sigma_u}{dt} = Du - A(\sigma_u - \sigma_0),$$

где A , D , σ_0 — константы, которые необходимо найти из опыта.

Первый член зависит от скорости деформации, а второй — от уровня напряжений σ_u .

После некоторых уточнений и интегрирования этого уравнения П.М. Куком получено уравнение для определения сопротивления деформации в зависимости от скорости и степени деформации при постоянной температуре, которое хорошо согласуется с экспериментальными данными:

$$\sigma_u = \sigma_0 + D\epsilon e^{-\frac{A}{u}}.$$

Помимо процессов упрочнения, разупрочнения, релаксации и вязкости металла, на сопротивление деформации влияют еще другие факторы. Существенным является протекание физико-химических процессов по границам зерен, значимость которых определяется величиной зерна. Чем выше температура, тем крупнее зерно, тем быстрее протекают на границах межзеренные реакции, за счет чего происходит некоторое нарушение целостности металла. В формулу для вычисления предела текучести металла должен входить размер зерна; чем мельче зерно, тем предел текучести выше. Видимо, увеличением величины зерна можно частично объяснить то, что при повышенных температурах и высоких скоростях интенсивность нарастания сопротивления деформации уменьшается. Например, П.Г. Кириллов на меди при 600 °С наблюдал снижение интенсивности нарастания сопротивления деформации с ростом скорости (рис. 5.22). Возможно снижение сопротивления деформации при дальнейшем увеличении скорости. Такое снижение наблюдается при прокатке на листовых станах, при ударной штамповке, когда скорости деформации достигают 10^3 1/с и выше. Возможно, при этом существенное влияние на сопротивление деформации оказывает выделяемое при деформации тепло.

Следовательно, в зависимости от роли всех рассмотренных выше про-

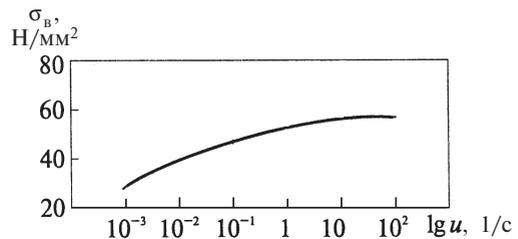


Рис. 5.22. Зависимость предела прочности меди при 600 °С от скорости деформации (по П.Г. Кириллову)

цессов — упрочнения, разупрочнения, вязкости и релаксации, межзеренных процессов — могут быть разные виды кривых зависимости сопротивления от скорости деформации.

Влияние степени деформации на сопротивление деформации также неоднозначно. С позиций упрочнения-разупрочнения при горячей обработке давлением она не должна влиять на сопротивление деформации. Однако опыты А.А. Динника, также ставшие классическими, проведенные на сталях 15 марок, а затем эксперименты П.М. Кука по осадке образцов показали, что при горячей обработке давлением степень деформации также существенно влияет на сопротивление деформации (рис. 5.23).

Интенсивность роста предела текучести стали при увеличении скорости деформации в значительной мере зависит от степени деформации, причем чем больше степень деформации, тем сопротивление деформации больше растет с ростом скорости.

Все изложенное свидетельствует о том, что чисто теоретическое исследование зависимости сопротивления деформации от температуры, степени и скорости деформации очень затруднено. Оно не дает достоверной картины, хотя в литературе такие попытки неоднократно предпринимались.

Более надежным оказался путь накопления и обобщения экспериментальных данных. Причем во внимание принимаются только три основных параметра процесса — температура, степень и скорость деформации. Практически для всех наиболее распространенных марок сплавов на основе железа, меди, алюминия и др. проведены лабораторные исследования их механических свойств во всем технологическом диапазоне изменения указанных параметров.

Остальные параметры процесса деформации, которые рассмотрены выше, при этом не учитываются, хотя нельзя считать их несущественными. Приведенные ниже данные, таким образом, только в общих чертах описывают зависимости сопротивления деформации от основных процессов.

При расчетах силовых параметров при холодной деформации обычно считают, что господствуют процессы наклепа (см. рис. 1.8, в). Математически они описываются зависимостью

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + A\epsilon^a,$$

где σ_{s0} — начальный предел текучести отожженного недеформированного металла (при $\epsilon = 0$); a — показатель степени, различный для разных сплавов, характеризующий степень упрочнения материала при наклепе; A — коэффициент, зависящий от марки сплава.

В представленных в справочниках формулах степень деформации обычно выражена в процентах. Например, для низкоуглеродистых сталей с содержанием углерода от 0,1 до 0,45 %

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + 1,4\epsilon^{0,6}.$$

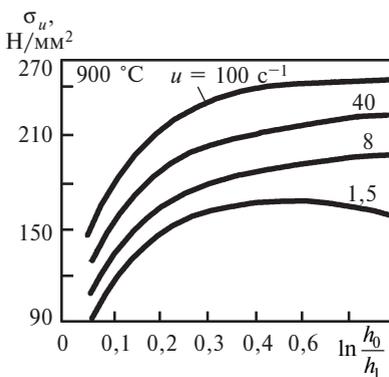


Рис. 5.23. Экспериментальные кривые зависимости сопротивления деформации от степени и скорости деформации при высоких температурах

Начальный предел текучести для низкоуглеродистой стали 08кп $\sigma_{s0} = 240 \text{ Н/мм}^2$, для стали 20сп $\sigma_{s0} = 380 \text{ Н/мм}^2$ и т. д.

Для горячей деформации (включая неполную горячую) важную роль играет скорость деформации. При прокатке она переменна по длине очага деформации, поэтому экспериментальные данные, полученные при растяжении образцов при постоянной скорости, непригодны для прокатки. Чтобы имитировать скоростные условия процесса прокатки, испытания проводят на пластометрах или современных разрывных машинах, на которых можно поддерживать постоянную температуру и изменять скорость деформации во времени по любому закону, в том числе характерному для прокатки. Таким способом получены экспериментальные кривые для большого числа сплавов [5]. Одна из них приведена на рис. 5.24. Кривые отражают зависимость сопротивления деформации от логарифма скорости при разных температурах. Степень деформации при этом принимается постоянной. Согласно опытам А.А. Динника даже при горячей прокатке степень деформации влияет на предел текучести, поэтому не учитывать ее нельзя. При высоких скоростях деформирования, в условиях неполной горячей деформации, влияние степени деформации становится весьма существенной.

Для наиболее распространенных углеродистых сталей в интервале температур полной и неполной горячей деформации предложена аппроксимация кривых зависимость

$$\sigma_s = \frac{A \epsilon^a u^b}{e^{ct}},$$

где A — коэффициент, имеющий размерность Н/мм^2 ; a, b, c — безразмерные коэффициенты; t — температура металла, $^{\circ}\text{C}$; $e = 2,73$.

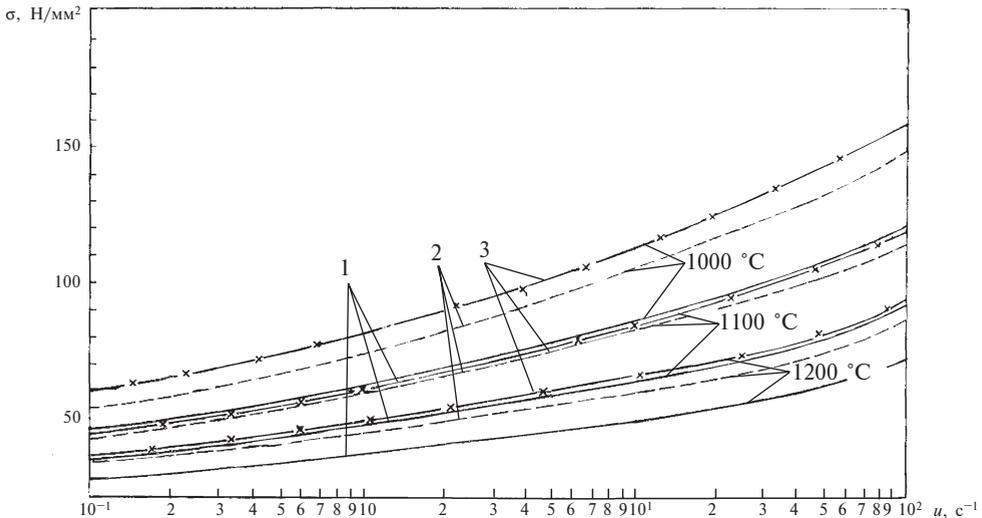


Рис. 5.24. Сопротивление деформации Ст45:

1 — $\epsilon = 10\%$; 2 — $\epsilon = 20\%$; 3 — $\epsilon = 40\%$

Например, для Ст45 при температурах 1000–1200 °С

$$\sigma_s = \frac{1330 \varepsilon^{0,252} u^{0,142}}{e^{0,0025t}}, \text{ Н/мм}^2.$$

В теории ОМД существует другой подход к описанию указанных экспериментальных зависимостей — так называемый метод термомеханических коэффициентов.

Предел текучести металла можно представить в виде

$$\sigma_s = k_\varepsilon k_u k_t \sigma_{\text{баз}},$$

где $\sigma_{\text{баз}}$ — предел текучести металла, полученный при определенных заданных температуре, степени и скорости деформации.

Для горячей прокатки и растяжения часто в качестве таковых выбирают $\varepsilon = 10 \%$, $u = 10^{-2} \text{ 1/с}$, $t = 1100 \text{ °С}$. При выбранных условиях термомеханические коэффициенты k_ε , k_u , k_t равны 1, они учитывают влияние на сопротивление деформации каждого из указанных факторов при отклонении от базисных значений.

Термомеханические коэффициенты либо представляются в виде соответствующих экспериментальных графиков, либо записываются в виде уравнений

$$k_t = A_1 e^{-m_1 T}; \quad k_\varepsilon = A_2 \varepsilon^{m_2}; \quad k_u = A_3 u^{m_3},$$

где A_1 , A_2 , A_3 , m_1 , m_2 , m_3 — константы, зависящие от марки сплава, определяемые из экспериментов.

Несмотря на большой накопленный экспериментальный материал и простую методику его использования для практических расчетов, нельзя считать проблему по определению сопротивления деформации для прокатки решенной до конца. Одна из проблем, как уже отмечено, состоит в том, что при прокатке условия деформации и характер напряженного состояния отличны от растяжения. Это влияет на числовые значения прочностных характеристик. Метод определения сопротивления деформации непосредственно при прокатке в базисных условиях (при $l/h_{\text{сп}} = 1$) не получил широкого распространения, так как испытания трудны в исполнении и не могут быть проведены в широком диапазоне термомеханических параметров. Таких экспериментальных данных получено пока мало. При прессовании, ковке, поперечной прокатке и других технологических процессах данных еще меньше. Для этих процессов также используются кривыми растяжения, приведенными, например, в [5], и также с определенной долей условности.

Вторая проблема состоит в том, что сам процесс прокатки, как правило, осуществляется в несколько пропусков, пауза между которыми иногда бывает незначительной, чтобы успевали проходить полностью процессы разупрочнения, вязкие и релаксационные процессы. Все они протекают частично. Рассмотренные выше зависимости применимы только для медленных процессов, с большими паузами между проходами. На современных же высокоскоростных непрерывных листовых и проволочных станах скорости велики, паузы между пропусками малы, наклеп полностью не снимается и накапливается по пропускам. Пользование пластометрическими кривыми или кривыми растяжения приводит к существенным ошибкам. При горячей прокатке следует учитывать всю историю упрочнения и

разупрочнения металла, от начала до конца процесса. Экспериментально это сделать вряд ли удастся, хотя имеются попытки на ЭВМ “склеить”, смоделировать полную картину упрочнения и разупрочнения на основе поэтапных картинок с использованием изложенных экспериментальных данных.

В настоящее время интенсивно ведутся теоретические разработки, которые смогли бы правильно учесть взаимодействие всех факторов, влияющих на сопротивление деформации, применительно к многоступенчатым высокоскоростным непрерывным процессам прокатки. Разрабатываются сложные компьютерные программы, моделирующие все процессы упрочнения, разупрочнения, вязкости, релаксации и прочих явлений в процессе прокатки на реальном стане, от нагрева металла в печи до его полного охлаждения после прокатки.

Глава 6

ПРОКАТКА В КАЛИБРАХ

6.1. Основные понятия

Для прокатки сортовых профилей на валках нарезают *ручьи* (рис. 6.1). Ручьи всех валков, одновременно участвующих в формировании профиля, образуют *калибр*. На рис. 6.2 приведено несколько разных по форме калибров. Двухвалковые калибры (см. рис. 6.2, а, б) наиболее распространены на современных прокатных станах, реже применяются 3- и 4-валковые калибры. В качестве примера приведен круглый калибр, образованный двумя, тремя и четырьмя валками (см. рис. 6.2, в). Первый из приведенных на рис. 6.2, а 2-валковых калибров называется ящичным, на рис. 6.3, а на его примере даны основные термины, применяемые для обозначения элементов калибра. *Дно* калибра соответствует наименьшему диаметру валка (см. рис. 6.3, а), и для многих калибров дно калибра может состоять из одной точки. По *бурту* валка, разделяющему один калибр от другого, диаметр валка максимален. Пространство между двумя валками по бурту называют *разъемом* валков, а расстояние между валками по буртам в миллиметрах — *зазором* S , изменяя который можно регулировать *высоту* калибра h и размеры прокатываемой полосы. Видно, что высота калибра $h = 2h_p + S$, где h_p — глубина вреза ручья в валок (при условии, что врезы в оба валка, т. е. ручьи, одинаковы). *Стенки* калибра наклонены под углом ψ к вертикали. Величина $\text{tg}\psi \cdot 100\%$ называется *выпуском* калибра, выпуск измеряется в процентах и на современных станах изменяется от 1 до 10–12%. На многих калибрах (см. рис. 6.2) наклон стенок определяется конструкцией калибра. Без выпуска прокатка в калибре становится невозможной, так как полоса

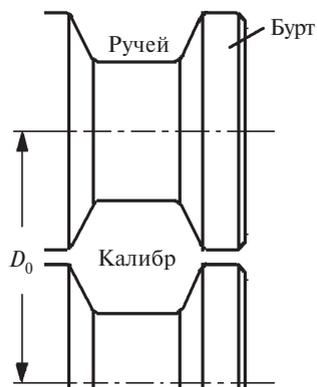


Рис. 6.1. Ручей и калибр на 2-валковом стане

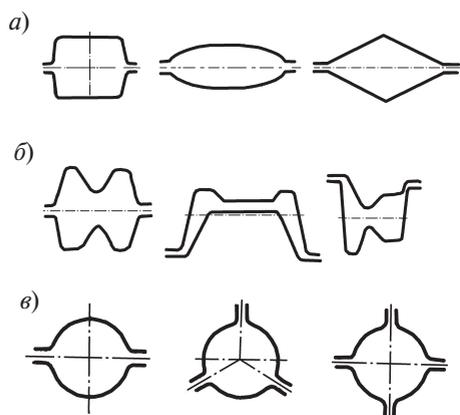


Рис. 6.2. Формы калибров

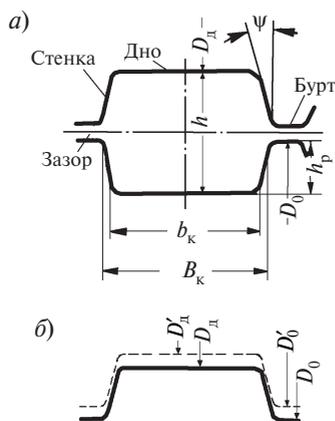


Рис. 6.3. Элементы калибра (а) и изменение диаметров (б) при переточке

при прокатке может не выйти из такого калибра и застрянет в нем, оковывая валки. Кроме того, только при наличии выпуска возможно восстановить калибр после его износа путем переточки валка за счет уменьшения диаметра по бурту и по дну (рис. 6.3, б).

Валки в процессе эксплуатации изнашиваются и периодически перетачиваются на меньший диаметр. Для каждого стана определен максимальный D_{\max} и минимальный D_{\min} диаметры валка по бурту, определяемые конструкцией стана и прочностью валка. Изношенный валок минимального диаметра либо отправляют в шихту, либо восстанавливают (наплавляют) вновь до максимального диаметра.

Коэффициентом переточки называется отношение

$$k = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_0}.$$

Коэффициент переточки валков на большинстве станов находится в пределах 0,08–0,12. Входящий в это выражение средний диаметр D_0 называется *номинальным диаметром* валка. Он необязательно точно равен полусумме упомянутых диаметров. Он служит важнейшей характеристикой сортового прокатного стана и входит в его название (стан 350, стан 250, стан 600).

По названию сортового стана можно примерно оценить его конструктивные параметры: габаритные размеры, размеры валков, станин, шпинделей и других основных деталей, примерную мощность привода и т. д. Кроме того, номинальный диаметр определяет возможности стана по сортаменту производимой продукции. Так, на станах 150–250 прокатывают мелкосортный прокат и катанку — прокат круглого сечения диаметром от 6 до 30 мм и равновеликие по площади сортовые профили других форм поперечного сечения. Станы 300–400 предназначены для прокатки среднесортной продукции — кругов диаметром 30–50 мм и равновеликих по площади сечения некруглых профилей. Крупносортные станы 500–650 прокатывают более крупные сортовые профили. Еще

более крупные станы 700—850 производят в основном заготовку для более мелких станов (заготовочные станы). Наиболее крупные обжимные станы — блюминги и слябинги — прокатывают крупные слитки в крупную заготовку квадратного (блюм) или прямоугольного (сляб) сечения. Эти станы имеют номинальный диаметр валков от 900 до 1300 мм и больше.

Двухвалковые калибры условно делят на две группы — простые и сложные, или фасонные. Простыми двухвалковыми калибрами мы будем называть такие, которые имеют две оси симметрии, причем задаваемая в них полоса также имеет вертикальную и горизонтальную оси симметрии. Это определение удобно, но не совсем точно. Существуют другие определения простых калибров. Ранее были приведены некоторые простые калибры (см. рис. 6.2, *a*): ящичный, овальный и ромбический, частным случаем которого является квадратный калибр. В таких калибрах прокатывают полосу с исходным сечением в виде прямоугольника или квадрата. На рис. 6.4, *a* и *б* представлены очень важные для теории особые случаи прокатки в очаге деформации с двумя осями симметрии — прокатка прямоугольной полосы на бурте или в щелевом калибре. Аналогичные схемы прокатки возникают при прокатке ступенчатых полос на гладкой бочке (рис. 6.4, *в*, *г*). По нашему определению эти калибры (и в общем случае — схемы прокатки) также следует отнести к разряду простых, хотя другие авторы считают их сложными. Кстати, и традиционную прокатку прямоугольной полосы на гладкой бочке можно рассматривать как частный случай прокатки с двумя осями симметрии.

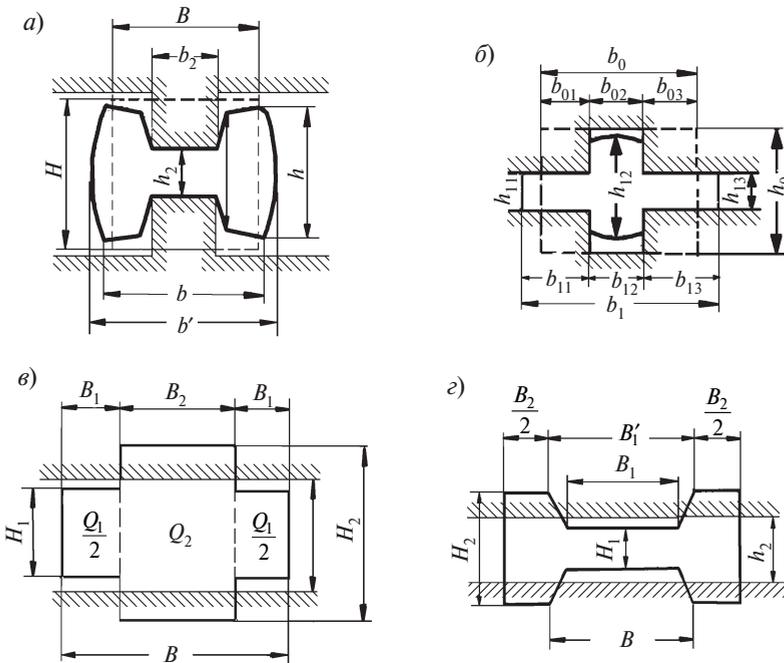


Рис. 6.4. Прокатка с двумя осями симметрии:

a — прямоугольная полоса на бурте; *б* — прямоугольная полоса в щелевом калибре; *в*, *г* — ступенчатая полоса на гладких валках

Все рассмотренные простые схемы прокатки имеют много общего и изучаются теоретически как отдельный класс задач прокатки в калибрах. Теория прокатки в простых калибрах — это самостоятельный раздел современной теории ОМД. Подходы к расчету формоизменения в этих калибрах позволяют понять особенности течения металла и в более сложных калибрах и приблизиться к разработке теории и методов расчета деформации и силовых параметров при прокатке в сложных калибрах, когда сохраняется только одна ось симметрии или оси симметрии отсутствуют.

6.2. Характеристики деформации металла в калибрах

Рассмотрим показатели деформации металла при прокатке в калибрах. Очевидно, для оценки высотной деформации непригодны такие показатели, как обжатие $\Delta h/h_0$ или $\ln(h_0/h_1)$, так как по ширине полосы высота переменна. Однако они применяются на практике, потому что просты. В этом случае абсолютное обжатие Δh и высота h_0 измеряются по максимальному размеру. Аналогично с той же долей условности применяют на практике показатель уширения $\Delta b/\Delta h$. По-прежнему наиболее теоретически обоснованными характеристиками деформации являются смещенные объемы или их аналоги — смещенные площади. На рис. 6.5 приведена прокатка ромбической полосы в квадратном (диагональном) калибре по этапам. Если процесс заполнения очага деформации от момента захвата (сечение I—I) до выхода из валков (сечение IV—IV) разбить на отдельные этапы, то на каждом из них легко выделяются поэтапные смещенные объемы, точнее, поэтапные смещенные площади F_h и F_b . Суммарные смещенные объемы и смещенные площади F_h и F_b

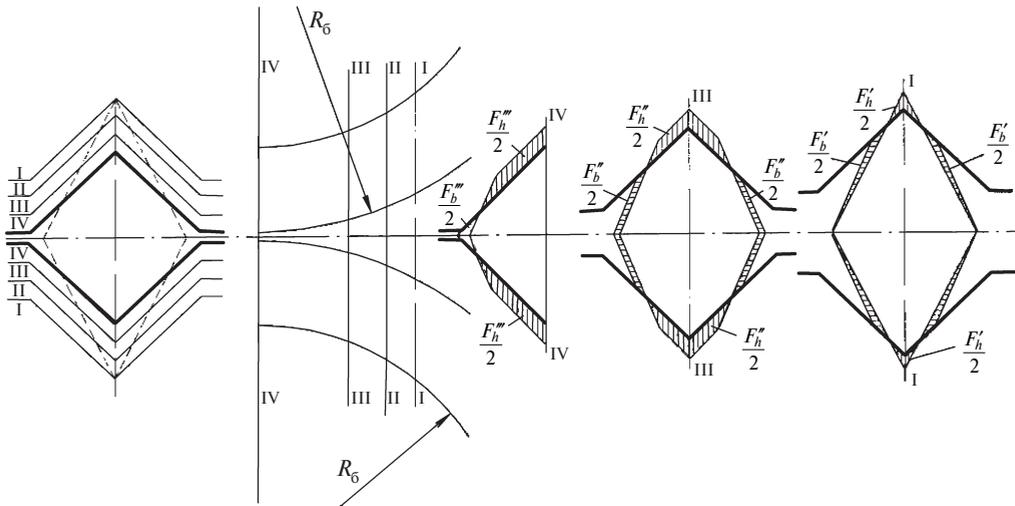


Рис. 6.5. Процесс заполнения очага деформации и формирование смещенных площадей F_h и F_b при прокатке ромбической полосы в квадратном калибре

за весь период заполнения очага деформации равны сумме поэтапных значений, на рис. 6.6 суммарные смещенные площади заштрихованы по-разному. Помножив их на длину полосы l , получим смещенные объемы V_h и V_b . Очевидно, для фасонных полос также справедливо условие постоянства объема, записанное в виде $V_h = V_b + V_f$. Показатели уширения $A = V_b/V_h = F_b/F_h$ и удлинения $(1 - A)$ наиболее полно характеризуют средние уширение и удлинение полосы, поскольку отражают долю металла, смещаемого в том и другом направлениях. Многие авторы считают, что для характеристики деформации металла в калибрах необходимо оперировать только показателями, основанными на анализе смещенных объемов или смещенных площадей.

При прокатке в калибрах также часто употребляется удобный показатель вытяжки $\lambda = F_0/F_1$ как отношение площадей поперечного сечения полосы до и после прокатки.

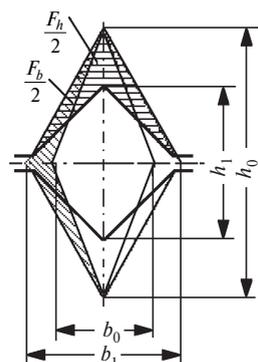


Рис. 6.6. Смещенные площади F_b и F_h по ширине и высоте при прокатке ромба в квадрате

6.3. Расположение калибров на валках

Катающим диаметром валков называется диаметр валка, по которому происходит соприкосновение калибра с металлом при прокатке. По контуру калибра в i -х точках катающие диаметры переменны, поэтому переменны окружная скорость валка $V = \pi D_k i n / 60$ и силы трения, воздействующие на полосу. Но полоса из валка выходит с одной определенной скоростью. Та точка калибра, в которой окружная скорость валка и фактическая скорость полосы совпадают, соответствует *среднему катающему диаметру* валков D_k . Во всех точках контура калибра, кроме точек, соответствующих среднему катающему диаметру, происходит скольжение металла относительно валков. Чтобы полоса не изгибалась при прокатке, средние катающие диаметры верхнего и нижнего валков должны быть одинаковыми.

Кстати, в литературе иногда пользуются только одним термином — “катающий диаметр”, подразумевая под ним средний катающий диаметр. Это связано с тем, что катающий диаметр в нашем определении (точнее, определении Б.П. Бахтинова) не столь часто применяется в расчетах, как средний катающий диаметр.

Нахождение среднего катающего диаметра валков представляет сложную задачу. В ящичных калибрах средний катающий диаметр принимают равным диаметру по дну калибра. В других калибрах средний катающий диаметр определяют эмпирическими формулами.

Средним диаметром валков D_0 2-валкового стана называется расстояние между осями валков (см. рис. 6.1). Соответственно, средний радиус валков $R_c = D_0/2$. Горизонталь, проведенная на расстоянии R_c от оси валка, называется *средней линией валков*.

Если катающий диаметр и средний радиус валков относятся к валкам и являются элементами валка, то нейтральная линия является элементом ка-



Рис. 6.7. Нахождение нейтральной линии профиля по центру тяжести сечения полосы

либра. *Нейтральной линией калибра* называется горизонтальная линия, относительно которой моменты продольных сил, действующих на полосу при прокатке со стороны верхнего и нижнего валков, равны. Очевидно, в калибрах с горизонтальной осью симметрии, в том числе во всех простых калибрах, нейтральная линия проходит по этой оси.

При отсутствии горизонтальной оси симметрии предложено несколько методов нахождения нейтральной линии. Отметим только два наиболее распространенных. Первый основан на наблюдениях, показывающих, что нейтральная линия калибров проходит вблизи центра тяжести площади, ограниченной контуром калибра. На рис. 6.7 приведен калибр для прокатки швеллера, на котором нейтральная линия проведена через центр тяжести сечения. Для его нахождения профиль разбили на отдельные простые элементы, например $bb'c'c$, $amhg$ и $mbdf$ (для левой половины профиля) с площадями соответственно F_1 , F_2 и F_3 и координатами центра тяжести y_1 , y_2 и y_3 относительно произвольно проведенной горизонтальной линии. Координата центра тяжести

$$y = \frac{F_1 y_1 + F_2 y_2 + F_3 y_3}{F_1 + F_2 + F_3}.$$

Линия, проходящая через центр тяжести сечения профиля, строго говоря, не имеет никакого отношения к продольным касательным силам, действующим в очаге деформации. По определению нейтральную линию следует искать через эти силы. Разобьем профиль на отдельные полоски шириной b_i , где i — номер полоски (рис. 6.8, а). Проведем произвольную горизонтальную ось x . Расстояние от оси до искомой нейтральной линии — координату нейтральной линии — обозначим y_c . Координаты каждой из полосок по контуру верхнего и нижнего валков обозначим соответственно y_{iB} и y_{iH} . Аналогично радиусы верхнего и нижнего валков по контуру полосок равны R_{iB} и R_{iH} . На нейтральной линии радиусы верхнего и нижнего валка одинаковы и равны R_c . Если на каждую из полосок действует продольное касательное напряжение τ_i , то получаем равенство сумм моментов по верхнему и нижнему валкам:

$$\sum_B R_i \tau_i b_i l_i = \sum_H R_i \tau_i b_i l_i.$$

Запишем его следующим образом:

$$\sum_B (R_c + y_c - y_i) \tau_i b_i l_i = \sum_H (R_c - y_c + y_i) \tau_i b_i l_i.$$

Простые преобразования приводят к виду

$$y_c \left(\sum_B \tau_i b_i l_i + \sum_H \tau_i b_i l_i \right) = \sum_B y_i \tau_i b_i l_i + \sum_H y_i \tau_i b_i l_i + R_c \left(\sum_B \tau_i b_i l_i - \sum_H \tau_i b_i l_i \right).$$

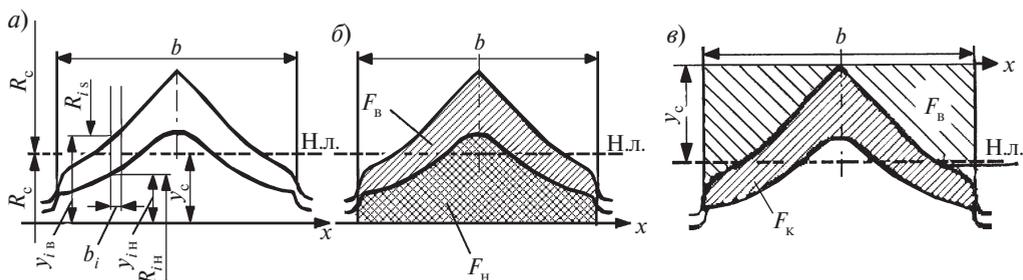


Рис. 6.8. Нахождение нейтральной линии (н.л.) калибра по методам Кучко (а, б) и Старченко (в)

Последнее выражение в скобках равно 0, так как каждое из слагаемых есть сила, действующая на валок, и по условию равновесия их сумма равна 0. Получаем выражение для вычисления координаты нейтральной линии

$$y_c = \frac{\sum_{B+H} y_i \tau_i b_i l_i}{\sum_{B+H} \tau_i b_i l_i}.$$

Произведение $\tau_i l_i b_i$ — это сила трения, действующая на i -ю полоску. Если эти силы усреднить и средние значения по верхнему и нижнему валку приравнять, что не всегда правомерно, то они сократятся, и получится очень удобная формула для расчета координаты нейтрального сечения

$$y_c = \frac{\sum_{B+H} y_i b_i}{\sum_{B+H} b_i} = \frac{F_B + F_H}{2b}, \quad (6.1)$$

где F_B — площадь фигуры, образованной контуром верхнего валка и осью x ; F_H — площадь фигуры между контуром нижнего валка и осью x .

На рис. 6.8, б площади F_B и F_H заштрихованы в разные стороны. Следует еще раз обратить внимание на то, как выглядят площади F_B и F_H , поскольку при их определении студенты часто ошибаются.

Итак, для нахождения нейтральной линии (по методу И.И. Кучко) необходимо провести произвольную ось x , две вертикальные линии, ограничивающие ширину калибра, и каким-то методом (например, планиметром или по клеточкам на миллиметровке) вычислить площади F_B и F_H , подставив их значения в вышеприведенную формулу.

Разновидностью метода И.И. Кучко следует считать метод Д.И. Старченко. Горизонтальную ось x проведем не произвольно, а через верхнюю точку профиля полосы в калибре. Заштрихованную вправо площадь F_B (рис. 6.8, в) необходимо измерить, а площадь F_H можно вычислить по формуле $F_H = F_B + F_K$, поскольку площадь калибра F_K известна. Тогда формула Кучко (6.1) превращается в формулу Старченко

$$y_c = \frac{F_B + 0,5F_K}{b}.$$

Если нейтральную линию калибра совместить со средней линией валков, то полоса должна выходить из валков прямолинейной, так как на этой линии моменты сил трения на обоих валках одинаковы. Однако на практике именно в этих условиях полоса часто искривляется то в одну, то в другую сторону из-за различных отклонений процесса от штатной технологии: неравномерности температуры металла по сечению, различия условий трения на верхнем и нижнем валке, неодинаковости износа валков и т. д. Чтобы полоса изгибалась всегда вниз, на сортовых станах нейтральную линию калибра размещают ниже средней линии валков на 1–3 мм. Полоса выпрямляется за счет проводковой арматуры (см. рис. 5.10).

6.4. Деформация металла в простых калибрах

Деформация металла в простых калибрах отличается от прокатки на гладкой бочке, так как по-разному действуют силы на металл в очаге деформации. Отличие состоит, прежде всего, в наличии боковых стенок калибра. Сравним схему действия сил в поперечном направлении (по оси x) на гладкой бочке (рис. 6.9, а) и в ромбическом калибре с углом θ наклона стенки калибра к горизонтали (рис. 6.9, б). На гладкой бочке уширению препятствует сила T , а в ромбическом калибре (как и в любом калибре с выпуклым контуром) в том же направлении действуют проекции силы трения T и нормальной силы P — соответственно T_x и P_x . Уширение в таком калибре будет меньше, чем на гладкой бочке. Следовательно, при равных условиях в калибрах с выпуклым контуром уширение меньше, а вытяжка больше, чем на гладкой бочке.

Разные по конструкции простые калибры различаются, прежде всего, по их вытяжной способности. В выпуклом калибре вытяжная способность выше, чем на гладкой бочке. Кроме того, боковой подпор металла увеличивает долю сжимающих напряжений, поэтому увеличивается пластичность и уменьшается склонность металла к трещинообразованию по кромкам полосы. Эти достоинства используются при прокатке в калибрах.

В калибре с вогнутой формой образующей (рис. 6.9, в) при разложении нормальной силы P ее составляющая P_x направлена навстречу составляющей силе T_x , и уширение увеличивается, а вытяжка падает. Вытяжная способность таких калибров ниже, чем при прокатке на гладкой бочке. Эти калибры применяются для быстрого наращивания ширины полосы, поэтому называются разгонными.

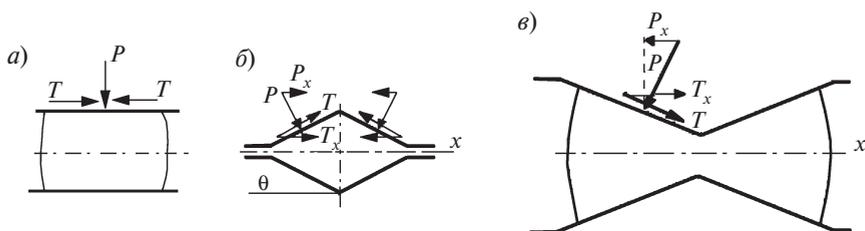


Рис. 6.9. Схема действия поперечных сил при прокатке на гладкой бочке (а), в ромбическом (б) и разгонном (в) калибрах

Соотношение сил на гладкой бочке и в калибре (см. рис. 6.9, а и б) примерно можно оценить, если сделать допущение о равенстве нормальных сил P в обеих схемах. Пусть закон трения на контакте будет таким: $T = \mu P$. Последнее допущение, как мы знаем, для горячей прокатки на средних очагах деформации грубо, тем не менее для оценки соотношения сил его можно принять. Коэффициент

$$k_1 = \frac{T}{T \cos \theta \pm P \sin \theta} = \frac{P\mu}{P\mu \cos \theta \pm P \sin \theta} = \frac{\mu}{\mu \cos \theta \pm \sin \theta}$$

характеризует, насколько уширение в выпуклом калибре меньше, а в вогнутом больше, чем уширение на гладкой бочке. Можно записать

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{К}} = k_1 \left(\frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{г.б}}$$

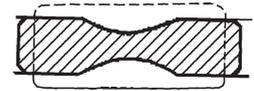
Коэффициент k_1 называется коэффициентом формы калибра, и в калибре с выпуклой формой контура он меньше 1, а с вогнутой — больше 1.

Вторая особенность деформации в калибрах состоит в том, что по ширине полосы деформация протекает неравномерно. Рассмотрим прокатку полосы переменной высоты на гладкой бочке (см. рис. 6.4, в) (другие схемы прокатки, приведенные на рис. 6.4, аналогичны). В этой схеме средний участок площадью сечения до прокатки Q_2 деформируется непосредственно валками, а объем Q_1 не подвергается их воздействию. При деформации вытяжка объема Q_2 могла бы быть равной λ_2 , если бы не было связи с недеформируемыми крайними участками $Q_1/2$. Однако вытяжка всех трех участков устанавливается одинаковой и равной λ . Она меньше значения λ_2 и, естественно, больше $\lambda_1 = 1$. В результате металл объема Q_2 , уменьшая свою вытяжку, *вынужденно уширяется*, его уширение будет больше, чем при отсутствии объемов Q_1 . В целом и уширение всей полосы будет больше, чем на гладкой бочке. Участки Q_1 , удлиняясь с вытяжкой λ , должны испытывать *утяжку* как по высоте, так и по ширине. Причем, как показали опыты, утяжка крайних участков происходит по высоте примерно на 10 % больше, чем по ширине:

$$b_{11} = \frac{1,1 \cdot b_{10}}{\sqrt{\lambda}} \quad \text{и} \quad h_{11} = \frac{h_{10}}{1,1\sqrt{\lambda}}$$

Увеличение уширения в калибре по отношению к гладкой бочке можно учесть коэффициентом k_2 , который в данном случае больше 1:

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{К}} = k_2 \left(\frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{г.б}}$$



Вынужденное уширение широко используется для быстрого наращивания ширины полосы или отдельных ее элементов. Например, за два пропуска (рис. 6.10) удастся значительно нарастить ширину полосы. В первом пропуске создается неравномерная высота полосы, а во втором — вынужденное уширение крайних ее участков.

Рис. 6.10. Схема быстрого наращивания ширины полосы

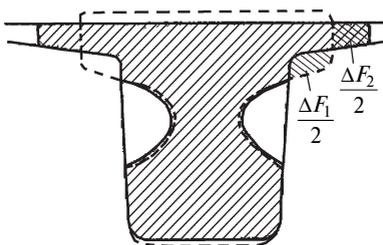


Рис. 6.11. Нарращивание ширины подошвы рельса

Аналогично решается задача наращивания ширины подошвы рельса (рис. 6.11), когда массивная малодеформируемая центральная часть профиля принудительно вынуждает течь металл интенсивно деформируемых частей ΔF_1 в сторону подошвы.

Подобный анализ позволяет проследить деформацию прямоугольной полосы в щелевом калибре (см. рис. 6.4, б). На крайних деформируемых участках металл вынужденно уширяется, а на среднем недеформируемом произойдет утяжка профиля по высоте. Если даже по дну высота щелевого калибра будет меньше, чем высота исходной заготовки, нет гарантии того, что щель при прокатке будет заполнена металлом. Металл всегда очень неохотно заполняет щелевые участки калибра, практически даже при больших обжатиях их не удастся заполнить на 100%. Требуется дополнительные меры, чтобы заполнение калибра произошло полностью. Экспериментально установлено, что в процессе деформации крестообразной полосы на гладкой бочке (см. рис. 6.4, в) или прямоугольной полосы в щелевом калибре (см. рис. 6.4, б) отсутствует перетекание металла между участками.

Можно сделать некоторые обобщения на случай прокатки любой полосы с неравномерным обжатием по ширине. Такую полосу по ширине можно разбить на несколько полосок (с номерами $i = 1, 2, \dots, n$) шириной b_i . Для каждой полоски существует естественная вытяжка λ_i , которая была бы реализована при отсутствии связи с другими полосками. Допустим, мы умеем рассчитывать естественные вытяжки λ_i . Суммарная работа по вытяжке всех n полосок на величину λ , равна работе целой полосы на фактической вытяжке λ . Отсюда можно выразить общую вытяжку через частные:

$$\ln \lambda = (Q_1 \ln \lambda_1 + Q_2 \ln \lambda_2 + \dots + Q_n \ln \lambda_n) / Q, \quad (6.2)$$

где Q, Q_1, Q_2, \dots, Q_n — соответственно площади поперечного сечения всей полосы и каждого из участков до прокатки.

Для случая прокатки, рассмотренного ранее (см. рис. 6.4, в), будем иметь

$$\ln \lambda = (Q_1 \ln \lambda_1 + 2Q_2 \ln \lambda_2) / Q.$$

Формула позволяет вычислить вытяжку полосы при неравномерном обжатии по ширине, если удастся определить (или приблизительно оценить) естественную вытяжку λ_i каждого i -го участка по ширине при условии отсутствия связи между участками, но это сделать не всегда просто даже при прокатке на гладкой бочке.

Итак, при прокатке в простых калибрах только два дополнительных фактора накладываются на те факторы, которые определяют деформацию металла на гладкой бочке: наклон стенок калибра и неравномерность деформации по ширине. Уширение в простых калибрах

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_к = k_1 k_2 \left(\frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{г.б.}$$

С этих позиций проанализируем уширение при прокатке квадратной полосы в овальном калибре. В первый момент после захвата деформация полосы (рис. 6.12, *a*) напоминает случаи, разобранные на рис. 6.4, *б* и *г*. Видно, что за счет наклона стенок калибра коэффициент $k_1 < 1$, но за счет неравномерности деформации заштрихованные деформируемые участки испытывают вынужденное уширение.

Разобьем по ширине полосу после деформации на n полосок (рис. 6.12, *б*). Нанесем контур, по которому происходит смещение высотного объема, т. е. соединим прямой линией точки А и Б. От этой линии до контура конечной полосы определим обжатие Δh_i . Если для каждой i -й полоски вычислить относительное обжатие $\Delta h_i/h_i$, то получим график обжатий. Видно, что обжатия крайних полосок значительно выше, чем центральных. В результате взаимодействия сильно и слабо деформируемых участков появляется вынужденное уширение крайних полосок и всей полосы, и поэтому коэффициент $k_2 > 1$. В слабо деформируемой средней части овальной полосы произойдет утяжка. Средняя часть полосы за счет утяжки вступит в контакт с валками позже, и длина дуги захвата здесь будет меньше, чем без учета утяжки.

По мере заполнения очага деформации средний угол наклона образующей калибра уменьшается, коэффициент k_1 уменьшается. Также снижается коэффициент k_2 , так как площадь недеформируемого участка сокращается. Вплоть до полного заполнения очага деформации коэффициент k_2 больше, а коэффициент k_1 меньше 1. Оба коэффициента частично компенсируют друг друга. Уширение в овальном калибре приблизительно равно уширению на гладкой бочке.

Можно отметить также, что при прокатке квадратной полосы в овальном калибре график распределения обжатий симметричен относительно вертикали, проведенной через среднюю полоску, поэтому полоса при прокатке не будет изгибаться ни влево, ни вправо. Серповидность полосы появляется при несимметричном распределении обжатий по ширине. В момент захвата (см. рис. 6.12, *a*) касание металла происходит в четырех точках калибра и силы, возникающие в них, взаимно уравниваются, поэтому полоса в калибре не смещается. Сумма моментов этих сил равна 0, поэтому скручивания полосы при прокатке не происходит. Проведенный анализ называется графическим. Он полезен всегда, так как позволяет наглядно продемонстрировать, как формируются вынужденное уширение и утяжка элементов профиля, а также изгиб, смещение и скручивание профиля при прокатке.

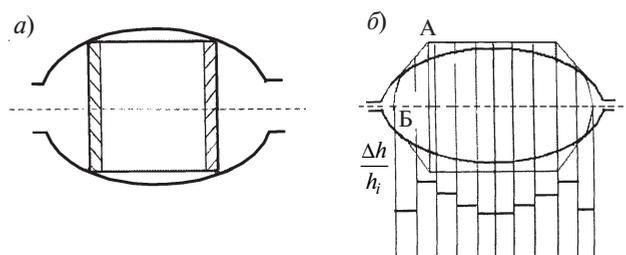


Рис. 6.12. Захват при прокатке квадратной полосы в овальном калибре (*a*) и графический анализ неравномерности деформации в калибре (*б*)

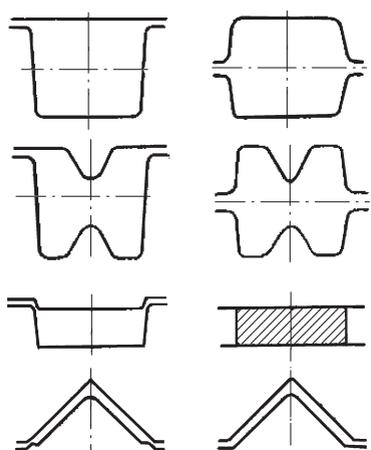


Рис. 6.13. Закрытые (слева) и открытые (справа) калибры

Анализ факторов, отличающих условия деформации в калибрах от прокатки на гладкой бочке, можно продолжать дальше в сторону более сложных калибров. Например, в закрытых калибрах появляется дополнительный фактор, уменьшающий уширение, — стесняющее действие на металл боковых стенок калибра, который можно учесть коэффициентом k_3 стеснения уширения.

Закрытыми называются такие калибры, в которых боковые стенки существенно сдерживают уширение по всей высоте профиля. На рис. 6.13 в левом столбце приведены закрытые, а в правом — аналогичные открытые калибры. Видно, что боковые стенки закрытых калибров не позволяют уширяться металлу по всей высоте, за исключением узкого участка вблизи разъема. Чтобы сократить объем этого участка, разъем

часто выносят за пределы калибра. Таким образом, наличие разъема за пределами калибра может служить формальным признаком закрытости калибра. Но основным признаком по определению остается дополнительное сдерживание уширения стенками калибра. Уширение металла контролируется шириной калибра, поэтому размеры профиля получаются точными.

В закрытом калибре коэффициент k_3 всегда меньше или равен 1. Если ширина полосы, поступающей в калибр, такова, что металл при прокатке не доходит до стенок калибра, то $k_3 = 1$ (но при этом польза от закрытых калибров теряется). Закрытые калибры широко используются при прокатке сложных профилей, так как позволяют создать требуемое уширение за счет конструкции калибра.

В общем случае анализ факторов, влияющих на уширение, полезен при прокатке как простых, так и сложных профилей. Принципиально для любого профиля можно выделить набор факторов, отличающих его деформацию от деформации на гладкой бочке, и каждый из факторов учесть коэффициентом k_i . Для простых калибров достаточно двух приведенных выше коэффициентов, поэтому по такому пути теория прокатки в калибрах накопила большой материал. Для анализа деформации более сложных профилей этот путь также применим. Для этого разбивают профиль по ширине на простые участки и для каждого из них оценивают значения коэффициентов k_1, k_2, \dots, k_i . Однако по этому пути теория прокатки в сложных калибрах развиваться не стала. Очевидно, что такая методика расчета деформации в сложных калибрах трудна и малоперспективна. Достоинства ее полностью реализуются при прокатке только в простых калибрах.

Проведенные рассуждения интересны только в том случае, когда уширение в простых калибрах сравнивается с уширением на гладкой бочке $\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{г.б}$ правильно подобранной прямоугольной полосы.

Б.П. Бахтинов считает, что для таких целей пригодна приведенная полоса. Приведенной называется такая прямоугольная полоса, ширина и площадь поперечного сечения которой равны ширине и площади сечения фасонной полосы. Высота приведенной полосы вычисляется из условий

$$b_{\Pi} = b; \quad F_{\Pi} = b_{\Pi} h_{\Pi} = F = \gamma b h; \quad h_{\Pi} = F/b.$$

Здесь коэффициент γ зависит от формы фасонного калибра. Для ромбического калибра, а также для квадратного, установленного по диагонали, $\gamma = 0,5$ (площадь ромба равна полупроизведению диагоналей). Для геометрически точного овала $\gamma = \pi/4 = 0,78$. Однако геометрически точных овалов на валках не нарезают, и овальными считают серию калибров, по форме напоминающих овал. Очень распространены однорядусные овальные калибры, которые образуются ручьями, нарезанными круглыми резцами с радиусом R (рис. 6.14, а). В этом случае (при зазоре $S = 0$) $\gamma = 2/3 = 0,67$. С увеличением зазора между валками значение γ увеличивается. Применяются также двухрадиусные овалы (рис. 6.14, б) и разновидности плоских овалов (рис. 6.14, в—д). Для большинства применяемых овалов $0,67 < \gamma < 0,75$. Для некоторых плоских овалов γ может быть выше этих пределов.

Приведенная полоса по Б.П. Бахтинову не нашла столь широкого применения в теории ОМД, как соответственная полоса. А.Ф. Головин определил соответственную полосу как прямоугольную полосу, у которой площадь и отношение осей такие же, что и у фасонной:

$$\frac{b_c}{h_c} = \frac{b}{h} \quad \text{и} \quad F_c = b_c h_c = \gamma b h.$$

Решая два уравнения с двумя неизвестными, находим размеры соответственной полосы:

$$h_c = h \sqrt{\gamma} \quad \text{и} \quad b_c = b \sqrt{\gamma}.$$

На рис. 6.15 показано, как фасонная (овальная) полоса по размерам соотносится с приведенной (см. рис. 6.15, а) и соответственной (см. рис. 6.15, б) полосой.

Для расчета уширения по методу приведенной или соответственной полосы даже для простого профиля необходимо провести предварительные эксперименты по определению коэффициентов k_1 и k_2 . Исследованием коэффициента k_1 занимался Н.Н. Павлов под руководством В.С. Смирнова.

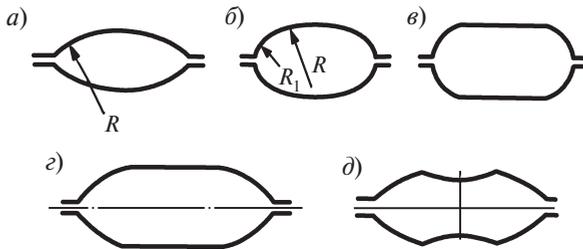


Рис. 6.14. Овальные калибры: однорядусный (а), двухрадиусный (б) и плоские (в—д)

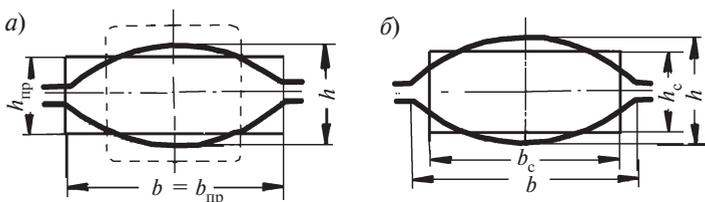


Рис. 6.15. Размеры фасонной и приведенной полосы (а) и фасонной и соответственной полосы (б)

Влияние на уширение и вытяжку неравномерности деформации по ширине изучали П.И. Полухин, М.С. Мутьев и др. Проведенные исследования показали, что даже для простых профилей для расчета уширения соответственную или приведенную полосу применять нецелесообразно, она не учитывает ряда существенных факторов, влияющих на уширение. Но главный недостаток состоит в том, что для нахождения требуемых поправочных коэффициентов требуется обработать большое количество экспериментального материала. Эти же эксперименты можно обработать проще, не прибегая к соответственной или приведенной полосе, составив экспериментальные формулы статистическими методами непосредственно для каждой системы калибров.

В теории прокатки широкое применение получили экспериментальные формулы, выведенные на базе приведенной полосы. Эти формулы мы приведем без вывода только для того, чтобы при необходимости можно было ими воспользоваться.

При прокатке квадратной полосы в ромбическом калибре (рис. 6.16, а)

$$\Delta b = \left(0,2 + 0,08 \frac{l}{b_{\text{ср}}} \right) \Delta h.$$

При прокатке ромбической полосы в квадратном калибре (рис. 6.16, б)

$$\Delta b = \left(0,2 + 0,12 \frac{l}{b_{\text{ср}}} \right) \frac{b_1}{h_0} \Delta h.$$

При прокатке квадратной полосы со стороны С в овальном калибре (рис. 6.17, а)

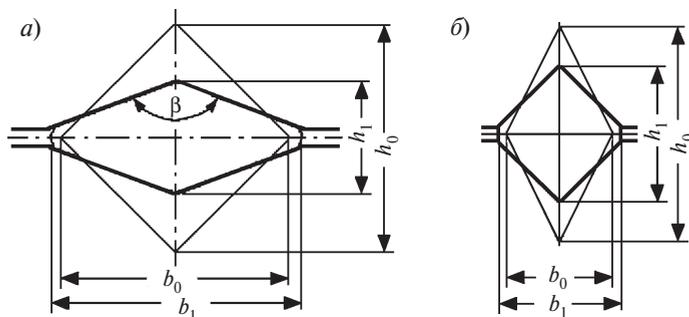


Рис. 6.16. Размеры исходной и конечной полосы при прокатке квадрата в ромбическом (а) и ромба в квадратном (б) калибре

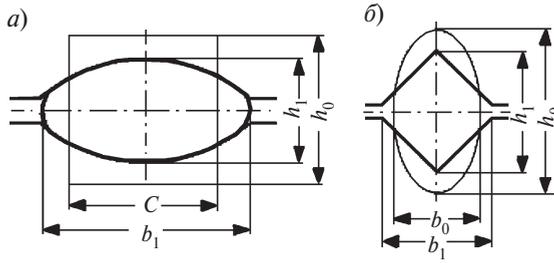


Рис. 6.17. Размеры полос при прокатке квадрата в овальном (а) и овала в квадратном (б) калибре

$$\Delta b = 0,4\sqrt{(C - h_{\text{нп}})R_k} \frac{C - h_{\text{нп}}}{C}.$$

При прокатке овальной полосы в квадратном калибре (рис. 6.17, б)

$$\Delta b = (0,3 - 0,35)\sqrt{\Delta h \cdot R_k} \frac{\Delta h}{h_{\text{нп}}}.$$

При прокатке ребрового овала в овальном калибре (рис. 6.18, а)

$$\Delta b = (0,40 - 0,50)\sqrt{\Delta h \cdot R_k} \frac{\Delta h}{h_{\text{нп}}}.$$

При прокатке овала в ребровом овальном калибре (рис. 6.18, б)

$$\Delta b = (0,25 - 0,30)\sqrt{\Delta h \cdot R_k} \frac{\Delta h}{h_{\text{нп}}}.$$

Во всех рассматриваемых формулах применена методика расчета параметров с использованием приведенной полосы:

$$b_{\text{cp}} = 0,5(b_0 + b_1); \quad h_{0\text{нп}} = F_0/b_0; \quad h_{1\text{нп}} = F_1/b_1; \quad \Delta h = h_{0\text{нп}} - h_{1\text{нп}};$$

$$D_k = D - h_{1\text{нп}}; \quad R_k = R - 0,5h_{1\text{нп}}; \quad l = \sqrt{0,5\Delta h \cdot D_k}.$$

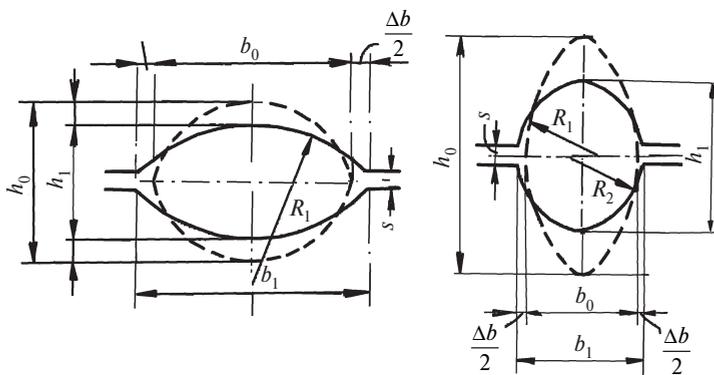


Рис. 6.18. Размеры полос при прокатке ребрового овала в овальном калибре (а) и овала в ребровом овальном калибре (б)

Таким образом, для расчета формоизменения фасонной полосы в калибре соответственную полосу не применяют. Однако соответственная полоса прочно закрепилась в теории прокатки в простых калибрах. Она оказалась незаметной для расчета усилия и момента прокатки. Усилие прокатки рассчитывается по формуле

$$P = p_{\text{cp}} F,$$

где F — площадь контактной площадки при прокатке.

На гладкой бочке $F = lb_{\text{cp}}$, а при прокатке в калибре длина дуги захвата переменна по ширине, и контактная площадка имеет сложную конфигурацию (рис. 6.19). Кроме того, при прокатке в некоторых калибрах (как, например, в рассмотренном выше овальном) возможна утяжка профиля, что уменьшает и искажает форму контактной площадки.

Многие авторы, например В.К. Смирнов и В.А. Шилов, предлагают сложные формулы для расчета контактной площадки для каждого случая прокатки, которые хорошо работают при компьютерных расчетах. Однако ранее В.С. Смирнов и Н.Н. Павлов показали, что при расчете давления удовлетворительные результаты получаются при замене фактической контактной площадки F на контактную площадку, рассчитанную по соответственной полосе F_c . Конечно, они не всегда равны, но несовпадение F и F_c находится в пределах допустимой точности расчета.

Итак, для расчета контактной площадки необходимо найти соответственные размеры полосы до прокатки h_{0c} , b_{0c} и после прокатки h_{1c} , b_{1c} , затем по соответственной полосе рассчитать:

$$\text{обжатие } \Delta h_c = h_{0c} - h_{1c};$$

$$\text{длину дуги захвата } l_c = \sqrt{0,5\Delta h \cdot D};$$

$$\text{контактную площадку } F_c = 0,5(b_{0c} + b_{1c}) l_c = F.$$

Еще более нечувствительной величиной к форме полосы оказывается среднее

давление на валки p_{cp} . Для расчета среднего давления важно, чтобы объемы и соотношения средних размеров очагов деформации для фасонной и прямоугольной полосы были равными. Именно таким требованиям наилучшим образом отвечает соответственная полоса. Показано, что при прокатке соответственной полосы на гладкой бочке и фасонной полосы в калибре силы прокатки примерно одинаковы. Давление металла на валки и силу прокатки удобно вычислять по соответственной полосе.

Аналогично среднюю температуру металла и работу деформации, зависящие от усредненных характеристик очага деформации, также можно вычислять по соответственной полосе. Средний катающий диаметр калибра

$$D_k = D_0 - h_c$$

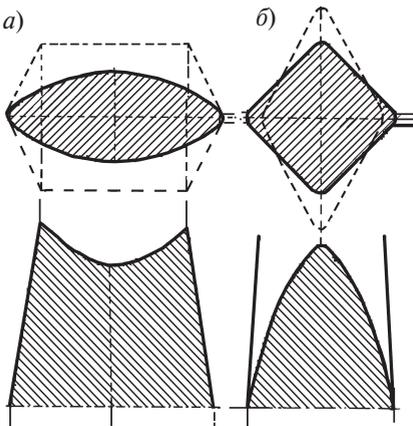


Рис. 6.19. Форма контактной площадки при прокатке квадрата в овальном калибре (а) и ромбической полосы в квадратном калибре (б)

(расстояние между центрами валков D_0 показано ранее (см. рис. 6.1)). Впрочем, при расчетах трех последних параметров неплохие результаты получаются также при использовании приведенной полосы.

6.5. Системы калибров

При прокатке простых сортовых профилей простые калибры объединяют в системы, которые позволяют обеспечить необходимые условия деформации металла, получить требуемые размеры поперечного сечения профиля с заданной точностью, а также обеспечить качество поверхности проката. Простые калибры проявляют свои деформационные возможности только в системе с другими калибрами.

В.К. Смирнов и В.А. Шилов [6] выделяют 10 различных систем калибров, применяемых при прокатке простых профилей. Каждая из систем имеет свои преимущества и недостатки, что предопределяет область ее применения. Мы несколько укрупним классификацию систем калибров и выделим принципиально отличные четыре системы.

6.5.1. Система ящичных калибров

На рис. 6.20 представлена последовательность прокатки в ящичных калибрах. В первый прямоугольный калибр задается квадратная полоса (показана тонкими линиями). После прокатки полоса кантуется на 90° и задается во второй калибр примерно квадратной формы. Прокатка в следующей паре калибров осуществляется по той же схеме. В общем случае можно считать, что в каждом нечетном калибре отношение осей калибра B/H (B — ширина, H — высота) значительно больше 1, поэтому нечетные калибры называются неравноосными. Соответственно, все четные калибры с отношением осей, равным или близким к 1, являются равноосными. Система калибров распадается на отдельные пары калибров: первый из калибров пары неравноосный, в него задается равноосная полоса, а второй — равноосный, в нем прокатывается неравноосная полоса. Ящичные калибры обладают рядом преимуществ по сравнению с другими системами. При прокатке в них по ширине полосы деформация равномерна. Это важное преимущество системы ящичных калибров, поскольку при прокатке не возникает вынужденного уширения и утяжки полосы.

Второе преимущество состоит в том, что боковые стенки калибра практически не препятствуют удалению окалины с боковых граней металла. В других калибрах боковые стенки работают интенсивнее, поэтому окалина может вдавливаясь в поверхность полосы. На всех станах после нагревательных печей рекомендуют обязательно устанавливать два-шесть ящичных калибра для сво-

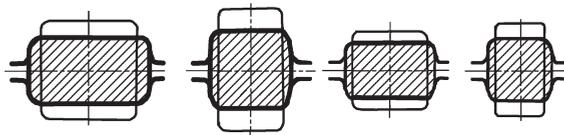


Рис. 6.20. Система ящичных калибров

бодного удаления печной окалины с поверхности металла. Таким образом, общая калибровка валков прокатного стана почти всегда начинается с ящичных калибров. Систему ящичных калибров применяют на обжимных и заготовочных станах, на крупносортовых станах, а также в первых (черновых) пропусках других сортовых станов (после печи).

Важно также, что в ящичных калибрах за счет изменения зазора между валками можно легко изменять размеры прокатываемой полосы, не искажая ее формы. Ящичные калибры имеют сравнительно неглубокий врез ручьев в валки, и закругленные стенки при переходе от стенок к дну обеспечивают их высокую прочность при прокатке.

К недостаткам ящичной системы калибров относится невозможность получения точного квадрата из-за наличия выпуска и закруглений в углах калибра. Ящичные калибры имеют невысокую вытяжную способность в связи с тем, что обжатие металла протекает практически только по высоте, и боковые грани полосы имеют тенденцию к значительному уширению.

Система ящичных калибров имеет много разновидностей, одна из которых представлена на рис. 6.21. Неравноосные калибры здесь заменены гладкой бочкой, что обеспечивает большую прочность и снижение расхода валков, отпадает необходимость растачивать калибры на валках, появляются большие

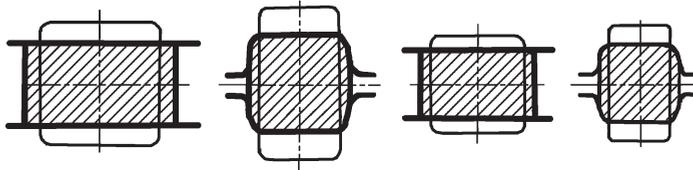


Рис. 6.21. Система гладкая бочка — ящичный калибр

возможности варьирования размерами полосы за счет изменения зазора между валками. Однако на гладкой бочке вытяжка происходит менее интенсивно, чем в калибре. Полоса теряет устойчивость и “сваливается” (рис. 6.22) уже при отношениях $h/b > 1,5-1,7$, а при прокатке за несколько пропусков — при меньших отношениях. В калибрах потеря устойчивости наступает при отношениях $h/b > 2,0-2,2$.

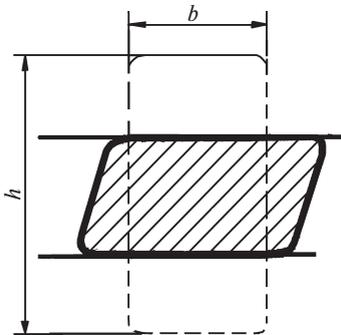


Рис. 6.22. Потеря устойчивости полосы при прокатке на гладкой бочке

Прокатку только на гладких валках во всех пропусках (бескалибровую прокатку) можно рассматривать как разновидность рассматриваемой системы. Если устранить основной недостаток бескалибровой прокатки — потерю устойчивости при низких отношениях h/b — за счет специально сконструированной и тесной арматуры, охватывающей прокат не только до входа в очаг деформации, но и в самом очаге и на выходе из него, то бескалибровая прокатка станет очень перспективным направлением сортопрокатного производства.

6.5.2. Система ромб—квадрат

В системе ромб—квадрат (рис. 6.23) нечетный неравноосный калибр представляет собой ромб с отношением осей от 1,2 до 2,2, врезанный в валки по диагонали. В него задается квадратная полоса также по диагонали. После прокатки полоса кантуется на 90° и задается в квадратный (четный равноосный) калибр, врезанный также по диагонали. Разновидностью этой системы является система ромб—ромб, в которой четный калибр имеет также ромбическую форму с очень небольшим отношением осей (до 1,2). Но такая система обеспечивает низкую вытяжку металла. Она малопроизводительна, поэтому редко применяется, сохранившись в основном на старых станах для прокатки крупных профилей из легированных марок стали.

Система ромб—квадрат имеет много преимуществ. Она более производительна, чем ящичная система, так как металл интенсивно деформируется одновременно по всем четырем граням. Вытяжка при этом больше, а уширение меньше. В каждом четном калибре получается геометрически точный квадрат. Размеры полос в калибрах в каких-то пределах также можно варьировать за счет изменения зазора между валками. Большой набор квадратных калибров позволяет получать широкую номенклатуру готовых квадратных профилей.

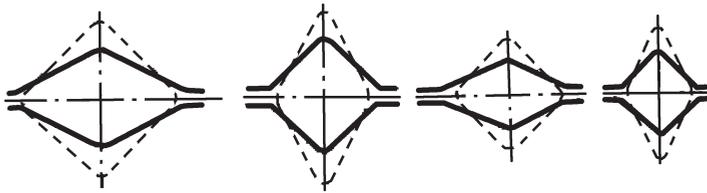


Рис. 6.23. Система калибров ромб—квадрат

К преимуществам системы следует отнести высокую устойчивость полосы при прокатке как в ромбическом, так и в квадратном калибре. Особо следует отметить, что распределение относительного обжатия $\Delta h_i/h_i$ по ширине полосы в данной системе почти равномерно, что доказывается графическим анализом (рис. 6.24). Для этого полосы до и после прокатки разбивают на n равных полосок и для каждой определяют $\Delta h_i/h_i$.

Важно также, что на всех современных высокоскоростных мелкосортных и среднесортных станах, имеющих чередующиеся клетки с горизонтальными и вертикальными валками, при использовании этой системы кантовка полосы на 90° как отдельная технологическая операция отсутствует.

Основные недостатки системы вытекают из геометрии калибров. Имея глубокий врез и острый угол по дну ручья, валки значительно ослаблены и могут сломаться по дну калибра. Крупные квадраты прокатывать по такой системе опасно. Квадраты со стороной выше 120–150 мм прокатываются только в ящичных калибрах. Кроме того, при прокатке по системе ромб—квад-

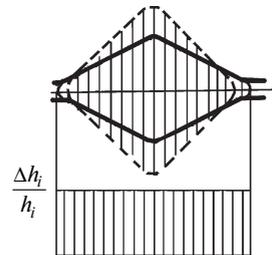


Рис. 6.24. Распределение обжатий по ширине полосы при прокатке квадрата в ромбическом калибре

рат углы полосы всегда располагаются в углах всех последующих калибров. За несколько пропусков при горячей прокатке достигается существенная разница в температуре углов и середины профиля, что ведет к появлению внутренних остаточных напряжений, неравномерности структуры и свойств металла, искажению профиля в процессе остывания.

6.5.3. Система овал—квадрат

В первый овалный (неравноосный) калибр указанной системы (рис. 6.25) задается квадратная (равноосная) полоса. После прокатки полученная овальная полоса кантуется на 90° и задается в квадратный калибр диагонального расположения, который классифицируется как равноосный. Для прокатки в следующем овалном калибре полученный квадрат следует скантовать на 45° . Видно, что прокатка по такой системе требует кантовки полосы после каждого пропуска — на 90° после неравноосного и на 45° после равноосного, что является недостатком по сравнению с системой ромб—квадрат. Причем на станах с чередующимися горизонтальными и вертикальными валками кантовки сохраняются.

По сравнению с системами ромб—квадрат и ящичной система овал—квадрат имеет два существенных преимущества. Во-первых, она более производительна, так как за пару пропусков (в нечетном неравноосном и четном равноосном) обеспечивает более высокую вытяжку. По сравнению со всеми другими эта система калибров самая высокопроизводительная и потому применяется тогда, когда требуется получить большую суммарную вытяжку, например на проволочных станах при прокатке катанки диаметром 6,3 или 5,5 мм из квадратной заготовки со стороной 100 мм. При использовании системы калибров овал—квадрат не только сокращается количество требуемых клетей, но и уменьшается перепад температур от начала до конца прокатки, стабилизируются параметры качества.

Во-вторых, как видно, в процессе прокатки идет смена углов профиля. В овалном калибре существующие углы квадрата сминаются, и новые углы формируются в новом месте. Температура металла по сечению полосы более равномерна, чем при прокатке по системе ромб—квадрат, меньше остаточных напряжений, меньше искажений профиля. При этой системе меньше падает температура полос к концу прокатки.

Тем не менее система овал—квадрат применяется не столь широко, как кажется при ее достоинствах. Это связано с тем, что трудно обеспечить высокое качество проката. Деформация металла по ширине полосы неравномерна, осо-

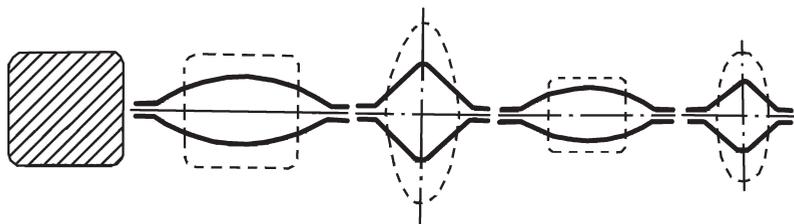


Рис. 6.25. Система калибров овал—квадрат

бенно при прокатке квадрата в овале. На графике распределения обжатия по ширине в овальном калибре (рис. 6.26, *a*) видно, что обжатия вблизи кромок более высокие, чем в средней части по ширине, что вызывает утяжку середины и вынужденное уширение профиля. Овальный калибр быстро изнашивается в местах соприкосновения с углами задаваемой в него квадратной полосы, что приводит к искажению размеров овальной, а затем и квадратной полосы.

При прокатке овала в квадратном калибре обжатия (рис. 6.26, *б*) также крайне неравномерны. Это приводит к образованию складок в углах квадратной полосы, которые при последующей прокатке закатываются, образуя дефекты (трещины или закаты) на готовом профиле.

В системе овал—квадрат вытяжка в овальном калибре всегда выше, чем в квадратном. Это приводит к неравномерной загрузке оборудования, неравномерной выработке овальных и квадратных калибров, что также сказывается на качестве проката.

Главным недостатком системы является склонность полосы к сваливанию в калибрах. Пусть в квадратном калибре произошло неполное заполнение калибра (рис. 6.27, *a*). Квадратная полоса с невыполненными углами далее попадает в овальный калибр и при захвате скручивается (рис. 6.27, *б*). Полученный овал будет искаженным (рис. 6.27, *в*). При прокатке в следующем квадратном калибре (рис. 6.27, *г*) овал “сваливается”, размеры его искажаются. Эти искажения накапливаются при переходе от одной пары калибров к другой. В целом точность и качество поверхности готового профиля будут невысокими. При больших отношениях осей овальной полосы при прокатке в овальном калибре происходит сваливание даже при идеальном заполнении всех калибров, поскольку проводки, удерживающие полосу в вертикальном положении, не могут быть очень тесными. За счет точности расчетов и правильности настройки калибров стана исправить этот недостаток не удастся.

Система овал—квадрат имеет много разновидностей. Все они отличаются конструкцией овального калибра. Ранее указывалось, что овалы применяются однорадиусные, двухрадиусные и плоские (см. рис. 6.14). Плоский овал обеспечивает более равномерную деформацию квадратной полосы по ширине, меньший износ овального калибра. Однако вытяжная способность в нем ниже, чем в овалах иной конструкции, поэтому он чаще всего применяется при прокатке крупных кругов.

В.К. Смирнов выделяет в самостоятельную систему калибров шестигранник—квадрат (рис. 6.28). Однако шестигранный калибр можно рассматривать как овальный калибр с плоскими гранями. Применение шести-

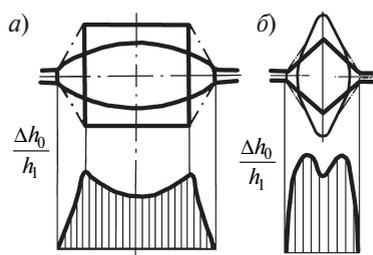


Рис. 6.26. Графический анализ распределения обжатия по ширине овального (*a*) и квадратного (*б*) калибров

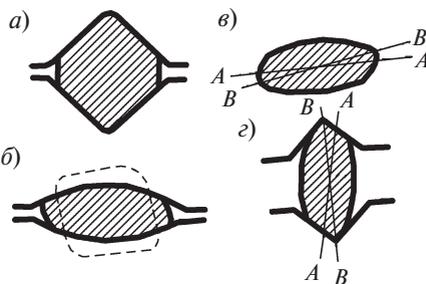


Рис. 6.27. Этапы искажения размеров профиля при прокатке по системе овал—квадрат

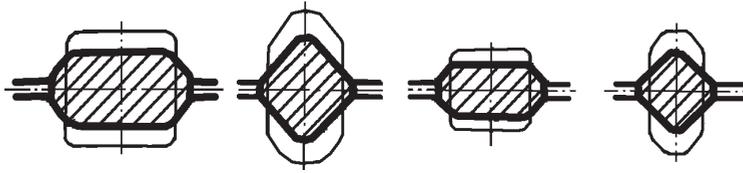


Рис. 6.28. Система калибров шестигранник—квадрат

гранных калибров взамен овальных позволяет устранить большинство недостатков системы овал—квадрат. В шестигранном калибре обжатия более равномерны по ширине, чем в овальном. Вытяжки в шестигранном калибре примерно равны вытяжке в квадратном калибре, что благоприятно сказывается на нагрузке оборудования и качестве проката. Положение проката в шестигранном и квадратном калибре устойчивое, конструкция проводковой арматуры, удерживающей шестигранник в квадратном калибре, проще, чем для овала. Указанные преимущества обеспечивают возможность применения шестигранных калибров не только на мелкосортных, но и на среднесортных и даже крупносортных станах. Но в общем случае вытяжная способность системы с применением шестигранных калибров ниже системы с однорядными овальными калибрами, допускающими большое отношение осей. Однако в системе шестигранник—квадрат есть возможности исправить этот недостаток.

6.5.4. Система овал — ребровой овал

Первый (неравноосный) калибр выполнен обычно в виде однорядного овала, а второй (равноосный) представляет собой овал, у которого вертикальная ось в 1,0–1,2 раза больше горизонтальной (рис. 6.29). При передаче полосы в очередной калибр полоса должна кантоваться на 90° . Но на непрерывных станах в клетях с чередующимися вертикальными и горизонтальными валками прокатка по рассматриваемой системе не требует кантовок. При этом полоса не скручивается при прокатке, улучшается качество поверхности проката. Кроме того, в данной системе нет калибров с углами, поэтому температура металла равномернее по сечению полосы, чем в других системах. Высотная деформация металла по ширине полосы равномерна как при прокатке ребровой овальной полосы в овальном калибре, так и неравноосной овальной полосы в ребровом калибре. Это способствует получению проката высокого качества. Наконец, прокатка по системе овал — ребровой овал малочувствительна к положению полосы в калибрах. Если полоса немного “сваливается” в калибре, то размеры

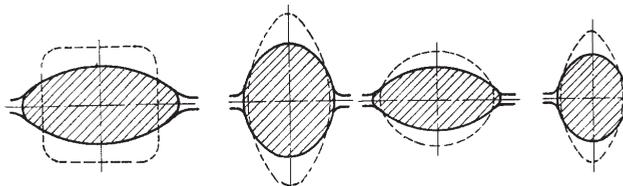


Рис. 6.29. Система калибров овал — ребровой овал

полученного проката практически оказываются такими же, как и при идеальном ее положении в калибре.

Система овал — ребровой овал широко применяется практически на всех станах, особенно для производства круглых и шестигранных профилей диаметром до 50 мм. Она имеет только один недостаток: вытяжная способность системы наименьшая по сравнению с другими приведенными системами. При больших суммарных вытяжках металла, например на проволочных и мелко-сортных станах, количество клетей стана может оказаться недостаточным, и вместо нее мы вынуждены будем применить более производительную систему овал—квадрат. К тому же, как отмечалось, при прокатке мелких профилей недостатки системы калибров овал—квадрат сглаживаются.

Разновидностью системы овал — ребровой овал является система овал—круг, когда ребровой овальный калибр имеет отношение осей, равное 1 (рис. 6.30). С этих позиций ее можно не выделять в самостоятельную систему, однако Б.П. Бахтинов и В.К. Смирнов считают, что она имеет достаточно много особенностей, позволяющих рассматривать ее отдельно. Прежде всего, по этой системе из каждого четного калибра можно получать готовую продукцию — круглый прокат, что позволяет сократить парк валков, уменьшить количество перевалок при переходе с одного профиля на другой. С другой стороны, вытяжная способность этой системы меньше, чем при использовании вытянутых по вертикали ребровых овалов.

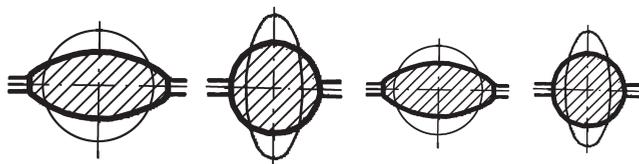


Рис. 6.30. Система калибров овал—круг

Одной из причин снижения вытяжек в системе овал—круг является меньшая устойчивость овальной полосы в круглом калибре по сравнению с устойчивостью этой же полосы в ребровом овальном калибре. В основном предпочитают применять такую систему при прокатке малопластичных легированных марок стали и при большом разнообразии размеров прокатываемых круглых профилей при невысокой производительности стана.

Вариацией системы калибров овал—круг является система плоский овал — круг (рис. 6.31). Замена однорадиусного овала на плоский овал позволяет улучшить устойчивость полосы, упростить конструкцию проводок, удерживающих овальную полосу в вертикальном положении при прокатке в круглом калибре,

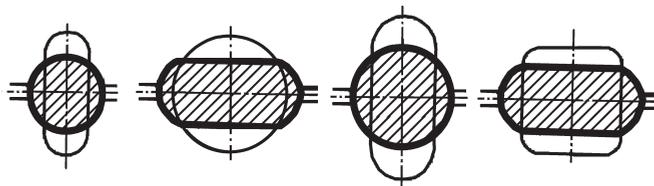


Рис. 6.31. Система калибров плоский овал — круг

увеличить коэффициент вытяжки в этом калибре. Однако появляются новые недостатки системы: возникает опасность переполнения круглого калибра с образованием брака, называемого лампасом. Неполное заполнение круглого калибра также вредно, так как обеспечивает низкую точность готового профиля. Система плоский овал — круг применяется на заготовочных и крупносортовых станах для получения трубной заготовки и крупных круглых профилей.

Развитием рассмотренной системы является система гладкая бочка — круг (рис. 6.32). Применение полосы, прокатанной на гладкой бочке, взамен овальной позволяет улучшить удаление окалины с проката, упростить конструкцию

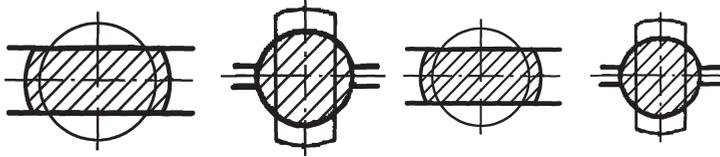


Рис. 6.32. Система калибров гладкая бочка — круг

валков и увеличить их прочность. Однако при этом ухудшается захват металла в круглом калибре, высока вероятность переполнения этого калибра. При прокатке круглой полосы на гладкой бочке высока неравномерность высотной деформации по ширине. Эта система применяется также на крупносортовых и заготовочных станах. Она может быть применена в качестве переходной системы при производстве полосовой стали и плющенко.

6.6. Вытяжная способность системы калибров

Выше дана общая характеристика каждой из систем калибров с позиций ее вытяжной способности. Заметим еще раз, что вытяжная способность — это максимально возможная вытяжка в паре калибров при заданной их геометрии. Однако вытяжная способность зависит не только от геометрии калибров, но и от многих других факторов, поэтому при определенных условиях прокатки в малопроизводительных системах удается значительно повысить вытяжки, и наоборот, высокопроизводительная система может обеспечивать невысокую вытяжку.

Не всегда стремятся выбрать систему вытяжных калибров с максимальной вытяжной способностью. Более правильным является выбор такой системы, которая при достаточно высокой вытяжной способности удовлетворяет требованиям по качеству и отвечает ряду других критериев: максимальной производительности стана, минимальному расходу электроэнергии на прокатку, минимальному расходу (износу) валков, более равномерной загрузке клетей стана и т. д. При наличии нескольких критериев для оценки рациональности калибровки применяют критерий C_B , характеризующий *степень использования вытяжной способности системы*. Он определяется как отношение фактической вытяжки в паре калибров λ_Σ к максимально возможной вытяжке в этой паре $\lambda_{\Sigma_{\max}}$:

$$C_B = \lambda_\Sigma / \lambda_{\Sigma_{\max}}$$

Оставшаяся доля величины $\lambda_{\Sigma_{\max}}$ составляет *запас вытяжной способности системы калибров*:

$$Z_B = 1 - \lambda_{\Sigma} / \lambda_{\Sigma_{\max}}$$

Основным фактором, определяющим вытяжную способность пары калибров, является отношение осей полосы в неравноосном калибре $a = b/h$. Чем больше это отношение, тем вытяжка в паре калибров больше.

Однако максимально возможное отношение осей ограничивается двумя факторами: максимально допустимый угол захвата $[\alpha]$ и устойчивость неравноосной полосы при прокатке в равноосном калибре. Кроме того, с ростом отношения осей неравноосной полосы возрастает разность вытяжек в первом и втором калибре. Практически во всех системах вытяжка в первом калибре λ_1 больше, чем во втором λ_2 , и их разница возрастает с ростом отношения осей, что ведет к неравномерной загрузке калибров и неравномерному износу. Таким образом, слишком большие отношения осей также нерациональны. Экспериментальные исследования, обобщающие заводские калибровки валков, показывают, что для каждой системы можно определить рациональные отношения осей неравноосной полосы. На рис. 6.33–6.35 показаны экспериментальные кривые, полученные для основных систем. По горизонтальной оси отложена

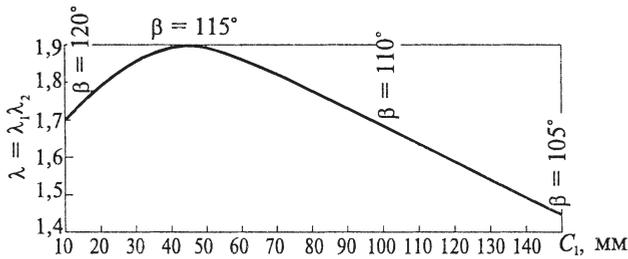


Рис. 6.33. Практически реализуемые вытяжки в паре калибров системы ромб—квадрат

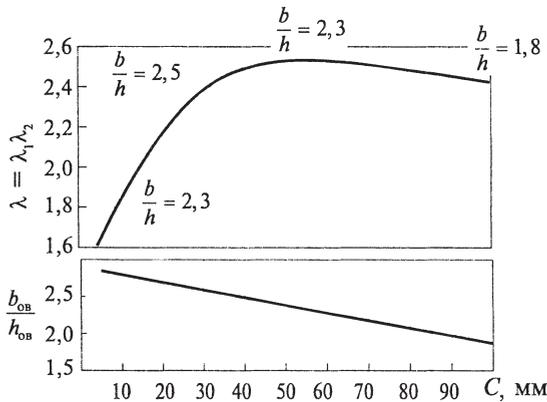


Рис. 6.34. Вытяжка в паре калибров системы овал—квадрат

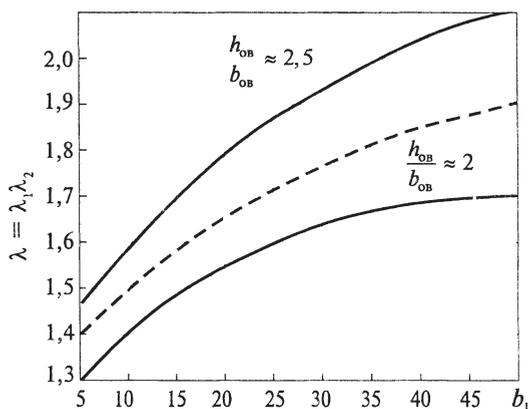


Рис. 6.35. Вытяжка в паре калибров системы овал — ребровый овал

сторона квадрата C (диаметр круга) или ширина ребрового овала b , прокатанного в равноосном калибре пары, а по вертикальной оси — парная вытяжка. Видно, что все кривые однотипны.

На рис. 6.34 приведены также рекомендуемые отношения осей овала для системы овал—квадрат. С ростом размера C до 50 мм практически для всех систем можно увеличивать отношение осей неравноосного сечения (или угла β при вершине ромбического калибра), увеличивая вытяжную способность системы. Это связано с тем, что до 50 мм основным ограничением является устойчивость неравноосной полосы в равноосном калибре. Устойчивость повышается с увеличением размеров проката. При размерах квадрата выше 50 мм вытяжка ограничена максимальным углом захвата и снижается с ростом размеров проката. Соответственно, снижаются значения отношений осей неравноосного сечения.

Более систематические исследования с расчетом вытяжной способности калибров вариационными методами проведены В.К. Смирновым, В.А. Шиловым и др., результаты обобщены в номограммах, приведенных в [6]. Для примера одна из номограмм показана на рис. 6.36 (для системы овал—квадрат). Авторы установили, что на вытяжку влияет не только отношение осей a , но и задаваемый угол захвата в равноосном калибре α_1 и приведенный диаметр валков равноосного калибра:

$$A_1 = D_1/H_1,$$

где D_1 — диаметр валка по дну равноосного калибра; H_1 — высота равноосного калибра.

На графике вытяжка в паре калибров $\lambda_2 = \lambda_1\lambda_2$.

Вытяжки в каждом калибре λ_1 и λ_2 связаны между собой соотношением

$$e = \frac{\lambda_2 - 1}{\lambda_1 - 1}.$$

Коэффициент e , как правило, меньше 1, что свидетельствует о том, что вытяжка в первом неравноосном калибре пары больше, чем во втором равноосном. Значение e зависит как от системы калибров, так и от отношения осей

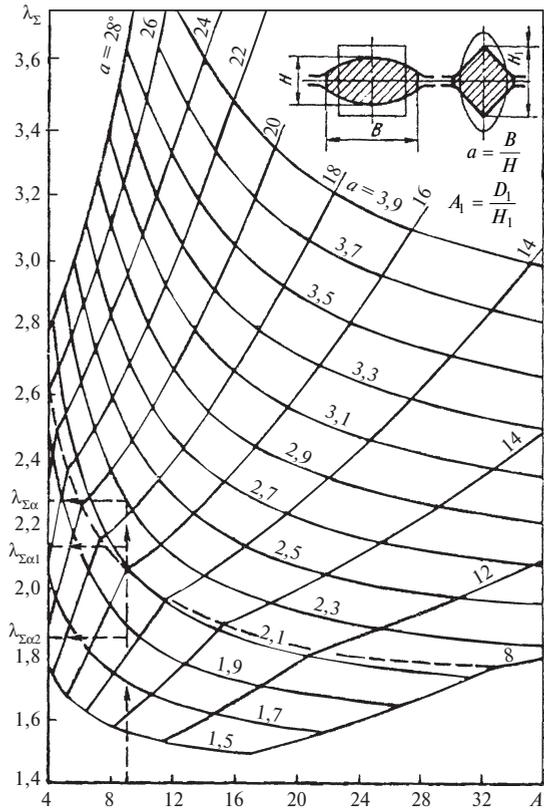


Рис. 6.36. Кривые предельных вытяжек по В.К. Смирнову

неравноосного калибра a . Чем больше отношение осей и чем больше вытяжка в паре калибров λ_{Σ} , тем меньше значение e и тем неравномернее распределены вытяжки между калибрами пары. Это влияет на параметры загрузки клеток (силы, моменты, работу деформации и пр.) и связанный с ними износ калибров. Кроме того, значения коэффициента e снижаются по мере уменьшения размеров прокатываемой полосы (размера C).

Очевидно, по ходу прокатки необходимо снижать отношение осей неравноосных калибров, увеличивая при этом равномерность загрузки и износа калибров и снижая парные вытяжки λ_{Σ_i} , где i — номер пары калибров. По М.С. Мутьеву, для системы ромб—квадрат при $C \leq 40$ мм $e = 0,9-0,82$ (в среднем $e = 0,85$), при $C > 40$ мм $e = 1,0-0,9$ (в среднем $e = 0,95$). Для системы овал — ребровой овал при отношении осей овала $b/h = 2,5$ $e = 0,7$ и при $b/h = 2,0$ $e = 0,8$.

В системе калибров овал—квадрат коэффициент e может меняться в широких пределах: от 0,9 до 0,3. В среднем при $C > 20$ мм $e = 0,6-0,85$ и при $C < 20$ мм $e = 0,3-0,7$. Особенно резко снижается значение e и увеличивается неравномерность загрузки калибров при парных вытяжках $\lambda_{\Sigma} = 2,0-2,4$ на мелких квадратах ($C = 10-20$ мм) (рис. 6.37).

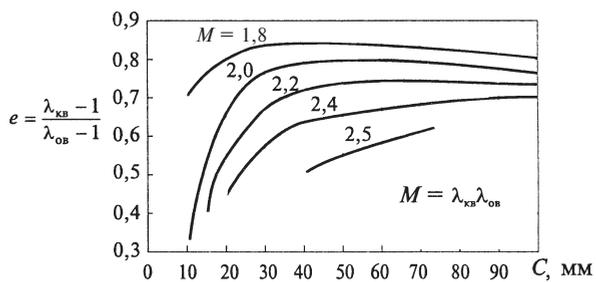


Рис. 6.37. Соотношение между вытяжками λ_1 и λ_2 в паре калибров системы овал—квадрат

Номер клетки

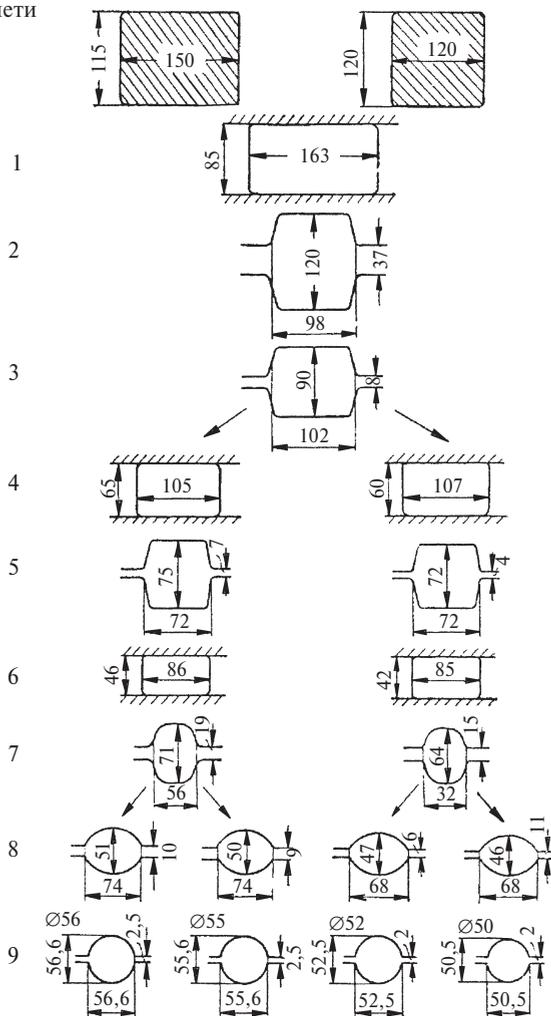


Рис. 6.38. Универсальная калибровка валков крупносортного стана

При выборе калибровки по вытяжной способности важно учитывать, что калибровки валков на промышленных станах строятся по универсальному принципу. Универсальной называется такая калибровка, в которой одни и те же калибры используются при прокатке разных профилеразмеров. Как правило, первые черновые калибры являются общими для всех профилей. Затем от некоторых калибров цепочки разветвляются, и только в последних и чистовых пропусках каждому профилю соответствуют калибры с расчетными размерами.

Универсальность калибровки позволяет экономить парк валков, сократить длительность перевалок и перенастроек. При прокатке простых профилей универсальность калибровки является одним из основных критериев ее рациональности. При этом вытяжная способность калибров отходит на второй план.

На рис. 6.38 приведена одна из универсальных калибровок 9-клетевого крупносортового стана. Как видно, ящичный калибр третьей клетки, и ребровые овальные калибра седьмой клетки используются для получения нескольких профилеразмеров.

6.7. Оценка деформации при прокатке в сложных калибрах

Системы калибров для прокатки сложных профилей, имеющих одну ось или не имеющих осей симметрии, нестандартны. Для большинства из них схеме прокатки приходится конструировать калибровщику, опираясь на свой опыт и литературные данные. При построении системы калибров очень важно уметь оценивать деформацию металла в каждом калибре.

Формул для расчета уширения, вытяжки, утяжки в сложных калибрах нет. Очевидно, не реально в каждом из них проводить экспериментальные исследования, хотя для тех калибров, для которых получены экспериментальные данные, процесс конструирования калибровки значительно облегчается.

По существу, единственным способом оценки деформации в сложных калибрах остается графический анализ условий деформации металла. При прокатке простых профилей также отмечалась полезность графического анализа, но для фасонных профилей значимость его возрастает. Поэтому подробнее рассмотрим технику его выполнения и задачи, которые можно решить графическим методом.

Рассмотрим прокатку квадратной полосы в ступенчатом калибре (рис. 6.39). Кстати, калибр может быть как открытым (см. 6.39, *a*), так и закрытым (см. рис. 6.39, *b*). При графическом анализе накладываем форму заготовки на форму калибра, затем вертикальными линиями разбиваем профиль на отдельные элементы, каждый из которых представляет какую-то простую схему прокатки, чаще всего прокатку на гладкой бочке, и строим график обжатий элементов по ширине профиля. В общем случае можно разделить профили до и после прокатки на n полос равноудаленными вертикальными сечениями, как это делалось для простых профилей. В нашем случае можно ограничиться выделением только трех элементов, хотя ничто не изменится, если количество их будет больше. Видно (см. рис. 6.39, *a*), что деформация по ширине профиля неравномерна: правая часть получает большее обжатие, чем левая. Вытяжка будет также неравномерной, что приведет к серповидности полосы, полоса

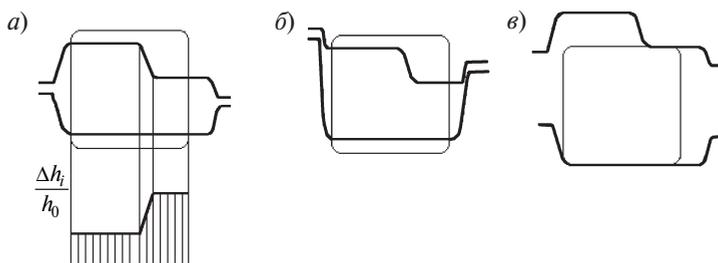


Рис. 6.39. Схема прокатки квадратной полосы в открытом (а) и закрытом (б) фасонном калибре и графический анализ условий ее деформации (в)

будет изгибаться в сторону меньшего обжатия. Правая часть полосы за счет связи с левой не может иметь свободную вытяжку, поэтому определенная доля металла будет вынуждена течь в ширину, образуя повышенное уширение всей полосы в целом. В свою очередь, правая часть будет принудительно растягивать левую часть, что приведет к утяжке этого участка. Высота его будет уменьшаться за счет утяжки до момента касания с валками. Кроме того, давление металла на валки резко перераспределится. К правой части требуется подвести энергию, необходимую для ее вытяжки и дополнительного растяжения левой части. Давление металла на правый участок калибра будет больше, чем на гладкой бочке при том же обжатии. Наоборот, деформация левой части частично осуществляется за счет энергии правой, поэтому давление на валки здесь будет меньше, чем при свободной прокатке на гладкой бочке. Таким образом, графический анализ дает возможность сделать качественные оценки характера деформации металла в калибрах.

На основании этого анализа уже можно сформулировать одно из требований к построению систем сложных калибров: необходимо так располагать заготовку в калибрах и так строить форму калибра, чтобы деформация приближалась к равномерной.

Изгиб полосы отсутствует, если график симметричен относительно средней вертикали по ширине. Если рассматриваемый калибр и заготовку расположить

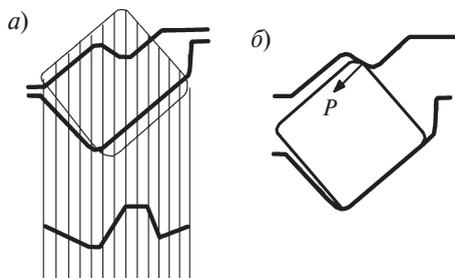


Рис. 6.40. Схема прокатки ступенчатой полосы в косо расположенном калибре (а) и графический анализ деформации (б)

наклонно, то деформация по ширине выравнивается (рис. 6.40). При правильном угле наклона график обжатий почти симметричен. Изгиб полосы уменьшается и, возможно, совсем исчезает.

Видимо, при прокатке сложных профилей из простой заготовки не избежать неравномерности деформации. Поэтому систему калибров строят так, чтобы неравномерность деформации приходилась на первые по ходу прокатки калибры. Пока раскат имеет большую площадь поперечного сечения, температура металла высока, изгиб полосы не так опасен,

как в последних чистовых калибрах. В чистовых пропусках прокатка с равномерным обжатием практически обязательна.

Графический анализ позволяет также оценить устойчивость полосы при захвате в калибрах. Для этого необходимо проанализировать положение валков в момент захвата полосы (см. рис. 6.39, *в* и 6.40, *б*). Параллельно себе переносим контуры верхнего и нижнего ручьев до первого касания заготовки. Видно, что в первом случае (см. рис. 6.39, *в*) левая часть заготовки по верхнему валку при захвате “зависает”. Эта часть заготовки будет испытывать утяжку и изменять свою форму неопределенным образом. Такие объемы металла нежелательны. Но со стороны нижнего валка условия прокатки вполне стабилизированы, благодаря чему недостатки деформирования левой части заготовки в целом значительно сглаживаются. Отсюда еще одно правило, которым руководствуются при построении системы сложных калибров: если по одному валку захват ненадежен и неустойчив, то по другому валку необходимо обеспечить почти одновременный захват по всей ширине полосы.

При анализе захвата (см. рис. 6.40, *б*) можно отметить, что под действием силы P заготовка в начальный момент будет поворачиваться до тех пор, пока нижняя боковая стенка не коснется заготовки. В данном случае угол поворота будет небольшим, но в целом нельзя допускать поворота заготовки при захвате. Это может привести к тому, что из валков полоса выйдет закрученной в виде штопора. Отсюда еще одно правило: силы, появляющиеся в момент захвата, должны быть уравновешены, т. е. момент этих сил должен быть равен 0. В этом случае не произойдет скручивания полосы.

Рассмотрим еще один пример (рис. 6.41), где представлен анализ деформации в одном из промежуточных калибров при прокатке фасонного профиля на лабораторном стане. При анализе накладываем контуры входящей и выходящей из исследуемого калибра полос, вертикальными сечениями разделяем их на n полосок. Из-за уширения значения ширины полосок на входящей и выходящей полосах не совпадают. Но мы для удобства крайние полоски отбросили, что позволило посчитать все остальные полоски равными по ширине до и после прокатки.

Далее проверяем:

распределение обжатий по ширине калибра по верхнему и нижнему валкам (Δh_{1i} и Δh_{2i} соответственно); при несимметричном распределении полоса будет изгибаться (в нашем случае вправо);

положение валков при захвате (показано штриховой линией); касание полосы валками должно быть надежным хотя бы с одним валком, силы и моменты должны уравниваться ($\Sigma P = 0$; $\Sigma M = 0$); в рассматриваемом калибре захват нельзя считать надеж-

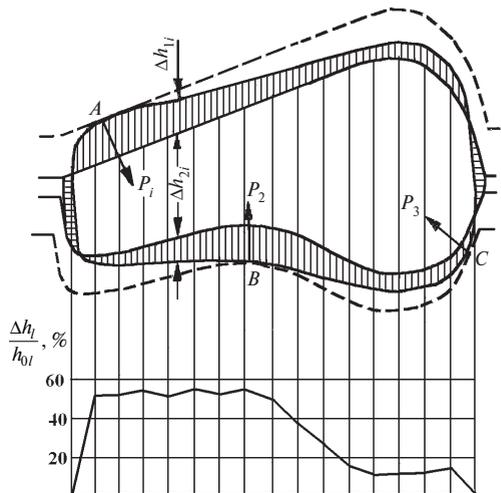


Рис. 6.41. Графический анализ в черновых фасонных калибрах

ным, так как касание осуществляется только в трех точках A , B и C . Силы P_1 , P_2 и P_3 дают равнодействующую не равную 0, следовательно, профиль при прокатке будет смещаться влево. Правая часть калибра будет не заполнена металлом, а левая — переполнена, и образуется заусенец; моменты этих сил в сумме также не равны 0, поэтому полоса будет скручиваться при захвате против часовой стрелки;

возможность утяжки; в рассматриваемой калибровке часть полосы между точками B и C имеет обжатие, близкое к 0; здесь будет утяжка, и возможно, полоса при прокатке не будет контактировать с валком; это свидетельствует о некоторой неопытности калибровщика, выполнившего данную калибровку (калибровку выполнял студент);

возможность вынужденного уширения и утяжки; повышенное обжатие по кромкам полосы свидетельствует о том, что полоса будет иметь вынужденное уширение; если слева простор для уширения достаточен, то справа он не предусмотрен, это может привести к выходу металла в зазор и к образованию заусенца. Опытная прокатка по данной калибровке полностью подтвердила выводы графического анализа.

Как видно, графический анализ дает весьма существенную качественную информацию.

Глава 7

ПРОДОЛЬНАЯ ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ПРОКАТКА

7.1. Общие положения

Производство периодических профилей сосредоточено в основном на машиностроительных заводах и отличается мелкосерийностью и многообразием технологических схем. Их трудно систематизировать и классифицировать, и нет смысла описывать существующие технологические рецепты. Но теорию продольной периодической прокатки рассмотреть весьма полезно, так как это позволит лучше понять закономерности очага деформации при продольной прокатке вообще. В современных учебниках теории продольной периодической прокатки уделено незаслуженно малое внимание.

При производстве крупных заготовок на обжимных станах, а также при прокатке толстых листов широко применяют прокатку с переменным обжатием, поэтому элементы периодической прокатки встречаются достаточно часто. Периодическим прокатом называются полосы переменного сечения по длине. Стилизованная периодическая полоса (рис. 7.1) состоит из нескольких повторяющихся *элементов*, отмечаемых на полосе *метками*, по которым после прокатки производится разрезка полосы. Каждый элемент состоит из отдельных *фигур*. Очевидно, при одном обороте валков получается целое число элементов полосы, и суммарная их длина определяет средний диаметр валка D . Каждый элемент включает фигуры с постоянной и изменяющейся высотой. Элементы с переменной высотой называются *переходными участками*. Как видно, заготовка высотой



Рис. 7.1. Стилизованная полоса, полученная продольной периодической прокаткой

H при прокатке на переходных участках получает переменное обжатие (убывающее на участке 1 и возрастающее на участке 2). Периодический прокат, разрезанный на элементы, далее может служить заготовкой для последующей штамповки иковки (или другой операции). За счет более рационального, чем на обычном прокате, распределения металла по длине при штамповке или механической обработке достигается значительная экономия металла и уменьшаются отходы. Периодической прокаткой получают обычно крупные заготовки для штамповки (рис. 7.2).

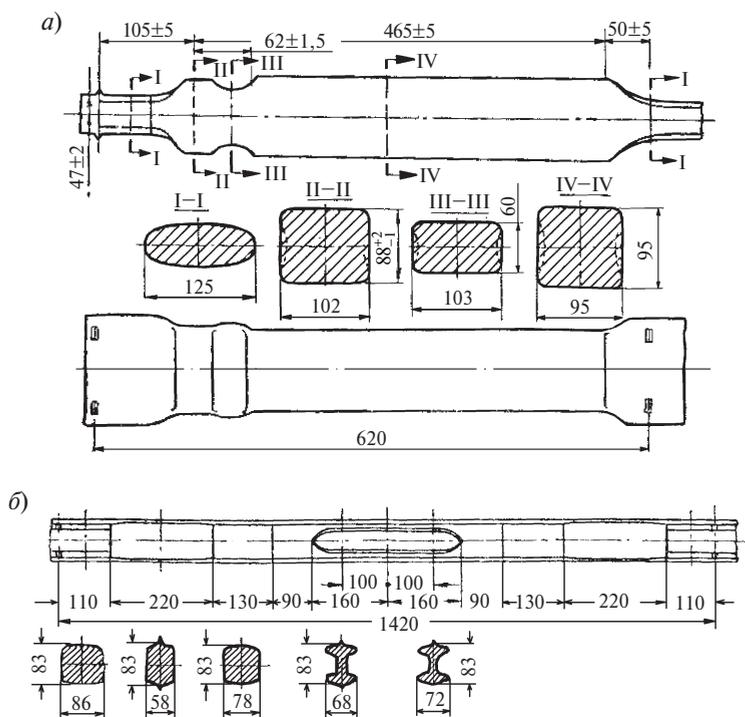


Рис. 7.2. Крупные заготовки под штамповку, полученные продольной периодической прокаткой:
a — заготовка коленчатого вала; *b* — заготовка оси автомобиля

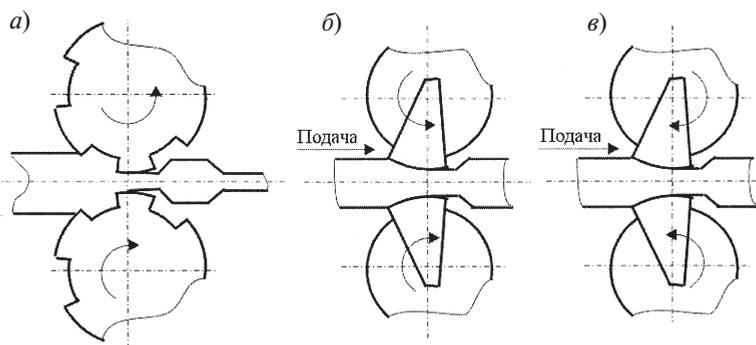


Рис. 7.3. Схемы продольной периодической прокатки на валках (а) и ковочных вальцах с прямой (б) и обратной подачей (в)

На рис. 7.3 приведены принципиальные технологические схемы продольной периодической прокатки. При прокатке на 2-валковом прокатном стане (см. рис. 7.3, а) валки имеют переменный радиус окружности по образующей. Такой стан может быть оборудован устройством для задачи полосы в валки. Необходима также постоянная регулировка угла поворота верхнего вала, чтобы фигуры обоих валков совпадали.

Стан периодической прокатки требует значительное время на перевалку с одного профиля на другой, поэтому процесс выгоден только при сравнительно больших партиях производимых профилей. При небольших объемах и большом разнообразии прокатываемых изделий более выгодна прокатка на ковочных вальцах (см. рис. 7.3, б). На консольные валки привинчиваются быстро сменяемые вставки-секторы с соответствующими калибрами, формирующими профиль. Ковочные вальцы первого типа имеют валки, вращающиеся в направлении прокатки, и в этом смысле процесс ничем не отличается от станом продольной периодической прокатки. В кузнечном производстве чаще применяются ковочные вальцы, вращающиеся навстречу подаче металла (см. рис. 7.3, в). В этом случае угол охвата секторов не превышает 270° , и оставшийся участок валков, расстояние между которыми превышает высоту заготовки, используется для подачи заготовки. Один конец ее удерживается в задающем устройстве, которое по заданной программе (с помощью ЭВМ) подает в вальцы строго определенную порцию металла. Прокатка в калибрах осуществляется в обратном направлении, формируя один период профиля (один или несколько элементов). Автоматизированное задающее устройство позволяет поворачивать профиль, дозировать подачу и осуществлять прокатку одного и того же периода в разных калибрах. Вместе с автоматизированным кузнечным или штамповочным прессом такие ковочные вальцы образуют роботизированный комплекс.

7.2. Очаг деформации

Продольная периодическая прокатка, в отличие от обычной, является нестационарным процессом, в котором на переходных участках параметры очага деформации непрерывно меняются. Прокатка на стационарных участках, име-

ющих постоянные радиусы R_{\min} и R_{\max} , ничем не отличается от обычной прокатки, и интерес представляют только переходные участки. На переходных участках радиусы вала переменны.

Рассмотрим прокатку с убывающим обжатием участка I стилизованной полосы (см. рис. 7.1). Формирование этого участка начинается тогда, когда радиус валков начинает уменьшаться от R_{\max} . Этот момент зафиксируем углом поворота валков $\delta = 0$. При повороте валков на угол $\delta > 0$ в контакт с валками входит точка A (рис. 7.4), которой соответствует текущий радиус вала R ($R_{\max} > R > R_{\min}$). Полоса покидает валки в точке C , которая находится левее точки B , расположенной на вертикали OB , соединяющей центры валков. Дуга AC , по которой металл контактирует с валками, называется *дугой касания*, которой соответствует угол касания $\angle AOC = \theta$. Как и при обычной прокатке, дуге AN соответствует зона отставания, в которой скорость металла меньше окружной скорости валков, а дуге NC — зона опережения, в которой металл опережает валки. Точке N соответствует нейтральный угол γ .

Угол AOB между вертикалью и текущим радиусом R называется *углом захвата* α . Обращаем внимание на то, что при периодической прокатке угол касания θ и угол захвата α не совпадают, тогда как при обычной прокатке они были равными. Из чертежа следует, что $\angle COB = \psi$ (поскольку $OC \perp CD$). Поэтому

$$\alpha_y = \theta_y + \psi \quad \text{или} \quad \theta_y = \alpha_y - \psi. \quad (7.1)$$

Символ “ y ” указывает, что равенство (7.1) соответствует переходному участку с убывающим обжатием.

В точке A проведем перпендикуляр к радиусу R , который пересечет горизонтальную ось полосы под углом α . В этой же точке проведем касательную к образующей валков. Она пересекает горизонтальную ось под углом $\alpha + \psi$, так как угол между проведенными линиями по определению равен углу подъема клина ψ . Эти построения помогут нам проанализировать силы, действующие на валки при захвате.

На этом же переходном участке установим, как должен изменяться текущий радиус вала R для получения прямолинейного клиновидного участка полосы с углом наклона ψ ($\psi = \text{const}$).

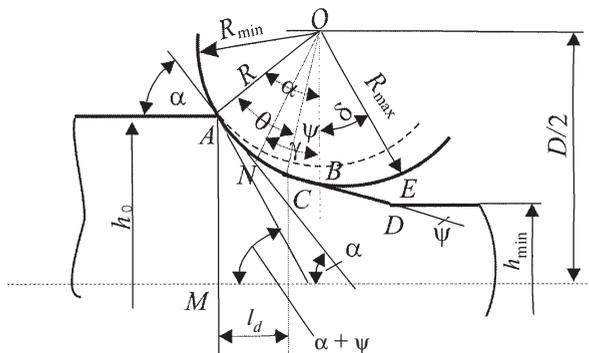


Рис. 7.4. Переходный участок I (см. рис. 7.1) с убывающим обжатием

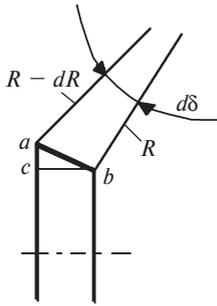


Рис. 7.5. Элемент переходного участка

При повороте валков на угол $d\delta$ радиус вала уменьшится на dR (поэтому с минусом). Из треугольника abc (рис. 7.5) с учетом опережения следует

$$\sin \psi = -\frac{dR}{(1+S)Rd\delta}.$$

Обозначим постоянную величину

$$(1+S)\sin\psi = m.$$

Уравнение запишется в виде

$$-md\delta = \frac{dR}{R}.$$

Интегрируя, получаем

$$\ln R = -m\delta + C.$$

Константа C определяется из граничных условий: при $\delta = 0$ $R = R_{\max}$.

Окончательно получаем

$$R = R_{\max}e^{-m\delta}.$$

Таким образом, радиус вала должен изменяться по экспоненте. Такая кривая получается в том случае, когда валки изготавливают на токарном станке со смещением центра закрепления оси вала. На фрезерном станке выбирают радиус вала по прямой линии, поэтому на фрезерованных валках на полосе будут получаться не прямолинейные переходные участки. Это важно учитывать при изготовлении точных деталей. Но при производстве заготовок для штамповки непрямолинейность переходного участка не имеет большого значения.

Очевидно, можно полностью повторить рассуждения относительно изменения радиуса валков на участке 2. Поскольку на возрастающем радиусе dR имеет знак “плюс”, а при $\delta = 0$ $R = R_{\min}$, то получим

$$R = R_{\min}e^{+m\delta}.$$

Практические выводы останутся прежними.

Для переходного участка 2 (см. рис. 7.1) с нарастающим обжатием введем для него индекс “н”. На этом участке (рис. 7.6) точка C выхода металла из валков будет располагаться правее точки B , находящейся на вертикали по центрам валков. Дуга касания AC и соответствующий ей угол касания θ будет боль-

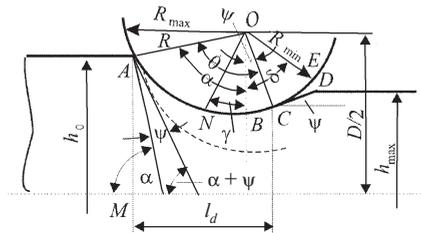


Рис. 7.6. Переходный участок 2 (см. рис. 7.1) с нарастающим обжатием

ше угла захвата α , который по-прежнему определяется как угол между текущим радиусом R и вертикалью OB . Можно записать

$$\theta_n = \alpha_n + \psi. \quad (7.2)$$

Если при прокатке с убывающим обжатием угол касания был меньше угла захвата, то при прокатке с нарастающим обжатием он больше. В точке A проведем перпендикуляр к радиусу R и касательную к образующей валка. Первая линия пересечет горизонтальную ось под углом α , а вторая — под углом $(\alpha - \psi)$.

В процессе прокатки на гладкой бочке углы захвата и касания α и θ совпадают, все геометрические параметры очага деформации не изменяются во времени. При периодической прокатке на переходных участках эти углы непрерывно меняются. При прокатке с убывающим обжатием происходит уменьшение угла захвата и угла касания. Соответственно, при возрастающем обжатии эти углы возрастают по ходу прокатки. При прокатке на первом участке длина дуги захвата l_d непрерывно уменьшается, а на участке с нарастающим обжатием — увеличивается. Отсюда следует, что при прокатке на переходных участках все остальные параметры очага деформации также непрерывно меняются.

7.3. Параметры очага деформации

7.3.1. Длина дуги захвата

Рассмотрим подробнее характер изменения длины дуги контакта l при прокатке полосы, имеющей все участки (см. рис. 7.1). На стационарных участках 4 и 3 она постоянна и соответственно такова:

$$l_4 = R_{\max} \alpha_4 \quad \text{и} \quad l_3 = R_{\min} \alpha_3. \quad (7.3)$$

Длину дуги захвата AC на нестационарных участках 1 и 2 часто определяют по формуле

$$l_d = R_{\text{cp}} \theta, \quad (7.4)$$

где $R_{\text{cp}} = \sqrt{R_{\max} \cdot R_{\min}}$.

На участке 1 (с убывающим обжатием) длина дуги захвата скачкообразно уменьшается в связи со скачкообразным падением угла θ (см. формулу (7.1)) и по ходу прокатки продолжает падать, так как уменьшается угол θ (рис. 7.7).

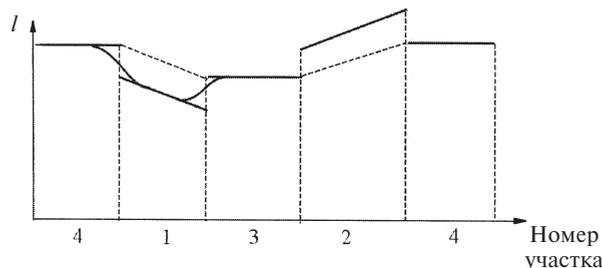


Рис. 7.7. Изменение длины дуги захвата при прокатке стилизованной полосы (см. рис. 7.1)

На участке 3 с постоянным обжатием длина дуги контакта вновь скачкообразно возрастет из-за возрастания угла θ до угла α . Фактически скачки будут сглажены, так как какое-то время в очаге деформации будут находиться два соседних участка одновременно.

Аналогично при перемещении полосы с участка 3 на переходный участок 2 в соответствии с формулой (7.2) длина угла касания скачкообразно возрастает и затем продолжает расти в связи с ростом угла θ . Скачки также будут сглажены, но общая тенденция сохранится.

Некоторые авторы предлагают вычислять среднюю длину дуги захвата на нестационарных участках как полусумму значений, вычисленных для соседних стационарных участков: $l_1 = l_2 = l_{cp} = 0,5(l_4 + l_3)$. На самом деле средняя длина дуги захвата на участке с убывающим обжатием меньше, а на участке с возрастающим обжатием больше среднего значения l_{cp} . Также ошибочно считать, что длина дуги захвата на участке 1 плавно изменяется от l_4 до l_1 , а на участке 2 — от l_3 до l_4 , как показано на рисунке тонкими штриховыми линиями. По тем же соображениям не дает точного результата формула (7.4). Ошибка будет тем выше, чем больше угол наклона клина ψ .

7.3.2. Условия захвата

Рассмотрим условия захвата при периодической прокатке на нестационарных участках. На рис. 7.8, а приведено положение нормальной P и касательной T сил при захвате на участке 1. Последняя сила направлена по нормали к касательной образующей валков, следовательно, под углом $(\alpha + \psi)$ к горизонтали. Из теории продольной прокатки известно, что, проектируя обе силы на ось x , получаем условие захвата полосы валками $(\alpha + \psi) < \mu$, где μ — коэффициент трения. Предельные силы трения реализуются при $(\alpha + \psi) = \mu$. Если бы в данных условиях осуществлялся захват полосы на стационарном участке, то сила P' была бы направлена по нормали и сила T' по касательной к окружности радиусом R , т. е. под углом α . Горизонтальная проекция $T'_x < T_x$, поэтому условия захвата на участке 1 с убывающим обжатием хуже, чем при стационарной прокатке. Мы знаем, что захват полосы при стационарной прокатке по запасу необходимых сил трения — это самый неблагоприятный момент прокатки, и тем более невыгодно начинать прокатку периодической полосы с захвата на участке 1.

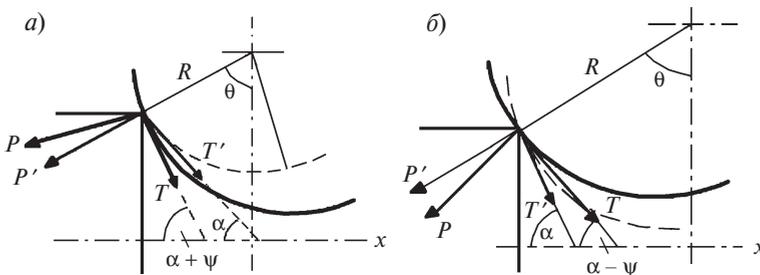


Рис. 7.8. Нормальная и касательная силы при захвате полосы на нестационарных участках с убывающим (а) и нарастающим (б) обжатием

Аналогичный анализ условий захвата на нестационарном участке 2 (рис. 7.8, б) приведет к выводу, что на этом участке $T_x > T'_x$, и захват происходит более благоприятно, чем на стационарном участке. Допустимо более высокое обжатие, чем на цилиндрическом участке бочки валков. Таким образом, задача полосы в валки должна осуществляться в тот момент, когда в зазоре между валками находятся стационарный 3 или нестационарный 2 участок (см. рис. 7.1). Необходимо задающее устройство, согласованное с углом поворота валков, которое позволяет осуществить захват полосы на указанных участках.

После заполнения очага деформации металлом, как известно, на стационарных участках должно выполняться условие $(\alpha \pm \psi) \leq \gamma$, где γ — нейтральный угол, поэтому появляется почти двойной запас сил трения.

Ранее отмечалось, что при полном заполнении очага деформации условия по трению иные, чем в момент захвата. Коэффициент трения при захвате выше, чем при установившейся прокатке. Поэтому после захвата максимальное обжатие возрастает не в два раза, а меньше. Это учитывается при назначении обжатий на участках 1 и 4.

Как и при обычной прокатке, большое влияние на условия захвата оказывает образующаяся при захвате площадка смятия, которая зависит от скорости подачи полосы в валки и от соотношения скоростей полосы и валков. В отличие от обычной прокатки захват должен быть осуществлен надежно и точно в требуемом положении валков, чтобы совместились фигуры валков и полосы. Теоретически для совмещения фигур скорость подведения полосы к валкам должна быть равна линейной скорости валков. Однако практически она должна быть немного выше, с тем чтобы за короткое время Δt образовалась достаточная площадка смятия S для осуществления вторичного захвата полосы. При периодической прокатке иногда применяют вталкивающее устройство. Оно способствует совмещению фигур при захвате, кроме того, облегчает захват. При наличии вталкивающего устройства возможен захват при углах выше рассчитанных теоретически.

7.3.3. Угол нейтрального сечения γ , опережение и отставание

Нейтральное сечение при нестационарной прокатке разделяет зоны опережения и отставания, как и при обычной прокатке. На низких очагах, когда на поверхности контакта отсутствуют зоны прилипания, зоны скольжения разделяются вертикальной плоскостью, соответствующей на контактной площадке центральному углу γ .

Допустим, что давление и силы трения постоянны по поверхности контакта, а уширение отсутствует. Рассмотрим мгновенное положение очага деформации при прокатке на переходном участке с возрастающим обжатием (рис. 7.9). Зона отставания находится на участке AN , а зона опережения простирается по дуге NC . В зоне отставания горизонтальная проекция нормальной силы P направлена против, а силы трения T по ходу прокатки. В зоне опережения на участке NB проекции обеих сил направлены против хода прокатки, а на участке BC , протяженность которого соответствует углу $-\psi$, проекция силы P — по ходу, а силы T — против хода прокатки.

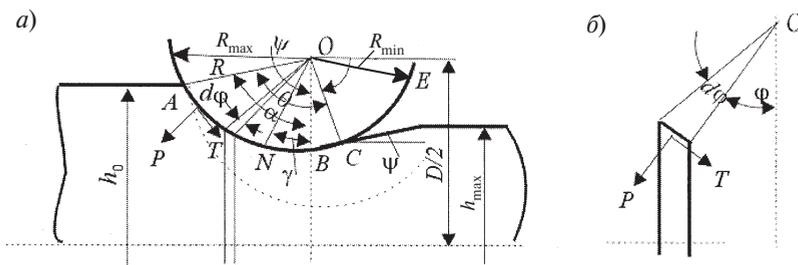


Рис. 7.9. Равновесие сил в очаге деформации на участке с возрастающим обжатием (а) и элемент этого очага (б)

Выделим в зоне отставания под углом φ (отсчет углов ведется от вертикали OB) элемент площадью $R_\varphi b d\varphi$, на который действуют нормальные напряжения p и напряжения трения $\tau = \mu p$. Запишем условие равновесия очага деформации, приравняем 0 горизонтальные проекции всех сил, действующих на него:

$$-\int_0^\alpha p \sin \varphi r b d\varphi + \int_0^{-\psi} p \sin \varphi r b d\varphi - \int_0^\gamma \mu p \cos \varphi r b d\varphi + \int_\gamma^\alpha \mu p \cos \varphi r b d\varphi - \int_0^{-\psi} \mu p \cos \varphi r b d\varphi = 0.$$

Если положить, что уширение при прокатке отсутствует ($b = \text{const}$), а нормальное напряжение p постоянно по всей дуге контакта, то все члены уравнения можно сократить на prb . Тогда с учетом того, что $\cos(-\psi) = \cos\psi$ и $\sin(-\psi) = -\sin\psi$, после интегрирования и подстановки пределов получим

$$\cos \alpha - 1 - \cos \psi + 1 - \mu \sin \gamma + \mu \sin \alpha + \mu \sin \psi - \mu \sin \gamma = 0.$$

Введем упрощения: $\sin \alpha = \alpha$ и $1 - \cos \alpha = 1 - \sin^2(\alpha/2) = \alpha^2/2$ (аналогично упростим функции угла ψ). Получим

$$-\alpha^2/2 + \psi^2/2 - 2\mu\gamma + \mu\psi + \mu\alpha = 0.$$

Простые преобразования приводят к формуле для участка с убывающим обжатием, полученной впервые В.К. Смирновым:

$$\gamma_y = \frac{\alpha + \psi}{2} \left(1 - \frac{\alpha - \psi}{2\mu} \right).$$

Эта формула совпадает с формулой Павлова для обычной прокатки, когда $\psi = 0$.

Аналогично рассмотрим равновесие сил на участке с убывающим обжатием, используя рис. 7.4. На всей дуге контакта AC , соответствующей углу касания $\theta = \alpha - \psi$, горизонтальные проекции нормальных сил P направлены против хода прокатки. От нейтрального сечения (угол γ) до точки захвата (угол α) в зоне отставания горизонтальные проекции сил трения направлены по ходу прокатки, а в зоне опережения от 0 до угла γ — против хода прокатки. Равновесие сил дает уравнение

$$-\int_\psi^\alpha p \sin \varphi r b d\varphi + \int_\gamma^\alpha \mu p \cos \varphi r b d\varphi - \int_\psi^\gamma \mu p \cos \varphi r b d\varphi = 0.$$

После интегрирования и подстановки пределов получаем

$$\cos\alpha - \cos\psi + \mu\sin\alpha - \mu\sin\alpha - \mu\sin\gamma - \mu\sin\gamma + \mu\sin\psi = 0.$$

Преобразования приводят к формуле Смирнова, справедливой для участка с нарастающим обжатием:

$$\gamma_n = \frac{\alpha - \psi}{2} \left(1 - \frac{\alpha + \psi}{2\mu} \right).$$

Полученные уравнения показывают, что нейтральный угол γ на участке с нарастающим обжатием выше, а на участке с убывающим обжатием ниже, чем при стационарной прокатке. Чем больше угол наклона ψ , тем больше различие. Видно также, что угол γ сложным образом зависит от угла захвата α . На рис. 7.10 приведена зависимость, построенная по приведенным формулам Смирнова при различных коэффициентах трения μ и некотором постоянном значении ψ .

При прокатке на клиновидном участке с убывающим обжатием нейтральный угол γ меньше, чем при стационарной прокатке. Отсюда опережение S , связанное с углом γ формулой Головина—Дрездена $S = D\gamma^2/(2h_1)$, также меньше. Оно тем меньше, чем больше угол наклона участка ψ . Если при стационарной прокатке опережение равно 3–5 %, то при прокатке клиновидного участка 1 оно меньше. Чем больше угол наклона клина, тем больше оснований считать опережение отсутствующим (рис. 7.11, кривая 1).

Если рассматривать участок 2 , прокатываемый с возрастанием обжатия, когда нейтральный угол больше, чем при стационарной прокатке, опережение будет больше, чем на стационарном участке (см. рис. 7.11, кривая 2), и с увеличением угла наклона ψ протяженность зоны опережения возрастает. При больших углах наклона оно может достигать значений 10–12 %.

Если длина фигуры 2 (см. рис. 7.1) по чертежу равна l_i , то на валках длина участка для его выполнения должна быть меньше на величину опережения:

$$l_{vi} = \frac{l_i}{1 + S}.$$

На участке 1 длины полосы и валков практически совпадают, но на участке 2 они резко отличаются, здесь опережение учитывают обязательно.

Для точного выполнения фигуры необходимо учитывать также то, что угол θ по ходу прокатки изменяется, следовательно, изменяются нейтральный угол γ и опережение S . На участке 1 (с убывающим обжатием) угол θ по ходу прокат-

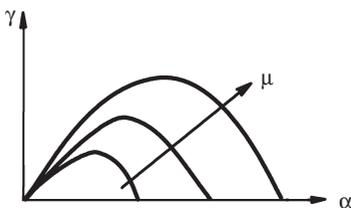


Рис. 7.10. Зависимость нейтрального угла от угла касания и коэффициента трения

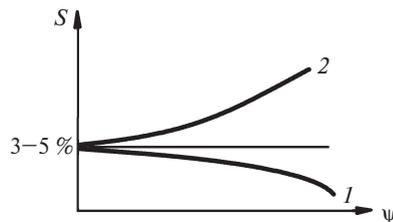


Рис. 7.11. Зависимость опережения от угла клина ψ на участках с убывающим (1) и нарастающим (2) обжатием

ки уменьшается, а на участке 2 увеличивается. В соответствии с приведенными выше кривыми (см. рис. 7.10) в обоих случаях при малых обжатиях (при малых углах касания θ) с увеличением обжатия и угла касания θ нейтральный угол γ и опережение S возрастают, а при сравнительно больших обжатиях падают.

7.3.4. Уширение

Основываясь на экспериментальных данных, при обычной прокатке в цилиндрических валках мы считали, что уширение, оцениваемое смещенным объемом металла в ширину, примерно постоянно во всех точках очага деформации:

$$-A = \frac{db/b}{dh/h} = \text{const.}$$

В интегральной форме

$$A = \frac{\ln(b_1/b_0)}{\ln(h_0/h_1)} = \text{const.}$$

Приближенно усредненное по очагу деформации уширение

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = A \frac{b_c}{h_c}.$$

Экспериментально показано также, что показатель уширения A при обычной прокатке определяется средними размерами очага деформации и коэффициентом трения:

$$A = f\left(\frac{l}{h_c}, \frac{b_c}{l}, \mu\right).$$

На низких очагах деформации определяющим является параметр b_c/l , а роль параметра l/h_c при этом снижается. По мере увеличения высоты очага деформации значимость параметра l/h_c начинает возрастать, а роль параметра b_c/l , наоборот, уменьшаться, хотя ведущая роль его остается почти до высоких очагов. С ростом этого параметра, как известно, уширение уменьшается.

При периодической прокатке на участках с постоянным обжатием все сказанное справедливо в полной мере, но на переходных участках параметры очага деформации непрерывно изменяются, поэтому показатель A также непостоянен как в процессе нестационарной прокатки, так и в разных точках мгновенного очага деформации. При прокатке с убывающим обжатием длина очага деформации в процессе прокатки убывает, параметр b_c/l возрастает, следовательно, уширение падает, показатель A уменьшается. При прокатке с нарастающим обжатием, очевидно, будет обратная картина. Для усредненного по очагу деформации уширения можно записать

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_y < \left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_c < \left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_n,$$

где индексы “у”, “с” и “н” соответствуют участкам с убывающим, стационарным и нарастающим обжатием.

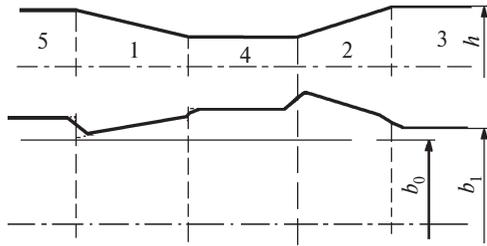


Рис. 7.12. Уширение при прокатке периодической полосы

Рассмотрим уширение полосы, имеющей достаточно длинные стационарные и нестационарные участки, как показано на рис. 7.12 (нумерация участков соответствует рис. 7.1). При переходе от стационарного участка 3 к нестационарному 2 обжатие возрастает, уширение также растет. Причем в каждый текущий момент оно выше, чем на гладкой бочке, но в первый момент наблюдается плавный переход от одного участка к другому. Затем при выходе на стационарный участок 4 уширение должно скачком уменьшиться, однако оно также по сглаженной кривой приблизится к стационарному значению. Некоторое время уширение будет больше, чем положено быть на стационарном участке.

Аналогично при переходе от стационарного участка 4 к нестационарному 1 обжатие уменьшается, уширение должно снизиться скачком, хотя оно будет изменяться более плавно. В начальный момент прокатки уширение будет больше, чем положено при соответствующем угле ψ . Затем на длине, равной длине очага деформации, уширение постепенно приближается к теоретическому значению. На выходе на стационарный участок 5 уширение должно возрасти, но произойдет это также с запаздыванием.

Такой сложный характер изменения уширения по длине полосы делает необоснованной рекомендацию некоторых авторов рассчитывать уширение только на стационарных участках (по известным формулам), а на нестационарных — принимать его плавно изменяющимся (например, по прямой). Фактическое уширение на участке с убывающим обжатием меньше, а на участке с нарастающим обжатием — больше, чем сглаженное по прямой значение.

7.3.5. Сила прокатки

Сила прокатки рассчитывается по формуле

$$P = p_{\text{cp}} b_{\text{cp}} l.$$

Ширина полосы b и длина дуги захвата l , как показано выше, сложным образом изменяется на нестационарных участках и при переходе от нестационарных к стационарным участкам. Очевидно, силу прокатки P , как и рассмотренные выше параметры, нельзя вычислять на нестационарных участках как среднее между значениями на соседних стационарных участках. По аналогии с характером изменения дуги захвата или уширения можно считать, что давление также будет выше среднего значения на участке с возрастающим обжатием и меньше

среднего на участке с убывающим обжатием. Для многих технологических расчетов усреднение по стационарным значениям недопустимо, хотя другого простого выхода, по-видимому, не имеется.

Большое влияние на силу прокатки оказывает заусенец, который резко увеличивает силу и во многих случаях определяет конечное ее значение. Поэтому многие авторы предлагают вычислять давление на валки и силу прокатки только на участках формирования заусенца. Если же прокатка ведется без заусенца, что редко, то силу прокатки с определенной точностью можно оценить по стационарному участку с максимальным обжатием.

Приближенный анализ давления на валки и силы при периодической прокатке с заусенцем выполнил Б.Е. Хайкин, посчитав, что, как и при штамповке с заусенцем, сила прокатки определяется процессом заполнения калибра (штампа) и формирования заусенца. В обоих случаях процесс распадается на четыре этапа, как показано на рис. 7.13. На этапе *I* выступы калибра внедряются в заготовку. Металл неравномерно деформируется по ширине. Сильно обжимаемые участки за счет связи со слабо обжимаемыми не могут деформироваться в длину так, как на гладкой бочке, поэтому металл из этих участков вынужденно течет в направлении ширины. С другой стороны, слабо обжимаемые участки вынужденно подвергаются дополнительной вытяжке со стороны сильно обжимаемых. При этом размеры слабо обжимаемых участков — ширина и высота — дополнительно уменьшаются, испытывая утяжку. Вынужденное уширение и утяжка требуют дополнительных затрат энергии, которая должна быть подведена извне в виде увеличения среднего давления $p_{\text{ср}}$.

Этап *II* начинается тогда, когда боковые стенки калибра вступают в контакт с металлом, и заканчивается почти полным заполнением калибра, когда начинается вытеснение из калибра избыточного металла. Из-за утяжки слабо деформируемых участков полости калибра заполняются трудно, металл не затекает в щелевые участки, поэтому калибр еще не заполнен. Этому препятствуют также силы трения, действующие по боковым стенкам калибра.

На этапе *III* наличие начального небольшого заусенца создает дополнительное сопротивление течению металла в поперечном направлении, поэтому металл вынужденно загоняется в незаполненные полости калибра. Этап *III* заканчивается полным заполнением калибра и ростом заусенца.

Этап *IV* прокатки сопровождается дальнейшим уменьшением толщины заусенца, происходит вытеснение из калибра избыточного металла в заусенец.

Прокатка с заусенцем требует большого количества энергии, прокатка самого заусенца всегда протекает при больших давлениях, потому что заусенец холоднее и прокатка его всегда протекает в условиях более низких очагов деформации, чем основная масса металла.

Прокатка с заусенцем в калибрах, с одной стороны, полезна, так как обеспечивает точное выполнение фигур калибра, с другой стороны, помимо повы-

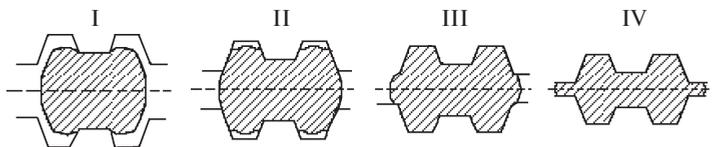


Рис. 7.13. Этапы формирования профиля при штамповке с заусенцем

шенного усилия на валки, ведет к быстрому износу калибров, особенно в месте образования заусенцев. После штамповки или прокатки заусенец должен быть удален, что ведет к лишнему расходу металла, необходимости дополнительных затрат на его удаление, складированию и транспортировке отходов и т. д.

При прокатке периодической полосы, в отличие от штамповки, все четыре стадии деформации находятся в одном очаге деформации. Длина дуги захвата по ширине профиля переменна. Но если полосу по ширине разбить на ряд простых по форме полосок шириной b_i , где i — номер полоски, то можно вычислить средневзвешенную длину дуги захвата l_{cp} по формуле

$$l_{cp} = \frac{\sum l_i b_i}{\sum b_i}.$$

Давление на валки необходимо вычислять для каждой полоски.

Б.Е. Хайкин принял, что давление металла на валки при периодической прокатке с заусенцем для каждой полоски изменяется по параболе (рис. 7.14):

$$p_i = \frac{p_{1i} - p_0}{l_{cp}^2} x^2 + p_0,$$

где p_i — значение удельного давления в точке с координатой x , p_{1i} и p_0 — удельные давления в плоскости выхода и входа.

На входе в очаг деформации

$$p_0 = 1,155\sigma_s,$$

а на выходе из очага для i -й полоски по аналогии со штамповкой

$$p_{1i} = 1,155\sigma_s \left(1 + \frac{1}{\theta_{cp i}} \ln \frac{h_{0i}}{h_{1i}} \right),$$

где h_{0i} , h_{1i} — высоты полоски на входе и выходе; $\theta_{cp i}$ — средний угол касания.

Полная сила прокатки P определяется путем интегрирования кривой p_i по средневзвешенной длине l_{cp} и суммирования результата по всем полоскам. Такой расчет может быть осуществлен только по соответствующей программе на ЭВМ.

Как видно, анализ напряжений в очаге деформации при прокатке с заусенцем очень сложен. Но он необходим, так как дает возможность вычислить истинное давление на валки p_{cp} и полное усилие P . Кроме того, он позволяет определить условия заполнения калибра и минимальную величину заусенца, который обеспечивает полное заполнение калибра.

7.4. Контуры опережения и отставания

При периодической прокатке не всякий профиль можно прокатать в валках заданного диаметра. Опыты показывают, что при переходе от стационарного участка с малым обжатием к стационарному участку с большим обжатием можно получить переходный участок практически с любым углом ψ , в том числе близким к 90° , т. е. с минимальной длиной переходного участка. Но при переходе от большого обжатия к меньшему переходный участок не может иметь

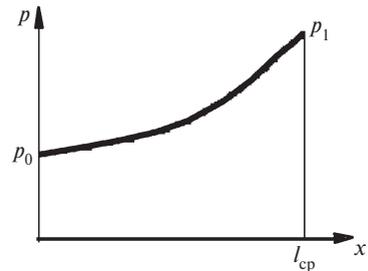


Рис. 7.14. Изменение давления по длине дуги захвата

угол ψ больше некоторого предельного значения, т. е. переходный участок будет присутствовать всегда. Предельное значение ψ зависит от радиуса прокатного вала (максимального R_{\max}) и размеров исходной заготовки.

Рассмотрим периодическую прокатку в валах, имеющих только гребни с постоянным радиусом R_{\max} и впадины с постоянным радиусом R_{\min} , т. е. не имеющих переходных участков (рис. 7.15, а). На полосе мы получим переходные участки AB и CD с минимально возможными углами β_1 и β_2 соответственно (рис. 7.15, б). Пологий переход AB образуется за счет течения металла из-под гребня валков назад в зону отставания, поэтому он называется *контуром отставания*. Более крутой переход CD образуется вследствие течения металла вперед, поэтому он называется *контуром опережения*. На полученном прокате переходные углы β_1 и β_2 можно только увеличить за счет создания переходных участков на валках. На контуре опережения угол β_2 можно получить близким к 0, контур опережения может практически отсутствовать, если увеличивать обжатие слабо деформируемого участка полосы (h_{\max}). Всегда $\beta_1 > \beta_2$.

Допустим, обжатие во впадинах отсутствует. Рассмотрим момент деформации, когда левая грань гребня вала коснется точки A полосы. При дальнейшем движении валков из-за отставания металла на полосе формируется контур отставания AB . Так происходит до того момента, когда гребень вала оказывается в нейтральном сечении под углом γ . При дальнейшем перемещении гребня по очагу деформации металл перейдет в зону опережения, формирование контура отставания заканчивается.

Теоретически и экспериментально установлено, что угол β_1 контура отставания является функцией следующих параметров:

$$\beta_1 = f \left(\frac{\Delta h_{\min}}{R_{\max}}, \frac{h_0}{h_{\min}}, \frac{b_1}{b_0}, \mu \right).$$

Чем больше обжатие полосы h_0/h_{\min} , тем отставание больше, тем меньше крутизна переходного участка, больше угол β_1 . Если есть уширение металла ($b_1/b_0 > 1$), то отставание уменьшается, и угол β_1 контура отставания уменьшается. С ростом коэффициента трения μ опережение растет и, соответственно, отставание уменьшается, поэтому угол β_1 также уменьшается. С увеличением радиуса гребня валков R_{\max} угол β_1 увеличивается.

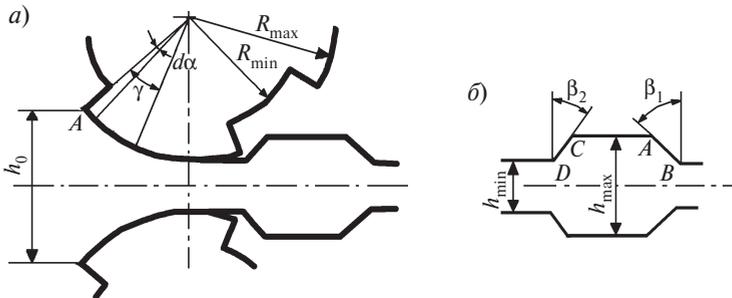


Рис. 7.15. Формирование контуров опережения (CD) и отставания (AB) при отсутствии обжатия по впадинам: а — процесс формирования; б — сформированная деталь

Если на впадинах металл также испытывает деформацию, то картина формирования контура отставания усложняется. На рис. 7.16 приведены три последовательные стадии его формирования. Стадия *I* происходит при прокатке полосы на гребне и заканчивается касанием полосы впадинами валков. В конце этой стадии формируется контур отставания с углом β_1 , как и в рассмотренном выше случае.

Стадия *II* начинается с момента начала деформации металла впадинами и заканчивается выходом задней грани гребня на линию центров валков. На этой стадии металл одновременно деформируется как гребнями, так и впадинами. При деформации гребнями по-прежнему металл вытекает с образованием контура отставания, но одновременно происходит смятие вновь образованного контура впадинами. В результате к концу второй стадии образуется переходный контур с углом β'_1 , меньшим угла β_1 .

Стадия *III* начинается от положения гребня по линии центров валков и заканчивается полным выходом вершины переходного участка из валков. На этой стадии обжатие на гребнях прекращается, но продолжается обжатие на впадинах. Продолжается искажение угла переходного участка, хотя и незначительное, так как обжатие полосы на этой стадии уже невелико. Основное искажение происходит на стадии *II*. Практически всегда β'_1 меньше β_1 .

Теоретически вычислить угол β'_1 невозможно, поэтому отношение β_1/β'_1 изучают экспериментально. Установлено, что при прокатке на одних и тех же валках полос разной конечной толщины по мере утонения полосы отношение

β_1/β'_1 уменьшается. С увеличением критерия $\frac{\Delta h_{\max}}{2R_{\max}}$, т. е. с ростом обжатия поло-

сы, отношение β_1/β'_1 растет. С увеличением глубины впадины ($\Delta R = R_{\max} - R_{\min}$) искажение угла переходного участка и отношение β_1/β'_1 уменьшаются.

Рассмотрим процесс формирования контура опережения. Пусть для начала обжатие на впадинах отсутствует. Образование контура опережения начинается с момента касания полосы передней гранью валков (рис. 7.17, *a*). По мере внедрения гребня растет длина дуги захвата, и в каждый момент очаг деформации состоит из зоны опережения и зоны отставания. Нейтральный угол γ вначале равен углу захвата α , но при заполнении очага деформации протяженность зон опережения и отставания растет, и угол γ постепенно приближается к значению $0,5\alpha$.

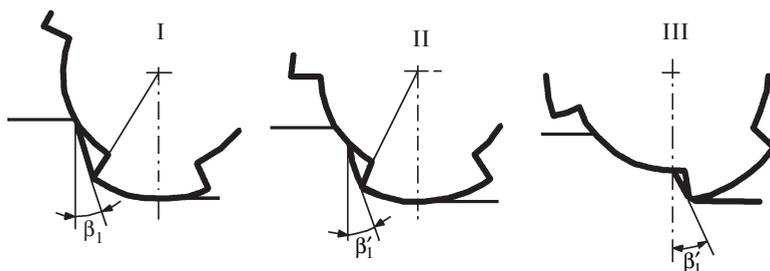


Рис. 7.16. Формирование контура отставания при деформации металла по впадинам

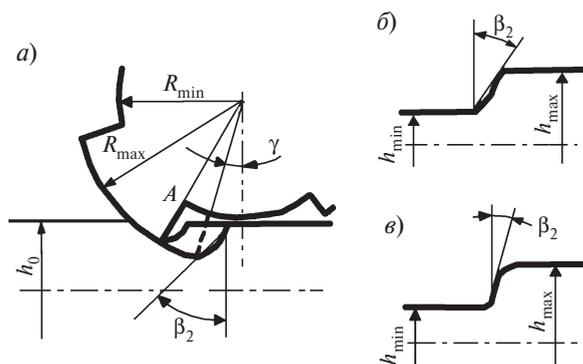


Рис. 7.17. Формирование контура опережения (а) и форма контура опережения при отсутствии (б) и наличии (в) деформации по впадине

Металл, непрерывно вытекающий в направлении прокатки из зоны опережения, образует контур опережения (рис. 7.17, б). При движении гребня за пределы угла γ контур опережения уже не образуется, так как металл движется быстрее валков, поэтому теоретически углы γ и β_2 должны быть равными, но практически они всегда различаются. Анализ процесса формирования контура опережения показывает, что угол β_2 зависит от следующих технологических параметров (критериев):

$$\beta_2 = f\left(\frac{\Delta h_{\max}}{R_{\max}}, \frac{h_0}{h_{\min}}, \mu\right).$$

Угол β_2 возрастает с увеличением коэффициента трения μ и отношения h_0/h_{\min} и уменьшением отношения $\Delta h_{\max}/R_{\max}$.

Если на впадинах также осуществляется обжатие полосы, то картина деформации претерпевает изменения. Даже при небольших обжатиях по впадине при движении валков металл позже отрывается от гребня, чем при угле γ , поэтому угол β_2 уменьшается, а при значительных обжатиях по впадине приближается к 0 (рис. 7.17, в). Возможна прокатка без переходного участка, когда $\beta_2 = 0$.

Картина искажается на границе гребня и впадины (вблизи точки А), где полость с трудом заполняется металлом, поскольку движению металла в угол полости препятствуют большие силы трения. Кроме того, в этом месте металл испытывает утяжку за счет взаимодействия с другими, более интенсивно деформируемыми частями металла. Как правило, контур опережения имеет следы утяжки и сглажен по вершине.

Рассмотрев некоторые теоретические вопросы при периодической прокатке, можно коротко подвести итоги. При периодической прокатке всегда имеются переходные участки, на которых все параметры прокатки нестабильны, изменение их происходит по сложному закону, исследование их трудно поддается теоретическому анализу. В исследовании этого процесса еще не закончен этап накопления количественных данных, которые практически всегда добываются экспериментальным путем.

**ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВКИ
И СОРТОВОГО ПРОКАТА**

Глава 8

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДСТВА
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ**

8.1. Производственный цикл

Производство как процесс — очень широкое понятие. Оно включает в себя как технологию, так и ее разработку, подготовку и организацию производства, критерии и методы оценки продукции и самой технологии, менеджмент и многие другие вопросы. Американский экономист, вложивший много труда в процесс становления послевоенного японского производства, У.Э. Деминг представляет производство как непрерывное движение по кругу в четыре цикла (рис. 8.1).

Цикл 1 — подготовка производства — включает в себя расчеты технологических режимов, научные исследования, проектирование технологических процессов и оснастки, выбор вариантов, выбор оборудования, расчет, проектирование и изготовление инструмента. На этом цикле широко используется ЭВМ. К стадии подготовки производства следует отнести разработку математического обеспечения компьютерных программ, создание автоматизированных рабочих мест технолога, компьютерное моделирование и т. п.

К циклу 2 относится непосредственно само производство. Основной особенностью его является воспроизводимость и устойчивость, позволяющая производить продукцию постоянно высокого качества. Необходима система, обеспечивающая, поддерживающая и контролирующая эту стабильность, что также является элементом производственной структуры.

В цикле 3 обеспечивается контроль качества произведенной продукции. При достаточно развитой системе стабилизации технологии на каждой технологи-

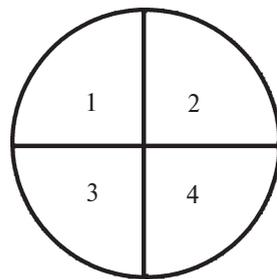


Рис. 8.1. Цикл Деминга:

1 — планирование и подготовка производства; 2 — реализация производства; 3 — контроль качества продукции; 4 — анализ и корректировка производства

ческой операции конечная продукция обязана получиться высококачественной, и контроль качества готовой продукции становится не столь актуальным, он необходим только для проверки правильности работы системы стабилизации (в качестве обратной связи). И наоборот, чем меньше развита система стабилизации и контроля технологических операций, тем больше средств приходится тратить на контроль готовых изделий, отбраковку и исправление готовой продукции, “создание” брака, производство и хранение запаса. Во всем мире при производстве многих товаров, например телевизоров, автомобилей и т. д., вообще бессмысленно контролировать качество продукции после ее изготовления, только контроль технологии по ходу производства гарантирует качество. В металлургическом производстве границы между системами контроля готовой продукции и контроля технологии неоднозначны и подвижны. Практически каждое предприятие обязано самостоятельно решать задачу минимизации суммарных затрат на создание и эксплуатацию обеих систем.

Наконец, цикл 4 производства необходим для того, чтобы сделать выводы о ходе процесса и скорректировать его. На этом этапе необходимо обеспечить накопление статистических данных о причинах отклонений от запланированного процесса, обобщить научные исследования по улучшению качества продукции и технологии, проанализировать отечественные и мировые тенденции развития производства и технологических решений, тенденции изменения рынка и т. д. Такой анализ подготавливает первый цикл разработки и внедрения нового, более прогрессивного производства, которое также будет осуществляться по циклу Деминга.

Циклический характер развития свойствен не только производству. Видимо, существует более глубокий и более общий закон для развивающихся систем и для деятельности человека вообще, который отражается в этих циклах. Те же четыре цикла можно выделить при анализе какого-нибудь законченного этапа научного познания явления или процесса, так же протекает обучение, экспериментальная деятельность и многое другое. Даже турист сначала готовит маршрут и снаряжение, затем совершает собственно восхождение на вершину, постоянно контролируя “технология восхождения” и корректируя ее. После покорения вершины он анализирует результат, делает выводы, оценивает свою готовность и возможности к восхождению на следующую, более сложную вершину, подготовив тем самым начало первого цикла следующего этапа своей деятельности.

8.2. Общая характеристика металлургического производства

В самом общем виде можно выделить два принципиально отличных направления в технологии. Первое — поисковое — ставит целью получить продукт с новыми свойствами или сделать известный продукт по новой более прогрессивной технологии. Второе, наоборот, связано с эффективным производством традиционного продукта в масштабах, достаточных для удовлетворения потребности в нем. Критерием эффективности производства, как правило, являются технико-экономические показатели, такие как качество продукции, ее эксплуатационные характеристики, низкие затраты на произ-

водство, высокая производительность, короче, все то, что обеспечивает конкурентоспособность продукции на рынке. Оба направления неразрывно связаны между собой. Результаты поисковых работ, особенно связанных с разработкой новых материалов и новых технологических решений, в конечном счете приводят к возникновению нового или совершенствованию старого производства, а в процессе производства рождаются идеи для поиска новых материалов и технологических решений.

Все виды производств можно классифицировать по разным признакам. Такая классификация необходима не для того, чтобы полно обозначить все встречающиеся виды производств, а для того, чтобы сравнить металлургическое производство с другими и обозначить его уровень в системе всего народного хозяйства.

Наиболее общей является классификация по назначению производимой продукции:

- добывающая промышленность;
- заготовительное производство;
- машиностроение и приборостроение.

Этот список, видимо, можно было бы детализировать, представить иначе и продолжить. Полнота представленного перечня не столь существенна. Важнее отметить, что металлургия, в том числе прокатное производство, относится к заготовительному производству, и здесь его место в ряду других производств. Оно не направлено непосредственно на производство изделий для бытового потребления, хотя имеется четко выраженная тенденция к переработке проката на самом металлургическом предприятии в более дорогие готовые металлические изделия (метизы), детали машиностроения и товары народного потребления.

Критерием классификации может служить также объем производимой продукции:

- массовое;
- серийное и мелкосерийное;
- индивидуальное или штучное.

Крупные металлургические предприятия выпускают массовую продукцию в основном в виде проката, предназначенного для всех отраслей народного хозяйства. Такому производству выгодно выпускать большими партиями однотипную продукцию. Однако машиностроение, особенно энергетическое, военное, химическое производство, радиоэлектроника и другие отрасли требуют выпуска малыми партиями самой разнообразной продукции высокого качества, материалов с повышенными и нестандартными свойствами. Это вынуждает развивать малые производства, отдельно расположенные или входящие в состав машиностроительного предприятия. По производительности, себестоимости продукции и ряду других важных технико-экономических показателей малые предприятия значительно уступают крупным специализированным. Поэтому одной из важнейших мировых проблем является организация мелкосерийного и индивидуального производства в условиях крупного предприятия, обеспечение быстрого перехода от одного вида продукции к другому при сохранении преимуществ крупномасштабного производства. Сравнительно успешно эта проблема решается на японских заводах, в том числе метал-

лургических. Ее решение требует новых методов руководства предприятием и организации производства.

Интересна также классификация производств по степени сложности, механизации и автоматизации технологических операций:

производства с большой долей ручного труда, материалоемкие и энергоемкие;

научноёмкие производства с высокой долей механизации и автоматизации;

высокие технологии и производства с высокой долей компьютерных технологий, с использованием гибких систем управления производством и технологическими процессами.

Металлургическое производство охватывает все виды приведенной классификации. В металлургических цехах машиностроительных предприятий обычно уровень производства значительно ниже, чем на крупных металлургических. Сейчас в условиях жесткой конкуренции появилась потребность в постоянном совершенствовании производства на новом, современном уровне технологии. Многие крупные предприятия распадаются на ряд более мелких. Такие предприятия, предназначенные для обслуживания небольшого числа близко расположенных потребителей, могут быть вполне рентабельными и более мобильными, чем крупные. По уровню технологии они могут быть высокоавтоматизированными и компьютеризированными, а затраты на создание таких систем вполне окупаются высоким и стабильным качеством продукции и быстрым реагированием на требования рынка.

Производство современных крупных металлургических заводов, особенно прокатное, — это металлоёмкое и энергоемкое, но высокомеханизированное производство с широким использованием компьютерных систем для управления как производством, так и технологическими операциями. Нет такого достижения науки и техники, которое не использовалось бы в металлургическом, прежде всего в прокатном, производстве. Отдельные технологические процессы вполне могут быть отнесены к уровню высоких. Под таким термином следует понимать высокие не только по уровню технологии, но и по организации производства, т. е. по уровню организации каждого производственного цикла (цикла Деминга), которые в совокупности обеспечивают выпуск только высококачественной продукции с минимальными затратами.

8.3. Управление производством и качеством продукции

Организация производства на современном предприятии заслуживает отдельного рассмотрения. Впервые Ф. Тейлор в 1903 г. в работе “Управление предприятием”, обобщив свой практический и теоретический опыт, доказал, что для повышения качества продукции полезно не только совершенствовать технологию производства, но и улучшать организацию производства, повышать оплату труда рабочих, поощрять высококвалифицированный труд и обеспечивать условия для непрерывного обучения всего персонала. После Ф. Тейлора управление предприятием становится профессией, и развитие этого направления привело к созданию современных производств и современных методов управления.

В науку управления производством новое внесли японцы в послевоенные годы, добившихся практически с нуля поразительных результатов, прежде всего в управлении качеством выпускаемой продукции. Теоретики “японского чуда” — американские ученые-экономисты У.Э. Деминг, Дж.М. Джуран, Парето и др. — установили, что 80–85 % качества продукта обеспечивается системой управления производством и только 15–20 % — исполнителями. Невозможно добиться качества путем увеличения средств на контроль готовой продукции, оно должно быть изначально заложено в изделия на всех этапах производства, начиная с разработки этого изделия. В Японии фактически реализована система комплексного управления качеством, которая складывается из многих компонентов. Среди них контроль технологии при производстве занимает существенную, но далеко не ведущую роль. Важны также поведенческие навыки рабочих, система воспитания и непрерывного обучения производственного персонала всех уровней, мягкие методы взаимоотношений между руководителями и подчиненными и др. Пожалуй, главным элементом этой системы является управление запасами, практически сводящее эти запасы к нулю. Технология, оборудование, оснастка, материалы разрабатываются и совершенствуются так, чтобы стало выгодным производить товары малыми партиями и только высокого качества. Это требует четкой работы по принципу “точно и вовремя” с использованием системы оперативного управления производством Just-in-time и поддерживающей ее информационной системы “Канбан”, когда отсутствуют промежуточные склады и лишние запасы полуфабриката. На каждом промежуточном переделе исходная заготовка и материалы поступают точно в требуемое время, в нужном количестве, имеют точный адрес изготовителя и всегда высокое качество. Выгоды достигаются как за счет исключения потерь на производство “лишних” и бракованных изделий, их хранение и транспортировку, так и за счет ответственности и заинтересованности рабочего в высоком качестве произведенного им продукта.

На европейских и американских предприятиях рабочий, изготовивший изделие в общую корзину, обезличен. Каждый работает сам за себя. Здесь высокое качество достигается за счет некоторого перепроизводства изделий, это дает возможность быстро насыщать рынок и опережать конкурента. Чтобы повысить качество, производить мелкосерийную продукцию в условиях быстро меняющегося спроса, необходимо внедрять сложные системы управления производством на основе систем ЭВМ, применять сложные математические методы, совершенствовать счетно-решающую технику.

На японском предприятии наряду с этим большое значение имеет психология сотрудничества, преданность предприятию, групповые методы решения проблем, атмосфера постоянного и всеобщего обучения и роста. Начиная с 1970-х гг. японский опыт управления производством изучается всеми экономически развитыми странами и частично внедряется. Однако, как считают многие экономисты, по части комплексного управления качеством продукции отставание не уменьшается, а, наоборот, только увеличивается.

В связи с развитием сотрудничества в сфере производства и рыночных отношений позиции различных государств по оценке качества продукции сближаются. Появляется единая философия качества, строящаяся на единой философии предпринимательства. Основным положением ее является утверждение,

что вся полнота ответственности за качество изделия лежит на производителе. Параметры качественной продукции как набор свойств, которые соответствуют ожиданиям, определяет потребитель. Производитель обязан совершенствовать методы обеспечения качества и системы контроля качества, чтобы полнее и точнее удовлетворить требования потребителя.

В своем развитии концепции качества продукции прошли несколько этапов. На первом считалось, что потребитель обязан **обеспечивать** требуемое качество и “должен получать только годные изделия, т. е. соответствующие стандартам. Негодные изделия (брак) должны быть отсечены от потребителя”. Должна совершенствоваться система контроля продукции, не допускающая поступление потребителю бракованных изделий.

Второй этап предусматривает **управление** качеством продукции. При этом сохраняется главная цель производителя — получение годной продукции, отвечающей стандартам. Но основные усилия сосредоточиваются на управлении производственными процессами, контроле технологических операций по ходу процессов, что обеспечивает увеличение выхода годных изделий и автоматизирует процесс отбраковки негодной продукции.

На настоящем этапе развития концепции качества главной задачей считается построение **программы менеджмента** качества продукции. Программа базируется не только на совершенствовании технологических процессов и системы управления производством, но и на построении системы управления качеством в целом, элементами которой дополнительно являются непосредственное участие высшего руководства предприятий в проблемах качества, обучение всех звеньев сотрудников сверху донизу методам обеспечения качеством, внедрение статистических методов управления качеством, стимулирование достижения высокого качества. Качество продукции планируется уже на цикле подготовки производства. Меняется оценка эффективности производства. На предыдущих этапах эффективность определялась показателями, сформулированными самим производителем: производительностью, прибылью от реализации проданной продукции, рентабельностью. Сейчас на первый план выдвигаются показатели, удовлетворяющие запросы потребителя, такие как качество продукции, конкурентоспособность на рынке, экологичность продукции и самого производства и т. д.

В соответствии с новой концепцией разработаны международные стандарты системы ИСО 9000, которые содержат рекомендации и требования по удовлетворению потребителя в качественной продукции. В этих стандартах прежде всего четко определяются понятия “требования к продукции” и “требования к системе качества”. Требования к системе качества являются дополнительными к техническим требованиям к продукции. Стандарты системы ИСО 9000 не описывают приемов повышения качества продукции — решение этих задач предоставляется руководству предприятия. Но они формулируют набор организационных и технических задач системы качества, которые предприятие должно решить, чтобы его продукция могла быть сертифицирована как высококачественная продукция в рамках единых международных требований. В международных стандартах серии ИСО 9000, в которых изложены рекомендации по организации работ по качеству, приняты во внимание не все, а только те элементы деятельности предприятия, которые оказывают наибольшее влия-

ние на качество. И совокупность этих элементов представлена как система менеджмента качества. В эту систему, кроме функций управления качеством (проверка продукции, меры корректирующего контроля и др.), включены элементы управления производством, проектированием, снабжением и другие элементы, существенно влияющие на качество, независимо от того, к каким сферам деятельности они относятся.

ИСО 9000 законодательно закрепляет представление любой деятельности предприятия как систему технологических *процессов* (концепция К. Ишикава), взаимодействующих между собой сложным образом. Сеть всех процессов существует для выполнения работы по добавлению стоимости продукции. Предприятие создает, обеспечивает сеть процессов для улучшения качества продукции, которое постоянно подвергается анализу и совершенствованию. Каждый процесс имеет три фазы:

- вход, включающий трудовые и сырьевые ресурсы, перерабатываемые материалы, энергию, информацию, программы расчета и пр.;

- объект труда и механизм преобразования ресурсов в продукцию; процесс преобразования связан с добавлением стоимости объекта труда и достижением его нового качества;

- выход, которым может служить не только основная продукция предприятия, но и побочная — вещество, полуфабрикат, прибор, документ, услуга, чертеж, интеллектуальный продукт, система управления и т. п.

Обычно на каждой фазе производятся измерения с помощью датчиков, приборов, систем измерения, включая автоматизированные и компьютеризированные системы.

В соответствии со стандартами ИСО 9000 требования предъявляются к организации каждой из фаз процесса, причем в значительной мере они одинаковы для каждой фазы, независимо от типа выпускаемой продукции на выходе. Общее управление качеством продукции достигается за счет стандартизации методов управления процессами и единства организации процессов.

Управление процессом включает:

- определение целей и желаемых результатов процесса;

- определение необходимых ресурсов, в том числе трудовых, для выполнения процесса;

- определение методов и средств выполнения процесса;

- управление использованием ресурсов, которые выделены для осуществления данного процесса, включая мотивацию персонала;

- наблюдение за ходом процесса, анализ результатов его выполнения и коррекция хода процесса.

Организация процесса многофункциональна. К основным функциям организации относятся:

- производство продукции;

- проектирование продукции и ее качества;

- управление технологией осуществления процессов;

- маркетинг;

- подготовка кадров;

- руководство трудовыми ресурсами;

- стратегическое планирование;

- стратегическое и оперативное управление;
- поставка продукции;
- оформление финансовых и других документов;
- техническое обслуживание и ремонт;
- прочие функции.

Сеть стандартов ИСО предполагает, что у каждого процесса имеется “владелец” — лицо, несущее ответственность за данный процесс. Этот “владелец” должен обеспечить однозначное понимание всеми участниками процесса их полномочий и ответственности, должен организовать их взаимодействие при решении задач как своего подразделения, так и других функционально связанных подразделений.

Отличительной особенностью стандарта ИСО 9001:2000 является то, что он устанавливает степень ответственности руководства организации за качество. Руководство предприятия отвечает за разработку политики в области качества, за создание, внедрение и функционирование системы управления качеством, что должно четко определяться и оформляться документально. К обязанностям руководства относятся подбор специалистов и выделение необходимых ресурсов для производственного, контрольно-измерительного и испытательного оборудования, а также для программного обеспечения компьютерной техники. Руководство должно устанавливать требуемый уровень компетенции и следить за своевременностью повышения квалификации персонала. На руководителей организации возлагается обязанность выявлять те показатели качества товара, которые влияют на его рыночную устойчивость. Также руководство организации отвечает за определение целей, которые предопределяют решения о производстве новых товаров или оказании новых услуг потребителям. Выпуск новых товаров и оказание новых видов услуг связаны с подготовкой новых программ качества, за что также ответственно руководство организации.

К основным ресурсам, указанным в ИСО 9001:2000, относятся человеческие ресурсы, инфраструктура и производственная среда.

Самый крупный раздел ИСО 9001:2000 — “Процессы жизненного цикла продукции”. В нем приведены общие рекомендации по планированию процессов жизненного цикла продукции, взаимодействию с потребителями, проектированию и разработке новой продукции, требования к процессу закупок и организации производства, хранения и отгрузки.

Важным фактором при доказательстве поставщиком способности удовлетворять требования по качеству является документация. Стандарты ИСО предусматривают несколько типов документов, которые должны быть обязательно разработаны предприятием-поставщиком. Только они могут выступать в качестве доказательства качества системы и продукции.

Стандарты серии ИСО 9000 — это пакет документов по обеспечению качества, подготовленный членами международной делегации “ИСО / Технический комитет 176”(ИСО/ТК 176). В этот пакет в 1994 г. входили все международные стандарты с номерами 9000—9004, все международные стандарты ИСО 10001—10020 и ИСО 8402. В 2000 г. стандарты серии ИСО 9000 пересмотрены и теперь включают в себя 11 международных стандартов, которые поддерживаются техническим комитетом ИСО/ТК 176 “Менеджмент качества и обеспечение качества”.

Серия включает ИСО 9001:2000 “Системы менеджмента качества. Требования”. ИСО 9001:2000 — единственный сертификационный стандарт, заменяющий стандарты ИСО 9001, ИСО 9002 и ИСО 9003 версии 1994 г. Кроме ИСО 9001:2000 основное ядро серии ИСО 9000 составляют ИСО 9000:2000 “Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь”, ИСО 9004:2000 “Системы менеджмента качества. Рекомендации по улучшению”, а также ИСО 19011:2002 (указания по проверке системы менеджмента качества). Серия ИСО 9000 также содержит ряд других стандартов поддержки.

Универсальность стандартов имеет и обратную сторону: она не позволяет учесть особенности конкретных областей промышленности. Это приводит к необходимости дополнять рекомендации стандартов ИСО 9000. В частности, это было сделано автомобильными фирмами “Форд”, “Крайслер” и “Дженерал Моторс” с участием пяти производителей грузовиков. Так появился стандарт ИСО / ТУ 16949:2002 для поставщиков продукции для автомобильной промышленности, действующий наряду с ИСО 9001:2000. Сертификация по ИСО / ТУ 16949:2002 направлена на повышение качества продукции, уменьшение брака и переделок, повышение эффективности производства в автомобильной промышленности и на связанных с ней предприятиях-поставщиках. Текст ИСО 9001:2000 полностью вошел в ИСО / ТУ 16949, затем были добавлены новые пункты, отсутствующие в ИСО 9001. Центральным ядром ИСО / ТУ 16949:2002 являются измерение, анализ и улучшение продукции.

Нормы ИСО 9000 и ИСО / ТУ 16949:2002 применяются в следующих ситуациях:

- как методический материал для разработки системы качества на предприятии; использование стандартов ИСО позволяет повысить конкурентоспособность организации, экономическую эффективность ее деятельности;

- как доказательство высокого качества при заключении контрактов с потребителями; потребитель вправе оговорить в контракте, чтобы определенные процессы или элементы системы качества на предприятии-поставщике соответствовали нормам ИСО;

- при оценке потребителем системы управления качеством на предприятии-поставщике: потребитель может потребовать официального признания (сертификации) соответствия системы качества нормам стандартов ИСО;

- при регистрации или сертификации системы качества регистрирующим органом; регистрация обязывает предприятие поддерживать единые требования к качеству продукции для всех потребителей; как правило, потребитель уже не проводит оценку системы качества на предприятии-поставщике, если последнее имеет сертификат качества.

Сертификация предприятия по ИСО / ТУ 16949:2002 требует обязательное внедрение на предприятиях, производящих продукцию для автомобильной промышленности, статистических методов управления производственными процессами по руководству SPC, составленному совместными усилиями ведущих автопроизводителей. Кроме этого, необходимо, чтобы основные статистические понятия, такие как изменчивость, управление (стабильность), возможности процесса и излишняя регулировка, были одинаково поняты во всей организации. Необходимо, чтобы процесс сначала был доведен до статистически управляемого состояния посредством обнаружения причин изменчивос-

ти и доведения до стабильного состояния. Обязательна объективность, воспроизводимость и открытость данных, собираемых по ходу технологического процесса. Для этого требуются автоматические датчики сбора такой информации на всех важных технологических процессах. После того как его воспроизводимость будет предсказуема, может быть определена способность предприятия соответствовать ожиданиям потребителя. Это является основой для построения и непрерывного совершенствования системы качества.

Каждый процесс в зависимости от воспроизводимости и управляемости может быть приемлемым и неприемлемым, управляемым и неуправляемым. Чтобы быть приемлемым, процесс должен находиться в статистически управляемом состоянии, и присущая ему изменчивость (воспроизводимость) должна быть меньше, чем обозначенный допуск. Только тогда, когда предприятие соответствует этим требованиям, на нем можно внедрять статистические методы управления качеством. Стандарт ИСО / ТУ 16949:2002 дает рекомендации работникам разных уровней по организации такого контроля качества продукции.

Сертификация по стандартам ИСО может проводиться любой фирмой, имеющей соответствующую лицензию. Такие лицензии в нашей стране выдает Госстандарт. Российские сертификаты ИСО имеют право выдавать многие организации. Однако сертификат ИСО 9000, выданный российскими организациями, несмотря на свою легальность, на международном рынке не котируется. Для того чтобы завоевать международное доверие, необходимо, чтобы сертификацию провела компания с мировым именем.

Наиболее солидными в сфере сертификации стандартов качества считаются сертификационные компании так называемой “большой семерки”: ABS Quality Evaluations, Lloyds Register Quality Assurance Ltd (Великобритания), Bureau Veritas Quality International (Норвегия), Det Norske Veritas Certification, Germanischer Lloyd QS-Zertifizierung GmbH, TUV-Zertifierungsgemeinschaft (Германия), SGS International Certification Services (Швейцария).

Внедрение на предприятиях России международных стандартов серии ИСО 9000 позволяет ей выйти на мировой рынок и успешно на нем конкурировать. Кроме того, за счет организационных мер, проводимых в период подготовки к сертификации системы качества, удается существенно увеличить качество выпускаемой продукции и затем поддерживать этот уровень. Стандарты помогают уменьшить затраты на качество продукции как у поставщика, так и у потребителя. У последнего появляется уверенность в качественной деятельности поставщика. Это создает предпосылки для заключения контрактов только с сертифицированными поставщиками. На предприятии-поставщике повышается исполнительская дисциплина, улучшается мотивация сотрудников, повышается качество управленческих решений. Все это подталкивает поставщика к разработке и внедрению системы качества.

8.4. Генеральный план металлургического завода

Производство цветных металлов занимает примерно 5 % от объемов производства чугуна и стали (черных металлов), поэтому в первую очередь следует рассматривать опыт производства в черной металлургии. В черной металлургии лучше используются такие прогрессивные идеи:

блокировка цехов в целях уменьшения транспортных перевозок между ними; замена кранов наземными или подземными транспортерами; широкое применение автотранспорта как элемента технологической линии и т. д.

Благодаря этому современный металлургический завод представляет собой единый технологический комплекс тесно увязанных между собой производств и цехов, расположенных по принципу минимума суммарных транспортных перевозок, минимума размеров территории и, как следствие, минимума эксплуатационных и капитальных затрат при строительстве.

Заводом с полным металлургическим циклом называется такой, который содержит три группы цехов, т. е. три передела:

аглодоменный, где подготавливаются исходные шихтовые материалы — агломерат и кокс — и производится выплавка чугуна в доменных печах;

сталеплавильный, в котором чугун перерабатывается в сталь;

прокатный, производящий из стали листовой и сортовой прокат.

Помимо основных цехов на таком заводе может быть еще несколько производств, построенных как на побочной, так и на основной продукции основных производств.

Заводы, не содержащие в своем составе цехов всех трех переделов, называются мини-заводами. Они могут быть самостоятельными или в составе крупного машиностроительного или металлургического предприятия.

Существует множество схем расположения производственных цехов на металлургических заводах. Со временем накапливались не только технологические достижения, но и опыт проектирования и строительства таких заводов. Довоенные российские заводы строились второпях и без расчета на их дальнейшее развитие, поэтому при появлении новых цехов и целых производств возникали встречные потоки металла, нарушался единый технологический поток, усложнялись связи между цехами. На таких заводах раньше мало заботились о социальных удобствах строящихся вокруг них рабочих городков.

Например, Днепродзержинский металлургический завод расположен непосредственно на берегу реки, за ним — рабочий городок, оказавшийся, в-первых, в яме, во-вторых, по направлению частых ветров с реки через завод на город.

Заводы 60–70-х гг. (типа ЧерМК) строились, наоборот, свободно, один цех от другого отделялся большими пространствами, рассчитанными на заполнение при развитии завода. Учтена также “роза ветров”: город расположен по берегу реки и за ним — завод. Такое расположение завода имеет также свои недостатки: требуется широко развитый транспорт, особенно железнодорожный, усложняется взаимодействие цехов, удорожается строительство и эксплуатация завода.

Современные тенденции направлены на реализацию компактных схем расположения производственных цехов, но предусматривающих возможности развития производства. На рис. 8.2 представлен генеральный план одного из современных металлургических заводов с полным циклом. На нем отсутствуют агломерационные цеха, так как завод рассчитан на использование вместо агломерата металлизированных окатышей, которые готовятся на горно-обогажительных камбинатах. Завод компактен, но рассчитан на расширение по всем

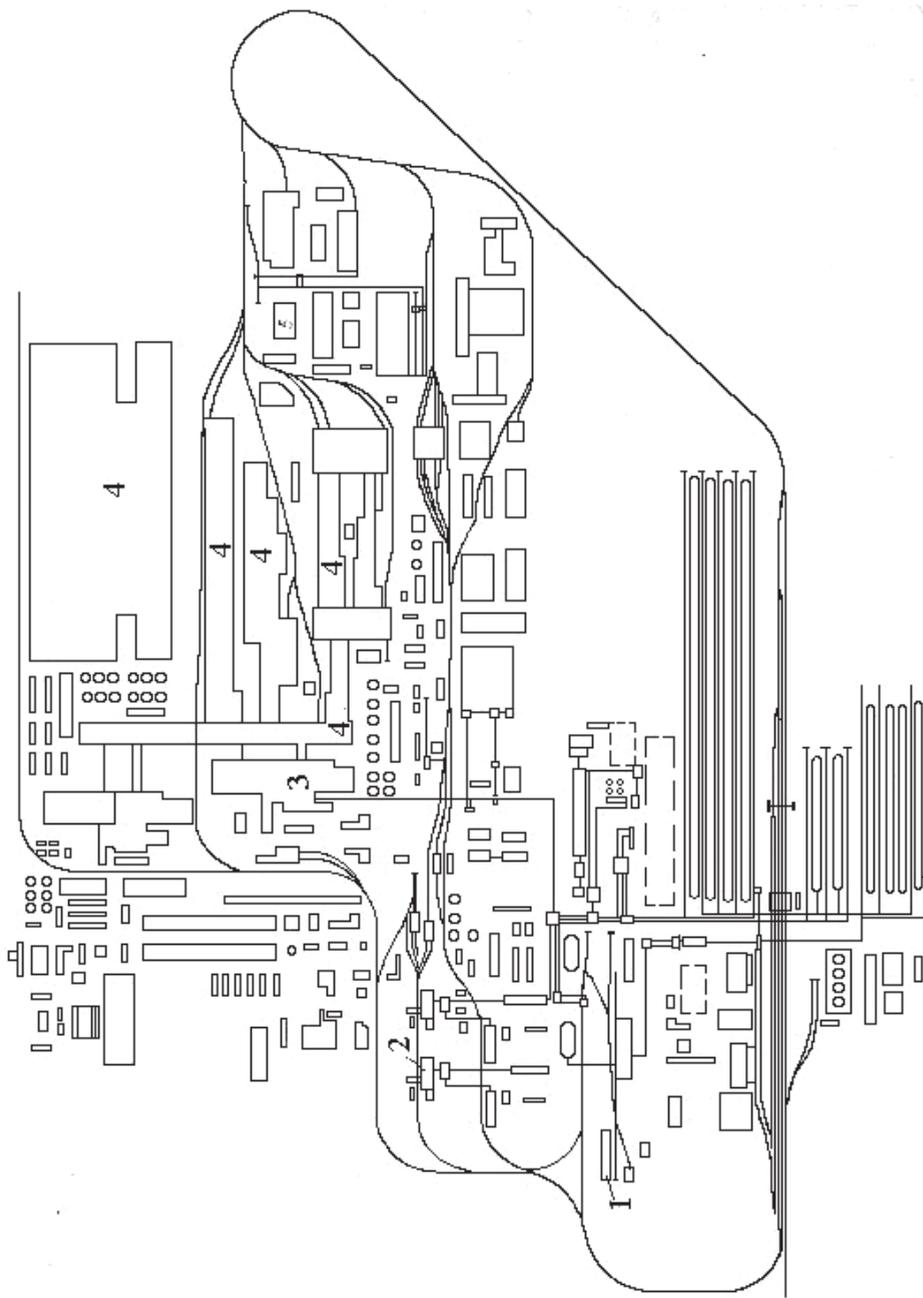


Рис. 8.2. Схема генерального плана металлургического завода с полным циклом:

1 — коксовый цех; 2 — доменное производство; 3 — сталеплавильный цех;
4 — прокатные цеха; 5 — ремонтные цеха

видам производства, основные цеха расположены по периметру главной площадки. Производственные цеха расположены по технологическому потоку, поэтому стало возможным широкое использование между ними конвейерного транспорта при значительном сокращении протяженности железных дорог, хотя, как видно, железнодорожный транспорт по-прежнему является основным. Сталеплавильный и прокатный цеха сблокированы, что сокращает площадь завода, уменьшает капитальные и эксплуатационные расходы.

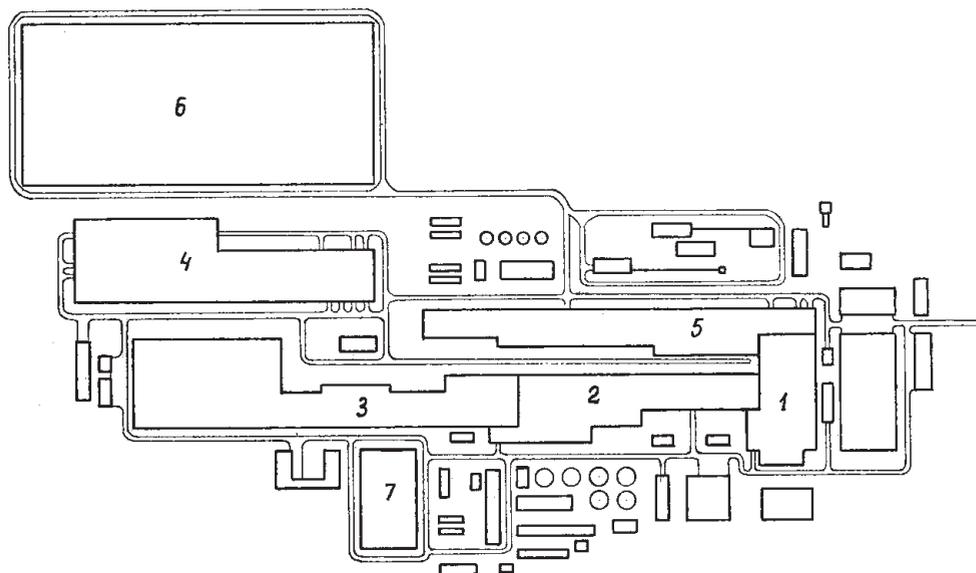


Рис. 8.3. Схема генерального плана мини-завода:

- 1 — сталеплавильный цех; 2 — обжимно-заготовочный стан; 3 — мелкосортно-проволочный стан; 4 — трубопрокатный цех; 5 — цех горячей прокатки листа; 6 — цех холодной прокатки листа; 7 — блок ремонтных цехов

На рис. 8.3 приведена схема генерального плана одного из последних мини-заводов с неполным циклом в составе двух основных цехов — сталеплавильного и прокатного. Как видно, большинство цехов здесь также объединены в единый блок. Они имеют технологическую связь с помощью мостовых кранов и наземных механизмов без применения железнодорожного и автомобильного транспорта. Цеха горячей и холодной прокатки связаны между собой подземной конвейерной передачей. Железнодорожный транспорт выполняет лишь роль коммуникационной связи между цехами.

8.5. Основные тенденции развития металлургического производства

Видимо, в этом разделе не удастся осветить все современные тенденции развития производства прокатной продукции. Мы остановимся только на более крупных стратегических направлениях, связанных с тенденциями развития всего металлургического производства.

Одним из глобальных направлений в современной мировой металлургии является создание модульных технологий. Сущность заключается в том, что для производства конечной продукции определенного сравнительно узкого сортамента с заданным набором качеств создается специализированное оборудование, состоящее из отдельных, часто взаимозаменяемых блоков. В настоящее время в металлургическом, особенно прокатном, производстве имеется много оборудования, предназначенного для многопрофильной продукции. Ширина сортамента раньше считалась одним из достоинств прокатного стана, однако при этом не всегда удавалось обеспечить высокое качество продукции. Ради достижения всегда высокого качества сейчас переходят на модульные технологии.

Модульный принцип рассматривался уже на стадии проектирования генерального плана металлургического завода (см. рис. 8.3). В более широком представлении под модульными технологиями понимают также совмещенные технологии, затрагивающие несколько металлургических переделов или несколько различных операций, работающие на организационных принципах единого агрегата для производства заданной продукции. При таком подходе обеспечивается получение конкурентоспособной продукции с минимальными затратами.

Возникновение модульных технологий стало принципиально возможным только на базе самых современных достижений в области подготовки металлургического сырья, сталеплавильного и прокатного производства, потенциальные возможности которых, в свою очередь, реализуются только в модульном исполнении. В мировой технологии на этом принципе происходит “технологическая революция”, которая, видимо, в ближайшем будущем коренным образом изменит структуру металлургического производства в целом. Зримые контуры металлургии будущего уже прослеживаются в Германии, США и других странах.

Формы совмещения технологических операций весьма многообразны. Наиболее важным достижением в этом направлении является совмещение процессов литья и прокатки. Благодаря нетрадиционному подходу к выбору и компоновке основного и вспомогательного оборудования удалось создать новый тип металлургического производства — компактный литейно-прокатный модуль с уникальными технико-экономическими показателями. Его можно построить на свободных площадях или вписать в габариты пустующих или недостроенных цехов металлургических, машиностроительных, судостроительных и других действующих предприятий. Строительство такого комплекса с объемом производства проката до 700–1000 т/год обходится в три-пять раз дешевле, чем традиционного специализированного мини-завода. Такое направление очень перспективно в России на фоне возрождающегося машиностроения и судостроения. Черная металлургия США за последнее десятилетие ввела в эксплуатацию около 60 предприятий на базе модульных мини-комплексов с суммарной мощностью около 25 млн. т готового проката.

Другой тенденцией в металлургическом производстве является широкое внедрение ресурсосберегающих и энергосберегающих технологий. Потребление энергоресурсов в мировой металлургии сокращается. В 2000 г. энергозатраты в общих затратах на производство готовой продукции составляли 16,3 %, в 2005 г. они упали до 14,6 % и к 2010 г. снизятся до 12,9 %. Основные резервы

снижения топлива и электроэнергии находятся в доменном и сталеплавильном производстве. Однако и в прокатном производстве за счет оптимизации и автоматизации технологии нагрева, прокатки и других операций, а также за счет внедрения современных совмещенных процессов, вторичного использования тепла и других мероприятий достигается существенная экономия энергоресурсов.

Важным направлением развития современной металлургии является внедрение экологически чистых технологий. Металлургическая отрасль является крупнейшим загрязнителем воздушного бассейна, на ее долю приходится 38 % общих выбросов промышленности в атмосферу, поэтому природоохранным технологиям придается первостепенное значение. В промышленности России предусмотрена экологическая сертификация производства на добровольной основе в соответствии с требованиями международных стандартов ИСО серии 14000 “Системы управления окружающей средой”, которые подтверждают соответствие производства природоохранным требованиям, установленным законодательством.

Побудительными мотивами российских предприятий к добровольной экологической сертификации являются:

отношения с природоохранными органами;

требования инвесторов подтвердить экологическую состоятельность;

сохранение высокой репутации, обеспечивающей конкурентоспособность предприятия на рынке;

стремление избежать закрытия рынка для своей продукции или санкций за “экологический демпинг”.

Создание экологически чистых производств с современными технологиями и совершенными системами защиты окружающей среды — это вектор развития современного металлургического производства, но неизбежно связанный с удорожанием продукции. В передовых странах достижения в области охраны окружающей среды появляются в результате сочетания передовых металлургических технологий с современными экологическими решениями. В Германии расходы в металлургии на предотвращение загрязнения окружающей среды составляют на тонну стали 20–27 дол., в США и Канаде — 15 дол.

Российские предприятия во многих случаях предпочитают платить налоги и штрафы за экологический ущерб, потому что их размер обычно меньше, чем стоимость природоохранных мероприятий. Необходимо создать такие условия, чтобы предприятию было экономически выгодно заниматься природоохранными мероприятиями и вводить новые экологически чистые технологии.

8.6. Структура прокатного производства

Прокатное производство очень многогранно, однако основными видами его продукции являются сортовой и листовой прокат. Около 80 % всей выплавляемой в мире жидкой стали перерабатывается в лист или сорт. (Примерно 13 % жидкой стали используется в виде литья, около 5 % — в виде крупных поковок.) Полученный прокат в дальнейшем в большом количестве перерабатывается также обработкой давлением по самым разнообразным технологическим схемам.

На современном крупном предприятии черной металлургии третий передел — прокатное производство — является самым крупным среди металлургических производств. По занимаемой площади, количеству работающих, количеству и стоимости оборудования и ряду других показателей прокатные цеха занимают более 60 % всего металлургического завода. В это производство вкладываются наибольшая доля капиталовложений, наибольшее количество научных разработок, технологических новшеств и менеджерских поисков. Здесь формируется прибыль завода и осуществляются основные взаимоотношения между предприятием и потребителем металла. В сложной технологической цепочке производства металла специалист по обработке металлов давлением является “крайним” и ответственным за качество готового продукта. В связи с этим он должен обладать чувством высокой личной ответственности, глубоко знать, помимо своей специальности, другие производства и практически использовать знания по многим смежным наукам, должен быстро реагировать на изменения мировых тенденций и рыночного спроса. Обработчик давлением — самый высококвалифицированный специалист на металлургическом заводе, поэтому на большинстве заводов хорошими директорами становятся хорошие технологи-прокатчики (реже — сталеплавильщики).

На рис. 8.4 приведена общая структура современного производства сортового и листового проката на крупном предприятии черной металлургии. Реальный завод необязательно содержит все представленные в схеме производства. Некоторые заводы специализируются на выпуске только сортового проката (КрМК), другие — на производстве только листа (НЛМК). Череповецкий ОАО “Северсталь”, ММК, ЧелМЗ и др. выпускают оба вида проката. Как правило, цеха четвертого передела представляют собой самостоятельные заводы и часто

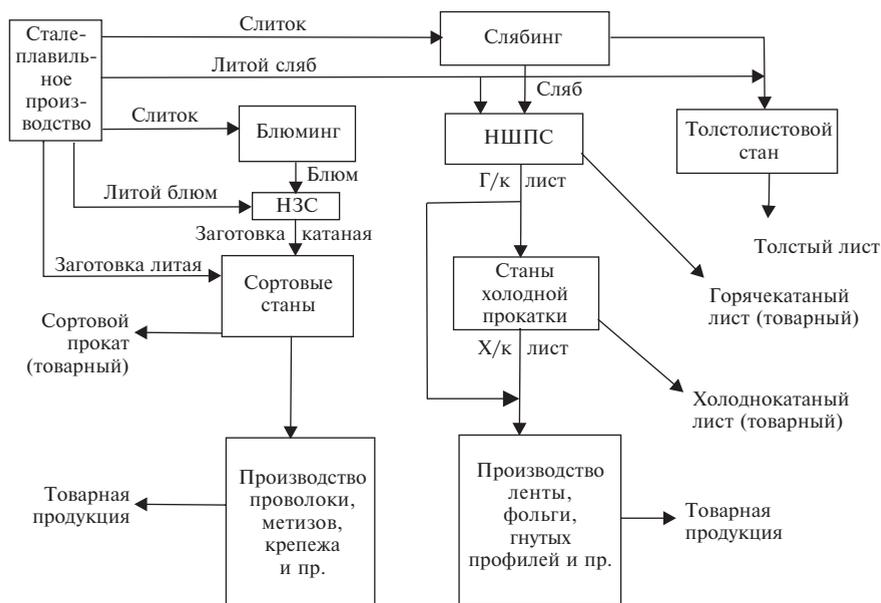


Рис. 8.4. Схема производства сорта и листа

территориально отделены от основного комбината. Широкий сортамент выпускаемой продукции вынуждает их покупать исходный прокат не только у своего главного поставщика, но и у других заводов, поэтому они и экономически не всегда зависят от него, хотя часто входят с ним в единую корпорацию.

Уже отмечалось, что на крупном предприятии трудно организовать производство разнообразной продукции мелкосерийными партиями, хотя мощная инфраструктура такого предприятия объективно благоприятствует изготовлению более дешевой и более высококачественной продукции, чем на мелком заводе. Поэтому в мире ярко выражены две тенденции размещения прокатного производства. Первая по существу представлена на рис. 8.4, когда крупное производство сосредоточено на крупном предприятии, а все технологические и организационные мероприятия сводятся к поиску таких решений, которые обеспечивают быстрый переход от одной продукции к другой. Вторая тенденция, наоборот, связана с разукрупнением и специализацией предприятия для обслуживания отдельных регионов со сложившейся структурой потребления.

Неизбежное удорожание производства на малых заводах компенсируется за счет более чуткого реагирования на рыночные потребности, быстрого перехода на выпуск другой продукции, внедрения специальных технологий и гибких методов организации производства, широкого развития производства товаров народного потребления и т. п. На многих машиностроительных заводах имеются собственные прокатные цеха, обеспечивающие потребности предприятия.

8.7. Общая характеристика заготовки для проката

Из схемы, представленной на рис. 8.4 видно, что производство проката осуществляется в два этапа. На первом получают полуфабрикат — **блюм** и **заготовку** для сортового металла или **сляб** для листа, из которых вторым этапом получают готовый прокат. Блюмом называется полоса квадратного или почти квадратного сечения от 200 до 400 мм по стороне длиной 6–10 м, получаемая на блюминге. Блюмы затем прокатываются на заготовочных станах до более мелких квадратных заготовок размерами 80–150 мм, которые поступают на сортовые станы (необходимо отличать названия выделенных видов полуфабриката).

Блюм может быть изготовлен по двум технологиям. По первой из слитка массой от 7 до 13 т (для углеродистых марок стали) он производится прокаткой на блюминге. Для легированных сталей развес слитков меньше, а для высоколегированных сталей (например, шарикоподшипниковых) может составлять несколько сотен килограмм, поэтому иногда их прокатку на заготовку осуществляют целиком на заготовочном стане, минуя блюминг. По второй технологии блюм требуемого сечения отливается на установках непрерывной разливки стали (УНРС) в сталеплавильном цехе. В настоящее время чаще применяют равнозначное название такой установки — “машина непрерывного литья заготовки” (МНЛЗ). Не будем останавливаться на технологии отливки блюмов, так как студенты должны иметь представление о ней из других курсов. Напомним, что из кристаллизатора соответствующего сече-

ния непрерывно выходит бесконечная полоса, которая затем разрезается на литые блюмы мерной длины.

Важно обсудить технико-экономические аспекты двух технологий получения блюмов. Производство литых блюмов объективно дешевле, чем катаных, так как оборудование и технология проще. Однако скорости разливки невелики, и при больших объемах производства (свыше 1,5 млн. т сортового металла в год) УНРС не удовлетворяют потребности в блюмах. Увеличить их производство за счет увеличения площади поперечного сечения также не удастся, так как при стороне квадрата выше 280 мм за счет неравномерного затвердевания весьма заметна разница по сечению в структуре, химическом составе и свойствах металла. На современном блюминге производительность достигает 3–6 млн. т металла в год, и под это количество блюмов построено сортовое производство большинства крупных металлургических заводов.

У литых блюмов есть свои недостатки. Если жидкий металл не очищен и содержит различные примеси, неметаллические включения и прочую “грязь”, то все это остается в литом блюме в виде ликвационной дорожки, расположенной в центре сечения, которая раскатывается, но не устраняется на готовом прокате. Катаные блюмы получаются из слитка, в котором примеси концентрируются в прибыльной части, отрезаемой при прокатке на блюминге, поэтому качество сортового металла из катаных блюмов из неочищенного жидкого металла выше, чем из литых. Чтобы получить чистые по примесям литые блюмы, необходимо жидкий металл очищать, затрачивая на это немалые средства, отчего эффективность литых слябов снижается.

Другой недостаток литого блюма состоит в том, что площадь его поперечного сечения иногда недостаточна для того, чтобы обеспечить на сортовых станах необходимую проработку. Отношение площадей сечения литого сляба и готового проката называется *уковом*. Требуется определенный уков, чтобы свойства металла после прокатки были высокими. Чем мельче литой блюм, тем больше проявляется этот недостаток.

На большинстве сортовых металлургических заводов обычно блюминги работают хорошо, нет необходимости перестраивать процесс, поэтому катаные блюмы применяются чаще, чем литые. Однако производство литых блюмов экономичнее прокатки слитков на блюминге примерно на 10–15 %. Последние достижения в области очистки металла, строительство новых, более дешевых УНРС радиального и особенно горизонтального типа расширяют возможности применения литых блюмов. Становится эффективным отливка заготовки сечением 150×150–100×100 мм и даже меньше, при этом отпадает потребность в установке блюминга и НЗС вообще. Например, на череповецком заводе “Северсталь” реализуется проект перевода сортового производства полностью на использование литых блюмов сечением 100×100 и 150×150 мм. Во многих передовых странах по новой технологии основная часть сортового проката производится из литой заготовки. Одновременно решаются вопросы с очисткой и защитой жидкого металла при разливке и кристаллизации.

На мини-заводах и заводах с малыми объемами производства может быть особенно эффективным применение литых блюмов или более мелких литых заготовок. На таких заводах начинают внедряться комплексные непрерывные

агрегаты, в которых в единой непрерывной технологической линии установлены УНРС радиального или горизонтального типа и непрерывный сортовой прокатный стан, производящий готовую продукцию, например мелкий круглый прокат или арматурную сталь.

На заводах со средним и крупным объемом производства перспективно развитие обжимно-заготовочного комплекса, совмещающего машину непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) с заготовочным станом. Это позволяет в едином производстве сосредоточить все вопросы формирования качества, начиная от жидкого металла до готовой продукции, кроме того, повысить выход годного на 12–18 % за счет лучшей организации производства и значительно удешевить его.

Примерно такие же выводы получаются при сравнении литых и катаных слябов — заготовки для производства листа. **Сляб** имеет прямоугольную форму поперечного сечения высотой от 50 до 280 мм (верхний предел по-прежнему определяется неравномерностью структуры металла по сечению), шириной от 1000 до 2000 мм и длиной до 18 м (массой от 5 до 36–40 т). Такие размеры литого сляба резко увеличивают эффективность его использования: при одинаковом объеме производства литые слябы на 15–17 % дешевле, чем катаные (с учетом дополнительных затрат на очистку жидкого металла и защиту струи при разливке). Слябинг как обжимной агрегат значительно мощнее и дороже, чем блюминг, развес слябовых слитков доходит до 23–27 т, технология их прокатки сложнее, чем блюмов, а геометрические размеры недостаточно точны. Все это позволяет использовать литые слябы как основной вид полуфабриката для производства листа. Новых слябингов уже не строят, хотя существующие не демонтируют. У нас в стране и за рубежом, прежде всего в Японии, есть много крупных металлургических заводов, выпускающих листовую продукцию только из литых слябов (в России, например, НЛМК). Существует тенденция отливки не только крупных слябов для современных высокоскоростных прокатных станом, но и тонких слябов для мини-заводов, имеющих толщину около 50 мм, что позволяют по-новому организовать производство тонкого листа и значительно снизить затраты на его производство.

В заключение приводим основные тенденции в развитии мировой металлургии, связанные со структурой производства стали, непрерывно-литых заготовок и горячекатаной стали (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Тенденции развития металлургии в мире

Показатель	Производство стали				Непрерывная разливка		Горячекатаная сталь	
	Конвертерная, %	Электро-сталь, %	Маргеновская, %	млн. т	%	млн. т	%	млн. т
1980 г.	53,3	22,0	23,8	714,9	27,8	198,5	80,9	578,6
1990 г.	55,3	27,2	15,4	770,0	58,6	450,9	83,5	642,0
2000 г.	60,5	34,2	4,1	828,5	83,0	687,8	84,4	699,2
Прирост млн. т/год	5,68				24,66		6,03	

8.8. Сортамент сортового и листового проката

По форме поперечного сечения и назначению сортовой прокат можно разделить на несколько групп (рис. 8.5):

прокат простой формы сечения — круглый, квадратный, прямоугольный и шестигранный (верхний ряд на рис. 8.5); он относится к продукции общего назначения и используется при изготовлении различных деталей, а также как заготовка для операций резания, штамповки,ковки и др.;

прокат общего назначения более сложной формы поперечного сечения — уголки, швеллеры, тавровые и двутавровые балки, зет-профили, рельсы и др. (второй ряд на рис. 8.5); эти профили являются, как правило, окончательной продукцией и применяются в строительстве, на железных дорогах, а также в качестве деталей машин;

профили специального назначения, имеющие сложную форму поперечного сечения, приближенную к форме готового изделия (два нижних ряда на рис. 8.5, где представлены профили заготовки для турбинной лопатки, шлицевого вала, ножей сельхозмашины, станинной направляющей и др.); они предназначены для изготовления деталей с минимальными отходами металла.

Очевидно, по объему производства первая группа профилей наибольшая, но по разнообразию форм поперечных сечений самая малочисленная. И наоборот, профили третьей группы изготавливаются небольшими партиями, потребность в каждом из них мала, но количество таких профилей исчисляется тысячами. В сортаменте немецкой фирмы “Клекнер” насчитывается около 14000 таких профилей, примерно на таком же уровне их содержат каталоги США, в России производят порядка 3,0–3,5 тыс. фасонных профилей.

Во всем мире имеется тенденция к увеличению количества фасонных профилей, а также к повышению их точности и качества поверхности, что позволяет значительно экономить металл и снижать трудозатраты в машиностроении. В идеале точные фасонные профили должны иметь такую форму сечения, точность и качество поверхности, чтобы не требовалась их дальнейшая обработка при изготовлении готовой детали, за исключением, может быть, операций резки, шлифовки и термообработки. Но такие профили будут дорогими. Перед машиностроительным производством всегда стоит проблема: что выгод-

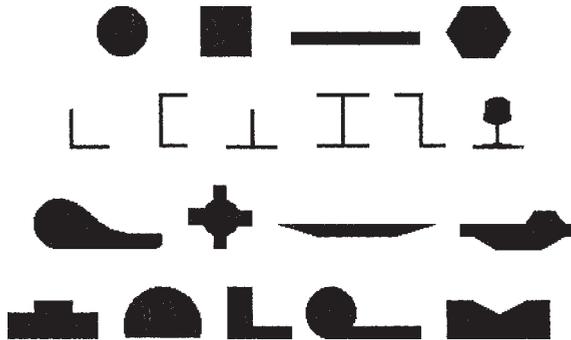


Рис. 8.5. Сортамент сортового проката

нее — использовать простую и дешевую заготовку, например круглую, которую ковкой, механической обработкой и другими операциями можно довести до готового изделия, или, наоборот, затратить больше средств на организацию производства фасонной заготовки, но сэкономить на металле и трудовых затратах. В целом нужно решать оптимизационную задачу на минимум общих затрат на всех переделах. В результате ее решения должен быть найден оптимальный по форме профиль фасонной заготовки, обеспечивающий минимальные суммарные затраты в металлургическом и машиностроительном производствах.

В затратной экономике Советского Союза стоимость металла была резко занижена, рабочая сила мало стоила и рыночные законы не работали. При развитом станочном парке было выгоднее, например, заготовку для турбинной лопатки (представленную на рис. 8.5) произвести фрезеровкой из круглой заготовки, чем налаживать производство фасонной заготовки. Коэффициент использования металла (КИМ) при изготовлении турбинной лопатки из фасонной заготовки увеличится до 80 % по сравнению с вариантом резания из круглого проката, при котором КИМ не превышает 20 %. При производстве металла в объеме 50–60 млн. т в год в России примерно 3–4 млн. т металла уходит в стружку и отходы, т. е. один крупный металлургический комбинат почти целиком “работает на стружку”! Производство точных фасонных профилей позволяет в значительной мере сократить потери металла при резании. К сожалению, развал экономики в годы кризиса в России мало способствует развитию производства экономичных профилей проката. Производство их в настоящее время наращивается медленно.

Во многих странах, например в США, а теперь и в России, принята двухступенчатая организация поставки металлургической продукции потребителю. Крупные металлургические предприятия не имеют контакта непосредственно с машиностроителями, а продают весь прокат на промежуточный склад, который непосредственно обслуживает потребителей. Многие склады за рубежом являются не просто местом хранения металла, а полноценным заводом. Они оборудованы необходимыми прокатными станами, термическими печами, отделочными станками и системами контроля проката, а также другим оборудованием для выпуска самых разнообразных простых и фасонных профилей в требуемом количестве и с требуемыми характеристиками по точности, качеству поверхности, кривизне, химическому составу стали, структуре металла и пр. В России такие склады пока не имеют столь развитой системы сервисного обслуживания потребителей, но тенденции заметны.

Листовой прокат можно разделить на три вида — толстый, тонкий горячекатаный и холоднокатаный. Каждому из них соответствует не только определенный диапазон размеров, но и своя проблематика, свой набор технологий. По ГОСТу толстым называется лист, имеющий толщину более 4 мм. Ширина листа зависит от типа прокатного стана и может изменяться от 1,5 до 4,5 м, длина — до 18 м. Толстые листы поставляются заказчику в виде прямоугольных карточек. Толстые листы толщиной выше 60 мм называются плитами.

Тонкий горячекатаный лист имеет размеры от 1,2 до 4–5 мм и поставляется заказчику в виде как отдельных карточек (пакетами карточек), так и рулонов массой от нескольких килограмм до 36 т. В таком же виде часто поставляется толстолистовая продукция толщиной до 16 мм (максимальный вес рулона

определен грузоподъемностью железнодорожного вагона 72 т, оборудованного для перевозки двух рулонов).

Холоднокатаный лист имеет толщину от 0,2–0,4 до 8 мм, ширина его также зависит от типа прокатного стана и колеблется в диапазоне примерно 1000–2200 мм. Холоднокатаные листы также поставляются в виде пакетов карточек или рулонов массой до 36 т (не должно смущать некоторое перекрытие по толщине листа на разных типах листов, это определяется технологическими и экономическими возможностями разных станов).

Листовой металл в целом имеет более высокие эксплуатационные характеристики (прочностные, пластические и технологические), чем сортовой прокат. Наиболее качественной и дорогой металлургической продукцией является холоднокатаный лист, и потребность в нем непрерывно растет на мировом рынке и внутри страны. В России, как и во всем мире, идет развитие металлургического производства, прежде всего, в направлении наращивания мощностей по производству листа, в первую очередь холоднокатаного, особенно с покрытием и с высокими эксплуатационными свойствами.

Здесь уместно остановиться на советском периоде истории развития производства проката у нас в стране. Как известно, после Гражданской войны металлургия в СССР находилась на нулевом уровне, и только в 1932–1933 гг. появились первые советские прокатные станы. Страна нуждалась в металле, чтобы наращивать оборонную мощь, развивать машиностроение и другие отрасли народного хозяйства. Лозунг того времени “Больше дешевого металла!” на значительный период определил развитие советской металлургии. Предпочтение отдавалось таким производствам, которые позволяли давать дешевый металл в больших объемах. Качество его было пока фактором второстепенным. В первую очередь стимулировалось развитие литейного и сортопрокатного производства. Однако приоритетное их развитие создавало определенный перекос металлопотребления в машиностроении, определяя его ориентацию на тяжелые литые металлоконструкции, большое количество ручного труда и операций резания. Получили сравнительно слабое развитие прогрессивные операции листовой штамповки, зависящие от степени развития листопркатного производства, сдерживалось производство гнутых профилей и ленты. Не могли развиваться целые направления машиностроения.

Только в конце 1950-х гг. в СССР встал вопрос о производстве не любого, а качественного металла. Это связано с мероприятиями по очистке исходного металла и выплавке более качественных марок стали, с внедрением в прокатном производстве оборудования для получения и контроля качества проката. Приоритетными стали такие металлопроизводители, которые обеспечивают более высокие механические свойства металла, меньший расход металла на единицу продукции в машиностроении. Более быстрыми темпами стало развиваться листопркатное производство и соответствующие отрасли машиностроения. В 1985 г. (год наибольшего производства литого металла — 152 млн. т) в СССР примерно 60 % от всего объема проката составлял сортовой и 40 % листовой прокат. Для правильного развития машиностроения, исходя из потребностей страны, требовалось примерно равное соотношение между листом и сортом. Наиболее быстрыми темпами наращивалось производство листа, особенно холоднокатаного, с улучшенной поверхностью, с высокой способнос-

тью к штамповке, с покрытиями, из легированных и нержавеющей марок стали. После развала блока социалистических стран, а затем и Советского Союза многие из этих производств остались за пределами России. Вновь стоит проблема наращивания производства многих видов листовой и сортовой продукции — толстого и холоднокатаного листа с покрытиями, жести, мелкого сорта, проволоки и арматуры и др.

Кстати, в экономически развитых странах, таких как США, Япония, Германия, примерно 55–60 % проката выпускается в виде листа и 40–45 % — в виде сорта. Такое соотношение вызвано не запросами внутренних потребителей этих стран, которые также перерабатывают примерно равное количество листового и сортового проката. Высококачественный лист, особенно холоднокатаный, на мировом рынке пользуется большим спросом и ценится значительно дороже, чем сортовой прокат, и эти страны являются основными поставщиками листа во многие страны. За последние годы резко возросло производство металлургической продукции, прежде всего листовой, в Китае, Южной Корее, Бразилии и др. По количеству выплавленного металла в год Китай уже опередил США и Японию, выйдя на уровень свыше 200 млн т/год.

Производство проката в России в настоящее время ежегодно увеличивается на 3–4 % и в 2002 г. составило по листу 21 млн т (43 %) и 15,1 млн т по сорту (24 %). До 2005 г. преимущественно развивалось листовое производство. Но с 2005 г. ситуация начинает меняться в пользу сорта, производство которого увеличивается до 17–18 млн. т (в 2005 г.), также более высокими темпами растет потребление сортового проката на мировом рынке. В 2002 г. производство сорта составляло 51 % и листа — 49 %, а в 2010 г. будут производить 53 % сорта и 47 % листа (по прогнозам).

Российские заводы ОАО “Северсталь”, НЛМК, ММК активно выступают на мировом рынке листового металла, особенно холоднокатаного. По качеству наш лист ничем не уступает зарубежному. При неразвитом потреблении внутри страны экспорт листового металла является для этих заводов важным стимулом развития производства. На мировом рынке стало “тесно”. Многие из стран, которые раньше покупали металлопрокат, сейчас сами его производят и успешно конкурируют на мировом рынке (Китай, Индия, Бразилия, Турция и др.). Кстати, даже самый высококачественный японский лист на мировом рынке стал трудно реализуемым, так как, с одной стороны, высокое качество достигается уже во многих странах, с другой — высокое качество обеспечивается высокими затратами, и потребитель часто не готов переплачивать за дополнительное качество такого листа. Более дешевый лист можно купить теперь у многих производителей. На международном рынке реализуется примерно пятилетний цикл развития и спада потребности в металле. Как только определяется потребность в каком-то виде металла, все страны в условиях жесточайшей конкуренции моментально наращивают производство, и рынок быстро наполняется этим видом продукции. Но когда потребности удовлетворяются, наступает спад производства. В этот цикл включились также российские предприятия.

Наши металлургические заводы стремятся укреплять связи с внутренними потребителями металла (автомобильными, машиностроительными, судостроительными предприятиями), наращивают мощности по производству товаров

народного потребления, скупают машиностроительные предприятия в целях организации единого комплекса производства от получения металла до выпуска готовой машины. Такие предприятия, как ОАО “Северсталь”, образуют холдинговые компании, в которые входит множество предприятий — от добывающих сырье до производящих автомобили. Развитие внутреннего рынка позволит избежать той лихорадки, которая имеет место на мировом рынке.

8.9. Сортамент продукции четвертого передела

Термин “четвертый передел” появился на крупных металлургических заводах, имеющих три предыдущих передела (аглодоменный, сталеплавильный и прокатный). В более широком смысле под этим термином подразумевают все цеха, как расположенные на металлургическом заводе, так и работающие независимо от него, перерабатывающие прокат в какие-то металлические изделия (метизы) и товары народного потребления. Видимо, четкого перечня производств четвертого передела не существует, и сюда можно включить любые цеха, в которых из проката получают какие-то изделия. Но существуют традиционные производства, которые отличаются устойчивой технологией и большим объемом выпускаемой однотипной продукции, которые заслуживают наибольшего внимания. К цехам четвертого передела не относят цеха по производству труб, хотя трубы производят в основном из катаной сортовой заготовки. Трубное производство — это самостоятельная металлургическая отрасль. Во всех учебных программах изучение его выделяется в самостоятельный курс, поэтому в данном учебном пособии не рассматривается.

Традиционно крупным производством четвертого передела является производство проволоки. Прежде всего обратим внимание на терминологию! Прокатные проволочные станы выпускают не проволоку, а *катанку*, которая затем на волочильных станах в цехах четвертого передела перерабатывается в *проволоку* — продукт волочения. Волочение — дорогой и малопроизводительный процесс, поэтому на прокатных станах стремятся получить как можно более тонкую катанку. По ГОСТу предусмотрена катанка диаметром 6,3 мм, что соответствует определенному техническому уровню проволочных прокатных станов. Современные проволочные станы способны на высоких скоростях (до 100 м/с и даже выше) производить катанку диаметром 5,0–5,5 мм, и естественно, их продукция выше котируется в волочильном производстве и на мировом рынке.

Волочение по сравнению с прокаткой обеспечивает большую точность и лучшее качество поверхности металла, которая не содержит окалины. При прокатке обычная точность профиля лежит в пределах нескольких десятых долей миллиметра (например, для круга диаметром 30 мм допуск колеблется от $-0,7$ до $+0,5$ мм). При волочении отклонения почти на порядок меньше (примерно $\pm 0,1$ мм) и определяются точностью изготовления инструмента, а не уровнем технологии, как при прокатке.

Волочение используется для производства не только проволоки, но и калиброванного проката. Калиброванным называется сортовой прокат простой формы поперечного сечения, который освобожден от окалины и подвергнут

одной-двум операциям волочения в целях придания ему большей точности. Заметим, что точные фасонные профили, часть из которых представлена на рис. 8.5, не относятся к категории калиброванного проката. Они образуют самостоятельную разновидность продукции — точные фасонные профили. Конечной операцией при их производстве часто является волочение или холодная прокатка, поэтому их производство также можно отнести к четвертому переделу.

Строго говоря, необходимость в строительстве калибровочных цехов вызвана лишь тем, что прокатное производство не в состоянии обеспечить потребности машиностроения по точности простого проката и качеству его поверхности. Поэтому, с одной стороны, необходимо увеличивать производство калиброванного металла, а с другой — “бороться” с ним как с “лишним” и дорогим переделом, стремясь уже в прокатном производстве обеспечить требуемые свойства сортового проката. Одна из тенденций в прокатном производстве заключается в том, чтобы уже в линии прокатного стана установить оборудование, дающее возможность получать калиброванный прокат без окалины с допуском $+0,0...-0,17$ мм и меньше.

Сортамент метизного производства на базе сортового металла очень широк, и его характеристику можно было бы значительно расширить, включая производство болтов, шурупов, гаек, гвоздей и т. д.

Из цехов четвертого передела, перерабатывающих листовую прокат, следует отметить только два: по производству ленты и фольги и по производству гнутых профилей. Лента получается из листа путем его разрезки вдоль и последующей холодной прокатки до требуемых толщин. Ширина ленты не превышает 400 мм. Она прокатывается и поставляется обязательно в виде рулонов, толщина ее может быть самой разной — от нескольких миллиметров до нескольких микрометров (самая тонкая — до 0,5 мкм).

Гнутые профили получают из горячекатаного или холоднокатаного листа и ленты путем профилирования на профилегибочных станах. Сортамент таких профилей весьма разнообразен, представление о нем дает рис. 8.6. Следует отметить, что среди гнутых большую группу составляют те же строительные профили, что и в сортаменте сортового проката: уголки, швеллеры, зетобразные профили и др. Но, в отличие от сортовых, гнутые профили легче, точнее по размерам, могут иметь практически любую толщину полок и стенок, могут не содержать окалины и быть оцинкованными, покрашенными, покрытыми пластмассой. Существуют гнутые профили, которым нет аналогов в сортопрокатном производстве, — полузакрытые, закрытые, перфорированные, сварные и др.

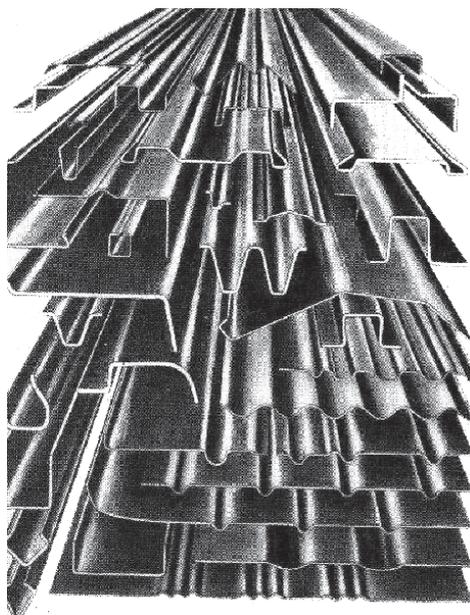


Рис. 8.6. Гнутые профили

Отдельную группу представляют гнутые гофрированные профили типа металлического шифера и профилированного настила.

Высокая точность гнутых профилей позволяет создавать новые металлоконструкции, например телескопические пожарные лестницы, сварные детали оконных металлических переплетов и т. п. Отличные декоративные свойства в сочетании с высокой прочностью позволяют широко использовать их в вагоностроении, судостроении, создании интерьеров внутренних помещений зданий, в метро и т. д. Применение гнутых профилей в строительстве и машиностроении в целом экономит до 15–17 % металла, а в отдельных случаях — до 45 %.

У гнутых профилей имеется только один недостаток, сдерживающий их производство, — дороговизна, так как они изготавливаются из листа, который представляет собой более дорогую продукцию, чем сорт. Однако создание более ажурных, прочных и внешне красивых металлоконструкций часто окупает затраты. Потребность в гнутых профилях непрерывно растет, особенно в мелких по размерам и объему партиях.

Конечно, рассмотренный набор производств четвертого передела на этом далеко не исчерпывается. На многих заводах к таковым относят даже цеха по первичной обработке проката (гибка, резка и т.п.), дополнительной холодной деформации, производству товаров народного потребления: сеток, канатов, гвоздей, штампованной посуды, мебели и др. Следует отметить, что во всех этих производствах обработка давлением является ведущей технологической операцией.

Глава 9

ПРОИЗВОДСТВО КАТАНЫХ БЛЮМОВ И СЛЯБОВ

9.1. Общая технология производства катаных блюмов и слябов

Отлитые в сталеплавильном цехе слитки по железнодорожному пути направляются в обжимной цех. Предварительно в специальном отделении сталеплавильного цеха производится разделение слитков. Затвердевший слиток кипящей стали, расширяющийся книзу, полностью освобождается от изложницы, а со слитка спокойной стали сначала снимают прибыльную надставку и затем отрывают его от изложницы. Извлечение из нее осуществляется уже в отделении нагревательных колодцев (ОНК) обжимного цеха.

Удобно технологию рассматривать на конкретных станах. На рис. 9.1 приведена схема блюминга 1300 Криворожского металлургического комбината. На рис. 9.2 представлен план расположения оборудования в обжимном цехе ОАО “Северсталь” с блюмингом-слябингом 1300, прокатывающим как блюмы для сортовых, так и слябы для листовых станов.

В ОНК с помощью колодцевого крана слитки загружаются в свободные ячейки нагревательных колодцев. В колодцах происходит выравнивание темпе-

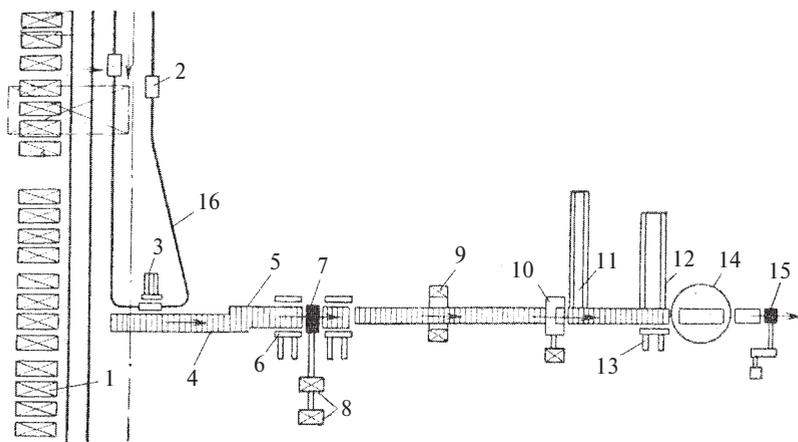


Рис. 9.1. Схема расположения оборудования обжимного цеха
Криворожского металлургического комбината:

1 — нагревательные колодцы (показана только часть колодцев); 2 — слитковоз; 3 — сталкиватель; 4 — приемный рольганг; 5 — рабочий рольганг; 6 — манипулятор с кантователями; 7 — клеть стана 1300; 8 — электродвигатель рабочей клетки; 9 — машина огневой зачистки (МОЗ); 10 — пресс-ножницы; 11 — конвейер уборки обрезки; 12 — конвейер уборки блюмов; 13 — сталкиватель; 14 — поворотный стол; 15 — первая клеть НЗС; 16 — кольцевая подача

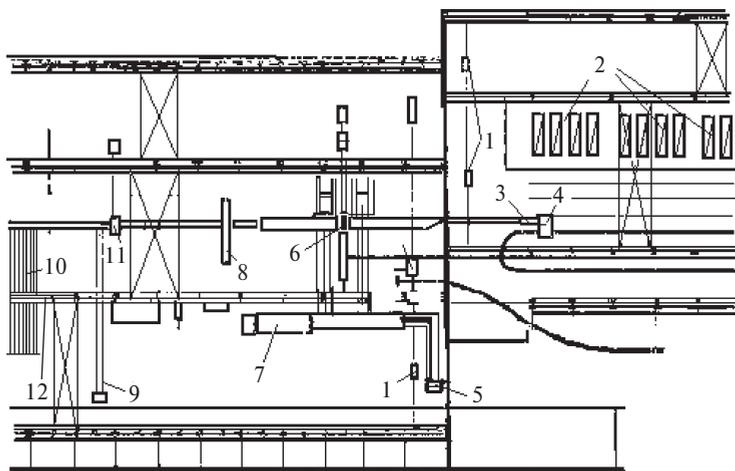


Рис. 9.2. Схема расположения оборудования блюминга 1300
ОАО «Северсталь»:

1 — тельферные краны; 2 — нагревательные колодцы; 3 — приемный рольганг с боковым сталкивателем слитков; 4 — слитковоз (кольцевая подача); 5 — бункер для окалины; 6 — блюминг; 7 — колодец для окалины; 8 — машина огневой зачистки (перенесена на НЗС); 9 — конвейер для обрезков; 10 — шлеппер для готовых блюмов и слябов; 11 — ножницы; 12 — рольганг к НЗС

ратур по сечению слитка, а также подогрев его поверхности до требуемой температуры. Время нагрева и расход топлива зависят от того, какую температуру имеет слиток в момент его загрузки в колодец, и чем она выше, тем лучше. На металлургических заводах поощряют работников участка сталь—прокат за обеспечение высокой температуры поверхности сажаемых в колодец слитков, так как она в основном зависит от правильной организации работы на этом участке. ЭВМ контролирует ситуацию одновременно в сталеплавильном цехе, в цехе подготовки изложниц, в железнодорожном цехе, в ОНК и на блюминге (или слябинге) и постоянно решает задачу на оптимизацию графика работ всех служб, работающих в системе сталь—прокат, обеспечивая максимально возможную температуру “горячего всада” слитков в колодец. Обычно она на поверхности находится в пределах 750–850 °С. Время нагрева горячих слитков составляет 2,5–4,0 ч. Например, на Нижнетагильском блюминге внедрение автоматизированной системы слежения в системе сталь—прокат и организация горячего всада сократили угар металла на 15–20 %, а удельный расход топлива — на 4–5 кг на 1 т проката.

На крупном металлургическом заводе примерно 5 % слитков (в среднем за год) поступает в колодцы в холодном состоянии со склада. На склад слитки попадают только в аварийных ситуациях, когда блюминг или колодцы не в состоянии принять уже отлитые слитки. Если сталеплавильный цех остановлен, то слитки в обжимной цех поступают со склада. Время нагрева холодных слитков увеличивается в три-четыре раза и составляет 10–14 ч.

Организация “горячего всада” слитков полезна также с позиций повышения качества металла: уменьшаются термические напряжения между поверхностными и внутренними слоями металла при нагреве, брак по трещинам, сокращается доля обезуглероженного металла. За счет почти равномерного распределения температуры по сечению увеличивается пластичность металла и появляется возможность деформации в более интенсивном режиме. Это способствует также равномерной проработке слитка по сечению, уменьшению условий для раскрытия внутренних трещин, а также сокращению обрезки по концам.

На заводе фирмы “Нипон кокан” в Фукуяме (Япония) внедрена прокатка слитков без нагрева их в колодцах. Слитки кипящей стали после разливки, имеющие еще жидкую сердцевину, после раздевания укладываются на специальные платформы и накрываются теплоизоляционным колпаком. При транспортировке в обжимной цех происходит выравнивание температуры по сечению до требуемой температуры прокатки. Время транспортировки и начала прокатки строго отслеживается и регулируется в зависимости от марки стали. Применение такого способа прокатки позволило увеличить выход годного на 1 % и снизить концевую обрезку на 0,59 %. Конечно, при такой технологии небольшой промежуточный склад слитков и часть колодцев должны быть сохранены для холодных слитков, образующихся при сбоях производства.

На некоторых заводах Японии, а также на нижнетагильском и челябинском блюмингах испробована технология прокатки слитков, когда сердцевина их еще не остыла до твердого состояния. Установлено, что наиболее целесообразен “горячий всад” слитков с 10–20 % жидкой фазы внутри. Начинают прокатку при содержании до 5 % жидкого металла в сердцевине. Это обеспечивает интенсификацию режимов деформации и повышение выхода годного на

2–3 %. При более высоком количестве жидкой фазы на поверхности раската появляются вздутия, образующиеся при выделении газов из жидкого металла. Кроме того, не исключается прорыв жидкости при прокатке. Это совершенно недопустимо по технике безопасности. Поэтому большинство заводов предпочитают прокатывать металл тогда, когда сердцевина полностью застывает и температура ее не менее чем на 150 °С выше температуры поверхности.

На мелких заводах такой четкой организации на участке сталь—прокат нет, многие предприятия работают на покупных слитках, поэтому доля слитков, поступающих в колодец в горячем виде, значительно меньше или вообще равна 0. Кроме того, “холодный всад” имеет одно достоинство перед горячим: он позволяет осмотреть слиток перед нагревом и, если требуется, отремонтировать его. Это очень важно для слитков легированных марок стали, брак при прокатке которых стоит дорого. Иногда всю партию таких слитков в обязательном порядке на специальных станках полностью обдирают, чтобы удалить мелкие поверхностные трещинки, которые неизбежно появляются в процессе отливки и затвердевания слитков. Из теории ОМД известно, что поверхностные трещинки на металле при прокатке могут только увеличиваться, так как схема напряженного состояния поверхностных слоев при прокатке содержит продольные растягивающие напряжения. Чем раньше трещины удалены, тем больше годного металла будет на выходе. При горячем всаде слитков борьба с поверхностными трещинами начинается, как правило, только после прокатки на обжимном стане, что может быть уже поздно.

Продолжим движение по технологической цепочке. Нагретые в колодце слитки тем же коловцевым краном вытаскиваются и помещаются на одну из свободных тележек, постоянно двигающихся со скоростью примерно 5 м/с в одном направлении по кольцевой железной дороге (кольцевая подача). Когда тележка со слитком оказывается на уровне транспортного рольганга, слиток с помощью сталкивателя подается на этот рольганг. Первая секция его содержит весы, передающие результаты взвешивания в ЭВМ и далее в автоматизированную систему слежения и учета металла, которая будет постоянно отслеживать состояние металла до самого конца технологического цикла. По транспортному рольгангу слиток движется к рабочему рольгангу. Рабочие ролики рольганга расположены сзади и спереди стана и не только выполняют транспортные операции, но и принимают непосредственное участие в прокатке слитка. Сам процесс прокатки осуществляется в рабочей клетке блюминга или слябинга в несколько пропусков в реверсивном режиме (со сменой направления вращения в каждом пропуске). Обычно ведут прокатку одновременно двух слитков.

Прокатанные блюмы или слябы на многих блюмингах далее попадают в машину огневой зачистки (МОЗ), схема которой изображена на рис. 9.3. На блюминге-слябинге ЧерМК, показанном на рис. 9.1, МОЗ отсутствует, потому что она вынесена на следующий за ним непрерывно-заготовочный стан (НЗС). МОЗ представляет собой раму, настраиваемую под размер сляба (блюма), с расположенными

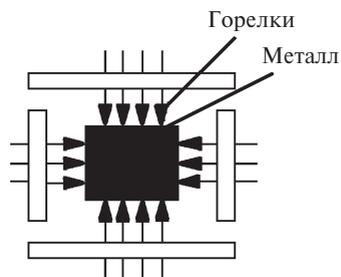


Рис. 9.3. Схема действия машины огневой зачистки (МОЗ)

ми по периметру газовыми горелками, через которые на поверхность движущегося металла подается технически чистый кислород. На глубину 3, 5 или 7 мм в зависимости от режима настройки сжигается поверхностный слой сляба (блюда) вместе с поверхностными трещинками. Конечно, при таком способе борьбы с поверхностными дефектами также выжигается много здорового металла, его потери составляют 2–4 %.

На ММК, а также ряде японских заводов резко снизили потери металла на МОЗ, внедрив выборочную зачистку металла. Перед МОЗ установили бесконтактный дефектоскоп, позволяющий обнаруживать поверхностные трещины на горячем металле. Зачистке на МОЗ подвергаются только пораженные трещинами блюмы. На заводах фирмы “Син ниппон сэйтэцу” (Япония) на среднеуглеродистых сталях внедрена технология производства слитков без поверхностных дефектов, и необходимость в МОЗ отпала. Однако по этой технологии требуется очень строгое выполнение условий сифонной разливки стали, жесткие режимы нагрева слитка с минимальным окислением и соответствующие режимы деформации.

В целом МОЗ, видимо, выгодна при крупном производстве, когда работают по технологии горячего всада и нет возможности контролировать поверхность каждого слитка, когда процент поверхностных дефектов высок, когда за счет высокой производительности дополнительные потери полностью оправдываются. Можно считать, что при производстве примерно 3 млн. т и более блюмов в год заводу выгоднее установить МОЗ, чем выдерживать жесткие требования технологии производства слитков без поверхностных дефектов. На более мелких заводах МОЗ отсутствует, применяется только холодный всад и эффективен предварительный осмотр, ремонт и сортировка слитков перед посадкой их в колодец.

Следующей технологической операцией является резка проката на прессножницах. Выше указывалось, что слитки спокойных марок стали содержат головную часть (примерно от 10 до 12 % от массы слитка), в которой концентрируются примеси, неметаллические включения и прочая “грязь”, поэтому ее необходимо отделить от здоровой части слитка и разрезать на отдельные кусочки длиной не более 700 мм, удобные для транспортировки вновь в сталеплавильные цеха. Также отрезается донная часть слитка (1,5–3,0 % от массы слитка), имеющая примеси и утяжку по средней части сечения (рис. 9.4). Процент обрезки головной и особенно донной части слитка в значительной мере зависит от режима обжатия.

Для удаления обрезков ножницы горячей резки оборудованы наклонным конвейером для транспортировки обрезков и сбрасывания их в специальные железнодорожные вагоны (думпкары). Здоровая часть слитка (80–85 % по массе) далее прокатывается на непрерывно-заготовочном стане или также разрезается на мерные длины и отправляется потребителям как товарная продукция. Ножницы уп-

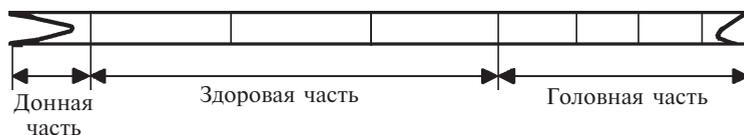


Рис. 9.4. Схема резки раската после блюминга (слябинга)

равляются с помощью ЭВМ, которая позволяет вести учет длин каждого блюма и их суммарную длину в системе автоматизированного учета проката.

На некоторых заводах, например на слябинге ММК, на участке ножниц установлена система автоматизации контроля и учета обрезки металла, позволяющая экономить около 5 тыс. т металла в год за счет более точной установки нормы обрезки металла. Перед ножницами установлен ролик, вращающийся при контакте с движущимся металлом, угол поворота которого преобразуется в длину раската. Затем на ЭВМ по заложенным в нее среднестатистическим нормам обрезки вычисляются длины отрезаемых головной и донной частей слитка, и соответствующие расчетные данные направляются на механизмы установки упора ножниц, которые реализуются в автоматическом режиме. Конечно, установление норм обрезки для каждой марки стали и каждого типа слитка, а также автоматическая коррекция их в зависимости от режима обжата представляют отдельную проблему при внедрении такой системы.

После разрезки производится клеймение на ходу полученного сляба или блюма с помощью рычажного автоматического клеймителя. При этом указываются марка стали, плавка и другие данные о металле. Смена клейм осуществляется дистанционно с пульта оператора. На лучших обжимных станах имеются автоматические дисковые клеймители, которые осуществляют клеймение также обрезков головной и донной частей слитка, направляемых в переплавку. Основная доля блюмов движется далее по роллангу к непрерывно-заготовочному стану.

Товарные (на продажу) блюмы с помощью шлеппера передаются на приемные стеллажи и далее на охлаждение. Они охлаждаются по определенному режиму в зависимости от марки стали. Простые углеродистые марки стали с низким и средним содержанием углерода, представляющие основную долю сортамента крупного металлургического завода, при любой скорости охлаждения не образуют трещин, поэтому при их охлаждении стремятся даже увеличить скорость охлаждения, чтобы сэкономить площади и увеличить пропускную способность холодильников. Часть пути заготовки с содержанием углерода до 0,2 % проходят под водой или обрызгиваются воздушно-водяными струями. При этом не только экономятся площади холодильника, но и уменьшается на 0,5 % количество вторичной окалины, образующейся при охлаждении проката.

Основные проблемы возникают при охлаждении легированных и высокоуглеродистых марок стали. Флокеночувствительные марки стали охлаждаются по особому режиму. В связи с пониженной пластичностью высокоуглеродистых и многих конструкционных легированных марок стали при естественной скорости охлаждения могут возникнуть высокие термические напряжения с образованием трещин, поэтому для них применяют замедленное охлаждение в неоттапливаемых колодцах или отапливаемых печах с режимным изменением температуры во времени. Для более простых марок стали применяют замедленное охлаждение металла в штабелях.

9.2. Нагрев слитков

Все колодцы в ОНК разделены по группам нагреваемых сталей (на ОАО “Северсталь” — шесть групп, на многих других заводах их больше за счет высокой доли легированных марок стали). В каждой группе устанавливается свой

режим нагрева. Каждый колодец, как правило, состоит из двух-четырех одинаковых ячеек. В одну ячейку загружают от 6 до 14 слитков одной плавки (редко — двух плавков той же марки или одной группы марок стали по нагреву). Слитки располагаются равномерно по периметру рабочего пространства ячейки (рис. 9.5, *а*). Она имеет центрально расположенную горелку (рис. 9.5, *б*), через которую подаются подогретые газ (реже — жидкое топливо) и воздух. Пламя от сгорания топлива распространяется вверх, отражается от крышки колодца и, равномерно огибая все слитки, устремляется вниз к дымовой трубе. Такое движение печных газов благоприятно с точки зрения качества нагрева, так как слиток быстро и равномерно омывается газами и прогревается по длине и поперечному сечению. Однако условия работы на колодцах такой конструкции очень тяжелые. Пламя, ударяясь в крышку, быстро изнашивает ее, температура в зоне обслуживания колодцев очень высока как для обслуживающего персонала, так и для механизмов.

В колодцах с боковой подачей топлива (рис. 9.5, *в*) пламя скользит вдоль крышки и не столь сильно разогревает и разрушает ее. Условия работы персонала значительно лучше. Но качество нагрева в таких колодцах ухудшается. Печные газы при длинном пламени омывают дальние слитки, а ближние прогреваются за счет излучения от стенок колодца практически только с одной стороны. Чтобы прогреть все грани слитков, нужно непрерывно изменять длину пламени с помощью специальной системы автоматического регулирования.

Нагрев слитков под прокатку состоит из двух периодов. Первый период характеризуется максимально допустимым расходом воздуха и газа, обеспечивающим для простых марок стали максимальную скорость подъема температуры слитка до заданного значения. Для многих легированных сталей до температур 700–800 °С скорость подъема температуры ограничивается низкой пластичностью металла. Из-за большого перепада температур по сечению слитка возможно образование трещин.

При более высоких температурах скорость подъема температуры может быть значительно увеличена. Второй период — томление слитка — протекает при умеренном расходе газа и воздуха, он необходим лишь для поддержания требуемой температуры в колодце и выравнивания температуры металла по сечению слитка. Температура томления в колодце определяется диаграммой состояния метал-

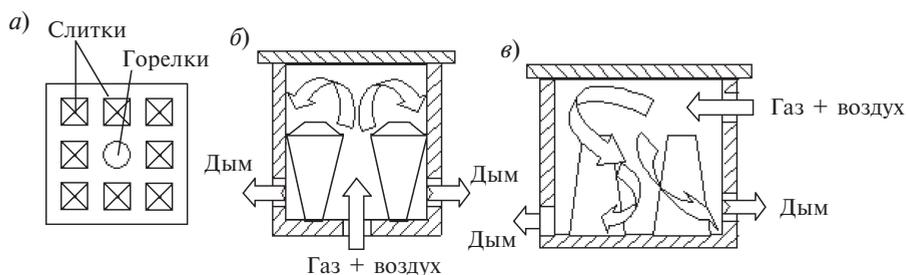


Рис. 9.5. Ячейки нагревательного колодца:

а — вид сверху; *б* — ячейка с центральной горелкой;
в — ячейка с боковой горелкой

ла (рис. 9.6) и выбирается на 50–100 °С ниже линии солидуса (начала плавления сплава).

Для сталей первой группы, куда входят низкоуглеродистые стали с содержанием углерода не выше 0,37 %, температура газов в ячейке при томлении составляет 1340–1360 °С, а температура металла при выдаче из колодца равняется 1270–1300 °С. К этой группе относятся кипящие стали марок Ст0–Ст4, 08–20, 08Ю, 08кп и др. и полуспокойные стали СтЗпс–Ст5пс, СтЗГпс и др.

Следующую группу марок составляют среднеуглеродистые и низколегированные конструкционные стали типа 40–55, Ст6пс, 22Г, 12ХН, 09Г2, 17ГС, 35ГС, 14ХГС, 25ХГТ, 20Х–45Х, 30ХГСА и др. Температура выдачи таких слитков из печи составляет 1260–1290 °С.

Единую группу образуют стали 60, 60Г–65Г, 50Х, 40ХН, 20ХГСНМ, 18ХГТ, 12Х17, 22Х2Г2АЮ, 38ХГН и др., температура их нагрева снижается до 1250–1270 °С. Для высокоуглеродистых сталей с содержанием углерода 0,7–0,9 % (70–85, 60С2ХА, 5ХНВ, 6ХВ2С, У7–У8 и др.) температура металла при выдаче 1220–1250 °С. При более высоком содержании углерода (углеродистые У9–У12 и многие высоколегированные инструментальные и штамповые стали типа ШХ6–ШХ15, 9Х, ХВГ, ХГС, 85ХС и др.) температура выдачи металла снижается до 1100–1150 °С. Если для углеродистых и низколегированных сталей температура нагрева определяется однозначно по приведенной диаграмме, то для легированных и высоколегированных сталей диаграмма состояния сильно искажается, и температуру нагрева определяют по справочникам по нагреву. При более высокой температуре томления, чем рекомендовано технологической инструкцией, происходит неисправимый брак, который называется *пережогом*, когда границы зерен металла начинают оплавляться.

Нагрев слитка перед прокаткой является весьма ответственной технологической операцией, в значительной мере определяющей качество готового металла. Помимо температуры много других параметров влияют на качество металла. Если для низкоуглеродистых сталей скорость подъема температуры нелимитирована, то для высокоуглеродистых и многих легированных марок сталей она ограничивается, так как температурные напряжения между наружными и внутренними слоями металла могут привести к образованию внутренних трещин. Внутренние разрывы могут выходить в виде поперечных наружных трещин на боковые грани слитка, которые называются скворечниками.

Важным параметром нагрева является время томления слитка. Известно, что при высокой температуре происходит рост зерна металла за счет рекристаллизации. Затем при пластической деформации наследственно крупное зерно может частично сохраниться, суммарная степень деформации может быть недостаточной, чтобы достигнуть мелкозернистой конечной структуры. Для крупного зерна в готовом изделии характерна пониженная пластичность. Особенно чувствительна к величине зерна ударная вязкость металла. Крупное зер-

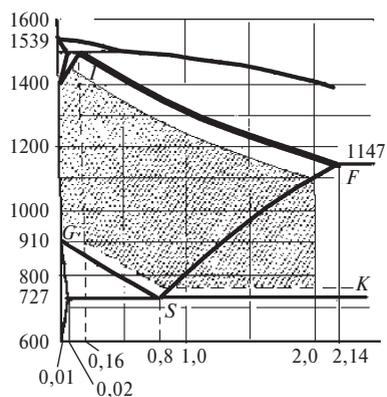


Рис. 9.6. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

но не желательно для некоторых легированных (инструментальных) сталей по той причине, что при прокатке они становятся недостаточно пластичными.

Крупное зерно образуется при длительном пребывании металла в печи. Такие ситуации возникают при поломках стана, при авариях и грубых нарушениях технологической инструкции по нагреву. Образующийся при этом брак называется *перегревом*. Он может быть исправлен путем перекристаллизации металла. Необходимо охладить металл до температуры начала рекристаллизации и вновь нагреть до заданной температуры в соответствии с технологической инструкцией.

Для высокоуглеродистых и инструментальных сталей длительное пребывание металла при высоких температурах связано с образованием еще одного вида брака — *обезуглероживания*. Углерод в поверхностных слоях слитка, соединяясь с кислородом, водородом и окисью углерода СО, находящихся в продуктах горения топлива, удаляется из металла. Поверхностные слои обедняются углеродом. После прокатки такой металл для инструмента не обеспечивает необходимые режущие качества. Обезуглероживание снижает твердость металла, сопротивление сжатию, истираемость и другие важные эксплуатационные характеристики металла. Борьба с обезуглероживанием можно двумя способами. Первый состоит в том, чтобы уменьшить в атмосфере колодца содержание кислорода O_2 , окиси углерода СО и водорода H_2 , определяющие реакции обезуглероживания. Второй (“варварский”, но легко реализуемый) способ, иногда применяемый на старых заводах, заключается в наведении, наоборот, сильно окислительной атмосферы в колодце путем дополнительной подачи кислорода. При этом поверхностные слои металла быстрее окисляются, чем обезуглероживаются. После удаления окалина на прокатном стане здоровая часть металла оказывается с нормальным содержанием углерода. Конечно, такой прием связан с большим отходом металла в окалину. Окалина — это также своего рода брак, который определяет *угар* металла. При нормальном нагреве слитков угар составляет 1–2 % по массе слитка, а при окислительном нагреве он увеличивается до 4–5 %.

9.3. Валки блюминга и режимы обжатия на блюминге

Клеть блюминга или блюминга-слябинга содержит два вала примерно одинакового диаметра — от 850 до 1500 мм. Диаметр валков типовых блюмингов и слябингов $D = 1300$ мм. Он всегда указывается в названии стана (например, блюминг 1300, блюминг 900) как емкая характеристика его возможностей по производительности, мощности, составу оборудования, технологии и пр.

Валки блюминга имеют участок гладкой бочки и два-пять ящичных калибров. На рис. 9.7 приведены валки нескольких действующих станов. Гладкая бочка выполнена с небольшим врезом в валок (на 50–150 мм) для удобства работы оператора: он лучше видит этот участок, меньше опасается направить слиток мимо гладкой бочки, быстрее работает. Большой врез ослабляет сечение валака. Ранее (см. рис. 6.3) была приведена конструкция ящичного калибра и его элементы. Выпуск на блюминге составляет 10–25 %.

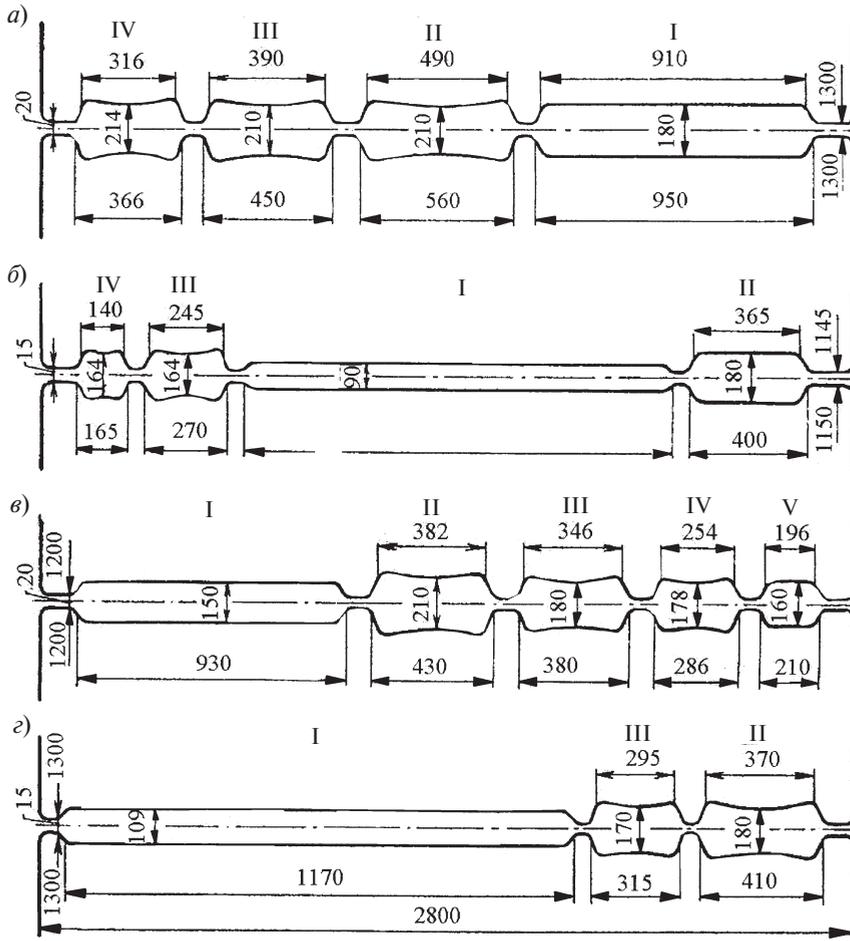


Рис. 9.7. Калибровки валков некоторых блюмингов:

a — 1300 (КрМК); *б* — 1150 (КМК); *в* — 1150 (КрМК); *г* — 1300 (ЧерМК)

При прокатке в калибре ширина полосы b должна быть больше ширины калибра по дну b_1 и меньше ширины калибра по буртам b_2 (например, для калибра II на рис. 9.7, *a* ширина полосы должна находиться в пределах 405–445 мм). При этом условии боковые стенки калибра воздействуют на полосу, создавая стесняющее воздействие. За счет этого:

1) больше металла устремляется в вытяжку, быстрее и с меньшими суммарными затратами энергии протекает процесс прокатки до требуемого сечения (в этом смысле уширение — вредный процесс);

2) образуется подпор течению металла в ширину; за счет этого в большей степени деформируются центральные по высоте слои слитка, они лучше прорабатываются, деформация по высоте более равномерна, чем без подпора;

3) обеспечиваются дополнительные силы трения по стенкам калибра, при этом улучшается захват металла валками, возможно увеличение обжатия за один пропуск по сравнению с гладкой бочкой;

4) улучшается устойчивость полосы при прокатке; при обжатии высоких и узких полос возникает потеря устойчивости, полоса не обжимается, а искривляется в валках; в калибрах потеря устойчивости происходит при отношении высоты к ширине полосы $H/B = 2,0$ и выше, а на гладкой бочке — при $H/B = 1,7$ и ниже.

Видно (см. рис. 9.7), что дно некоторых калибров имеет вогнутость. Это способствует большему проникновению деформации вглубь сечения и лучшей проработке средней части слитка. Кроме того, когда после нескольких пропусков полоса из разряда высоких перейдет в разряд средних, после кантовки вогнутость боковой грани раската будет полезной, поскольку компенсируется уширением центральных слоев. В последнем калибре, из которого выходит готовый блюм, дно калибра выполняется без заглабления, чтобы обеспечить точные размеры блюма. Нецелесообразно заглабление также на гладкой бочке и в первом калибре, когда полоса еще высокая.

Применяется две схемы расположения калибров на валках. Первая называется последовательной (рис. 9.8). Прокатка на таких валках осуществляется в последовательности, показанной стрелками. После нескольких пропусков на гладкой бочке осуществляется кантовка полосы, т. е. смена направления обжатия. Через несколько пропусков раскат передается в следующий калибр. Металл последовательно передвигается по всем калибрам слева направо в одном направлении, что упрощает процесс прокатки (см. две первые калибровки на рис. 9.7). Однако в наиболее нагруженных первых пропусках на гладкой бочке левый подшипник воспринимает большую нагрузку, чем правый, поэтому подшипники неравномерно изнашиваются. Кроме того, с водой, подаваемой на валки стана для их охлаждения и удаления окалины, окалина попадает в левый подшипник, усугубляя условия его работы.

Чтобы устранить эти недостатки, применяется симметричное расположение калибров на валках (рис. 9.9, стрелками показана последовательность прокатки). С гладкой бочки металл сначала движется влево к первому калибру, затем вправо во второй калибр. Условия эксплуатации подшипников улучшились, но сам процесс прокатки стал менее удобным и более длительным (см. третью калибровку валков на рис. 9.7). На каждом заводе выбирают свой вариант расположения калибров на валках, но более предпочтительным считается симметричный, особенно тогда, когда не требуется максимальная производительность стана.

Схема прокатки на блюминге представлена на рис. 9.10, на котором показаны направления обжатия и кантовки слитка. Схему можно записать короче:

$$4-4-2-2-1 = 13,$$

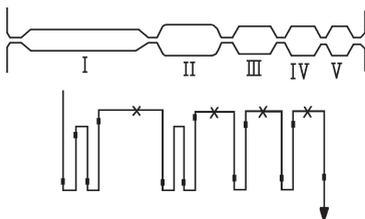


Рис. 9.8. Последовательное расположение калибров

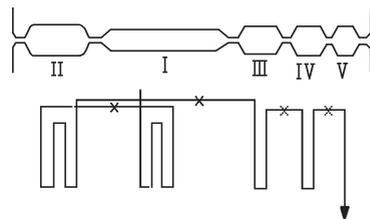


Рис. 9.9. Симметричное расположение калибров

что отражает число пропусков между кантовками и общее число пропусков. На блюмингах применяют самые различные схемы прокатки. Наиболее распространенными являются следующие схемы:

$$\begin{array}{ll}
 4-4-1 = 9; & 2-4-4-2-1 = 13; \\
 2-4-2-1 = 9; & 6-4-2-1 = 13; \\
 2-4-4-1 = 11; & 4-4-4-2-1 = 15; \\
 6-4-1 = 11; & 2-4-4-2-2-1 = 15; \\
 4-4-2-1 = 11; & 6-4-2-2-2-1 = 15; \\
 2-6-4-1 = 13; & 4-4-4-2-2-1 = 17; \\
 4-4-4-2-1 = 13; & 2-6-4-2-2-1 = 17.
 \end{array}$$

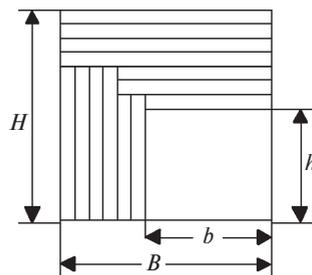


Рис. 9.10. Схема обжатия на блюминге

Приведенные схемы прокатки можно практически использовать при разработке режимов обжатия слитка на блюминге.

Кантовки металла осуществляют в следующих условиях:

после четного (не каждого) пропуска, так как прокат на передней стороне стана хорошо виден оператору, который в таком случае может непосредственно управлять процессом кантовки;

при передаче раската из одного калибра в другой; при этом операция кантовки по времени совмещается с поперечной транспортировкой слитка из калибра в калибр и общее время прокатки сокращается;

обязательно перед последним пропуском, чтобы уменьшить износ последнего калибра и увеличить срок службы валков до переточки; кантовка перед этим калибром способствует увеличению точности проката;

при достижении отношения высоты к ширине раската H/B значений, близких к критическим, при которых наступает потеря устойчивости.

Исследования, проведенные на Криворожском блюминге 1300, показали, что для уменьшения поверхностных трещин на блюмах при прокатке целесообразно уменьшать количество пропусков на гладкой бочке и осуществлять при этом кантовку после каждых двух пропусков.

Из схем прокатки видно, что общее количество пропусков n всегда нечетное, так как прокатка заканчивается на задней стороне стана. Направление прокатки в последнем пропуске в последнем калибре всегда задано. Это значит, что одна сторона слитка, например высота H , получает на один пропуск больше, чем ширина B :

$$n_H = \frac{n+1}{2}; \quad n_B = \frac{n-1}{2}.$$

Чтобы выравнять средние обжатия по обеим сторонам, часто либо слиток отливают не квадратным (с разницей в размерах H и B примерно на 100 мм), либо прокатывают блюм неквадратного сечения.

9.4. Особенности режима обжатия на слябинге

В отличие от блюминга валки слябинга не имеют калибров, бочка их выполнена в виде гладкого цилиндра. Стан содержит две пары валков: вертикальную и горизонтальную. Вертикальные валки имеют меньший диаметр, чем го-



Рис. 9.11.
Схема
располо-
жения
валков
слябинга

ризональные, и расположены, как правило, перед горизонтальными. На схеме стана изображают клетки в виде стилизованной проекции валков сверху (рис. 9.11). Горизонтальные валки предназначены для снятия металла по высоте, а вертикальные — по ширине, кантовки металла при этом не нужны.

Процесс прокатки проходит следующим образом. Листовой слиток поступает на стан “на ребро”, т. е. в вертикальном положении. Первые обжатия осуществляют только горизонтальными валками, уменьшая ширину слитка. Таких вертикальных (ребровых) пропусков должно быть один-пять (рис. 9.12, а). Они необходимы для того, чтобы разрыхлить окалину на широких гранях слитка, которая затем удаляется с помощью гидросбива. В этих же пропусках формируют ширину сляба. После вертикальных пропусков слиток находится на задней стороне стана, здесь он кантуется на 90° , и дальнейшая прокатка осуществляется “плашмя” без кантовок (рис. 9.12, б). Таким образом, на слябинге применяется только одна кантовка. При прокатке в пластовых пропусках горизонтальные валки формируют за n_r пропусков высоту, а вертикальные за n_b пропусков ширину сляба. Всегда $n_b \leq n_r$.

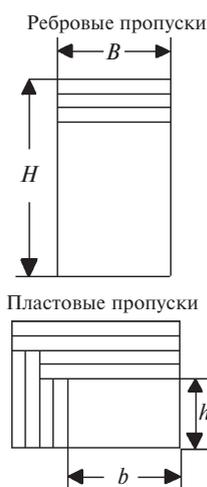


Рис. 9.12. Схема прокатки слитка на слябинге с тремя ребровыми и пятью пластовыми пропусками

Поскольку валки (горизонтальные и вертикальные) расположены близко друг от друга, то некоторое время раскат находится в обоих парах валков одновременно. Различают пропуск Г-В, когда прокатка начинается в горизонтальных и заканчивается в вертикальных валках. В обратном направлении прокатка будет осуществлена в последовательности В-Г. Последний пропуск всегда осуществляют в вертикальных валках (пропуск В) при разведенных горизонтальных валках, которые в это время готовятся к приему следующего слитка. Это позволяет сэкономить время на подъем верхнего валка и повысить производительность стана. Кроме того, при вертикальном обжатии формируется ровная и более удобная для листовых станов форма боковых граней сляба. На рис. 9.12, б показана схема режимов обжатий с пятью пропусками “плашмя”: Г, Г-В, В-Г, Г-В и В.

9.5. Скоростной режим деформации

Прокатка на блюминге и слябинге ведется в реверсивном режиме. Диаграмма изменения скорости валков блюминга в некотором i -м пропуске (рис. 9.13, а) показывает, что сначала валки начинают вращаться в требуемом направлении с ускорением A (об/мин/с). При некоторой скорости $n_{\text{зах}}$ (об/мин) в валки задается слиток, и далее валки ускоряются вместе со слитком. Затем прокатка продолжается при постоянной скорости валков n_{max} . В конце прокатки скорость валков снижается с замедлением B (об/мин/с), и на скорости $n_{\text{выб}}$ происходит выброс металла из валков. После снижения скорости валков без металла до 0 осуществляется прокатка в обратном направлении по такой же диаграмме. Если слиток короткий, то диаграмма скоростей превращается в треугольную, так как

участок с постоянной скоростью отсутствует (рис. 9.13, б). Таким образом, на трапецевидной диаграмме имеется пять участков, а на треугольной — четыре.

На первом участке происходит разгон валков без металла от 0 до $n_{\text{зах}}$ продолжительностью $\tau_1 = n_{\text{зах}}/A$, на втором — разгон валков со слитком от $n_{\text{зах}}$ до n_{max} с временем $\tau_2 = (n_{\text{max}} - n_{\text{зах}})/A$, на третьем — стационарная прокатка со скоростью n_{max} продолжительностью τ_3 . Четвертый и пятый участки соответствуют остановке двигателя сначала с металлом в валках от скорости n_{max} до $n_{\text{выб}}$ и затем без металла до скорости $n = 0$ с временами $\tau_4 = (n_{\text{max}} - n_{\text{выб}})/B$ и $\tau_5 = n_{\text{выб}}/B$. Далее возможна пауза продолжительностью τ_0 от 0 до нескольких секунд, после которой осуществляется реверс двигателя и следующий пропуск.

Реверсивная прокатка оказывает существенное влияние на загрузку двигателя. Напомним, что каждый валок блюминга (и слябинга) приводится от индивидуального двигателя постоянного тока мощностью от 4000 до 6000 кВт через шпиндель. В линии привода отсутствуют шестеренная клеть и редукторы, поэтому моменты на валке и валу двигателя совпадают, передаточное отношение привода равно 1. На первом участке скоростной диаграммы двигатель преодолевает момент $M_{\text{х.х}}$, идущий на вращение стана в холостом состоянии, а также динамический момент $M_{\text{дин}}$ на преодоление сил инерции, возникающих при разгоне привода:

$$M_1 = M_{\text{х.х}} + M_{\text{дин}}$$

На втором участке

$$M_2 = M_{\text{х.х}} + M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{дин}}$$

Добавились моменты прокатки $M_{\text{пр}}$ и трения $M_{\text{тр}}$.

На третьем участке скорость постоянна, поэтому $M_{\text{дин}} = 0$ и

$$M_3 = M_{\text{х.х}} + M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}}$$

Соответственно на четвертом и пятом участках

$$M_4 = M_{\text{х.х}} + M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}} - M_{\text{дин}}$$

и

$$M_5 = M_{\text{х.х}} - M_{\text{дин}}$$

(динамический момент направлен в обратную сторону, помогая вращению двигателя, поэтому знак “минус”).

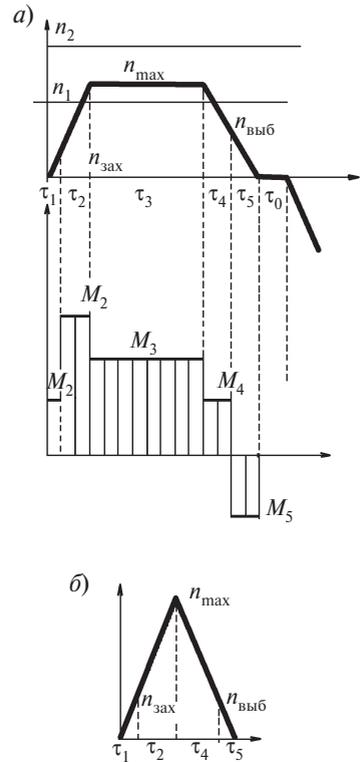


Рис. 9.13. Трапецевидная (а) и треугольная (б) диаграммы скоростей и диаграмма моментов при прокатке на блюминге

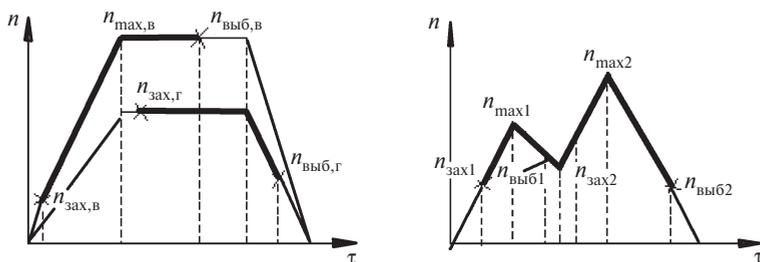


Рис. 9.14. Диаграмма скоростей при прокатке на слябинге (пропуск В-Г) (а) и на блюминге при сдвоенной прокатке (б)

Иначе будет выглядеть диаграмма скоростей при прокатке на слябинге, поскольку он содержит две пары валков. Для пропуска В-Г (рис. 9.14, а) захват металла осуществляется вертикальными валками, затем на более высоких скоростях металл захватывается горизонтальными валками. Выброс раската происходит в той же последовательности, т. е. сначала из вертикальных, а затем из горизонтальных валков. Продолжительности и моменты прокатки на каждом участке необходимо рассчитывать для каждого валка отдельно. На слябинге в любой момент прокатки линейные скорости обеих пар валков должны быть одинаковыми, что поддерживается автоматической системой управления приводами. Вертикальные валки по диаметру меньше горизонтальных, поэтому должно выполняться соотношение

$$\frac{n_{\Gamma}}{n_{\text{В}}} = \frac{D_{\text{В}}}{D_{\Gamma}}$$

При рассогласовании скоростей одна пара валков воздействует через слиток на другую, принудительно ускоряя или замедляя вращение. При этом в паре валков, вращающихся быстрее, чем положено, момент прокатки резко возрастает, а в другой паре, наоборот, резко падает. Неравномерная загрузка приводов очень вредна.

Для повышения производительности на всех блюмингах и слябингах практикуют так называемую сдвоенную прокатку. В первых пропусках слитков короткий, и всегда диаграмма скоростей треугольная. Можно прокатывать один за другим два слитка сразу. В последних пропусках каждый из слитков докатывается раздельно. В сдвоенных пропусках (рис. 9.14, б) захват первого слитка происходит так же, как при одиночной прокатке, а для выброса первого и захвата второго слитка скорость валков приходится снижать до значения, которое всегда выше скорости захвата при одиночной прокатке. Соответственно n_{max} и средняя скорость прокатки второго слитка выше, чем первого. За счет этого, а также при сокращении времени некоторых вспомогательных операций достигается увеличение производительности.

9.6. Характер деформации металла при прокатке

На блюминге и слябинге преобладают высокие очаги деформации, для которых характерны отношения длины очага деформации l к средней толщине раската h_{cp} в пределах $l/h_{\text{cp}} = 0,1-1,0$. В связи с этим в поперечном сечении

слитка деформация металла протекает крайне неравномерно, и этой неравномерностью определяются все главные силовые и деформационные характеристики процесса. На высоких очагах силы трения практически не влияют на характер деформации.

На средних очагах деформации, которые возможны на блюминге и слябинге в последних пропусках, наоборот, характер течения металла практически полностью определяется распределением сил трения на контактной площадке.

В разд. 4.2 показано, что на высоких очагах неравномерность деформации по высоте слитка приводит к тому, что форма поперечного сечения раската приближается к форме двойной бочки. Пассивные центральные зоны, в которые не проникает активная деформация от действия прокатных валков, препятствуют удлинению металла активных зон, и в последних возрастает уширение. Чем выше очаг деформации (меньше l/h_{cp}), тем уширение больше в активных и меньше в пассивных зонах (см. рис. 4.9). При переходе к средним очагам ($l/h_{cp} > 1$) взаимодействие между зонами исчезает, но за счет сил трения, степень развития которых возрастает с увеличением l/h_{cp} , уширение растет как в центральных, так и в крайних по высоте слоях, но в центральных слоях оно выше, чем в приконтактных.

Такой характер деформации металла очень невыгоден на слябинге. При прокатке в вертикальных валках очаг деформации очень высокий. В приконтактных зонах металл практически целиком устремляется в ширину, образуя на основных гранях сляба большие наплывы (рис. 9.15, а). При прокатке такого раската в горизонтальных валках наплывы раньше основной массы металла касаются валков и вынуждены течь в ширину, образуя на боковых гранях (рис. 9.15, б). Практически на слябинге с наплывами бороться невозможно, хотя при соответствующих режимах обжатия их можно уменьшить. Для этого необходимо увеличивать обжатия при прокатке в горизонтальных валках, увеличивая фактор l/h_{cp} , а в вертикальных валках, наоборот, обжатия должны быть малыми. При таких обжатиях вертикальные валки только слегка обжимают наплывы, выравнивая их. Опыт прокатки на слябинге КарМК показывает, что таким способом удастся существенно уменьшить величину наплывов на слябах. Однако конечный сляб будет всегда непрямоугольным. По данным завода им. Ильича (г. Мариуполь) на существующем там слябинге высота наплывов на слябе достигает 18 мм. Это большой недостаток катаных слябов по сравнению с литыми.

Так как катаный сляб далее нагревается в методической печи листового стана, то для проталкивания садки через печь лучше иметь прямой боковую кромку сляба (см. рис. 9.15, а), следовательно, заканчивать прокатку на слябинге следует в вертикальных валках.

Рассматривая ранее (см. разд. 4.2) силовую картину деформации, мы пришли к выводу, что на высоких очагах деформации давление металла на валки повышается с ростом высоты полосы (с уменьшением фактора l/h_{cp}).

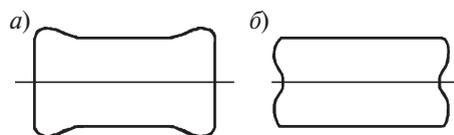


Рис. 9.15. Форма сляба после прокатки в вертикальном (а) и горизонтальном (б) пропуске

Отношение $\frac{P_{\text{ср}}}{K} = n_3$ характеризует влияние подпора активных зон на $\left(\frac{P_{\text{ср}}}{K}\right)_{\text{баз}}$

увеличение давления металла на валки (как следствие неравномерности деформации). Оно называется коэффициентом подпора. На высоких очагах деформации $n_3 = 2 - \sqrt{l/h_{\text{ср}}}$ (формула Смирнова). На средних очагах, когда активные зоны смыкаются, $n_3 = 1$.

На средних очагах деформации при снижении высоты очага деформации давление металла на валки увеличивается из-за сил трения на контактных поверхностях. Отношение

$$\frac{P_{\text{ср}}}{K} = n_{\sigma} \left(\frac{P_{\text{ср}}}{K}\right)_{\text{баз}}$$

характеризует влияние сил трения на давление металла на валки.

Ранее также отмечено, что при прокатке на блюминге и слябинге активные зоны металла, благодаря дополнительному подпору, могут находиться в состоянии трехстороннего сжатия, что благоприятно сказывается на пластичности металла. Наоборот, дополнительные растягивающие напряжения в пассивных зонах снижают пластичность металла, поэтому в центральных зонах раската возможны трещины. При прокатке в условиях средних очагов деформации появившиеся ранее трещины могут завариваться. Но при их окислении они, наоборот, раскрываются и выходят на поверхность раската.

Таким образом, при прокатке на блюминге и слябинге со всех позиций вредны малые обжатия, обеспечивающие высокие очаги деформации. Необходимо деформировать металл с максимально возможными обжатиями, особенно в первых пропусках, когда высота проката еще велика.

9.7. Формирование технологической обреза

Характер деформации металла на блюминге и слябинге отражается на форме границы, отделяющей здоровую часть металла от загрязненной со стороны головной и донной частей. Эти границы всегда искривлены и тем больше, чем неравномернее деформация при прокатке. От этого зависит обрезь переднего и заднего концов металла при раскросе (см. рис. 9.4).

Неравномерность деформации особенно сильно влияет на конфигурацию донного участка прокатанного блюма, который имеет глубокую утяжку по центру сечения. В связи с этим особенно эффективны выравнивание

деформации и уменьшение утяжины по донной части слитка, что позволяет значительно уменьшить донную обрезь. На ряде японских заводов используют так называемую односторонне-реверсивную прокатку. В первом пропуске слиток прокатывают только до половины длины, затем поднимают верхний валок и пропускают слиток без обжатия. Далее слиток без обжатия вновь подают на переднюю сторону стана. В следующем пропуске не обжатая ранее хвостовая часть слитка получает двойное обжатие, отчего резко увеличивается значение фактора l/h_{cp} (до значений больше 0,8). Очаг деформации попадает в разряд средних, и центральные слои металла получают большую деформацию, чем приконтактные, за счет чего торцевая поверхность хвостовой части раската выравнивается. Можно вместо вогнутой получить выпуклую форму торца. При этом внутренние дефекты металла будут выходить на торец и уйдут в обрезь при минимальных отходах металла. Выход годного увеличивается на 3,5 %. Особенно полезен этот способ прокатки при применении слитков, отлитых сифонным способом в изложницы с кюмпельным (выпуклым) дном. Выпуклость дна слитка, во-первых, способствует концентрации примесей в этой части, во-вторых, компенсирует утяжину при неравномерной деформации. Кюмпельные изложницы применяются и на отечественных заводах, так как способствуют сокращению обрезки также при обычной прокатке.

На комбинате “Криворожсталь” исследован другой путь сокращения обрезки металла. После прокатки на блюминге отрезают головную и донную части металла не полностью, а только на 40–65 % от нормы по технологической инструкции. При этом в средней части сечения в передней и хвостовой частях раската сохраняются дефекты в виде участков усадочной раковины, неметаллических включений и пр. При дальнейшей прокатке блюма на непрерывно-заготовочном стане (НЗС) фактор l/h_{cp} практически всегда больше 1, средние слои раската деформируются интенсивнее поверхностных, и торцы становятся выпуклыми, а дефекты выходят на торцевые поверхности. Полное удаление дефектных участков слитка происходит на ножницах НЗС. Таким способом удается сократить общую обрезь по обоим станам на 10–12 % и повысить выход годного проката на 3–4 %.

Большое влияние на характер деформации металла на блюминге оказывает форма поперечного сечения слитка. Она должна обеспечивать наилучший теплообмен между изложницей и слитком при кристаллизации и между слитком и печными газами при нагреве, что позволяет избежать появления горячих трещин в слитках спокойной стали и сотовых рванин в слитках кипящей стали — наиболее распространенных дефектов для этих сталей. Как показал опыт НТМК, таким условиям удовлетворяют слитки с выпуклой боковой поверхностью со стрелой выпуклости 7–10 % ширины грани. На многих заводах по той же причине применяют слитки с волнистой поверхностью граней. При прокатке на блюминге выпуклая или волнистая форма граней частично уменьшает двойное бочкообразование, снижает растягивающие напряжения и вероятность разрушения, что является эффективным средством борьбы с горячими трещинами.

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ОБЖАТИЯ

10.1. Факторы, ограничивающие обжатия

Так как на блюминге слабые обжатия вредны, то необходимо производить прокатку с максимально возможными обжатиями. Рассмотрим основные факторы, ограничивающие обжатия.

Угол захвата

Из теории прокатки известно, что в начальный момент захвата выполняется неравенство $\alpha \leq \mu$, т. е. угол захвата в радианах не может превышать значения коэффициента трения. Предельное обжатие связано с предельным углом захвата α_{\max} формулой

$$\Delta h_{\max} = D(1 - \cos \alpha_{\max}).$$

При установившемся процессе $\gamma \leq \mu$, где значение нейтрального угла γ примерно в два раза меньше угла α , поэтому самое трудное при прокатке — это начальный момент захвата металла валками. Если захват произошел, то в очаге деформации появляется почти двукратный запас сил трения, т. е. имеется возможность увеличить обжатие почти в два раза. Это обстоятельство используется при построении разных технологических процессов прокатки для увеличения обжатия уже после захвата. На блюминге, особенно в последних пропусках, можно задний конец полосы в процессе прокатки дополнительно поджать, если привод нажимных винтов достаточно мощный. В следующем пропуске полоса задается в валки этим утоненным концом, а прокатка всей остальной части полосы протекает при повышенных обжатиях. При этом увеличивается производительность блюминга, улучшается прорабатываемость металла и сокращается обрезь металла.

Все мероприятия, способствующие увеличению коэффициента трения μ , полезны при прокатке на блюминге. Он сильно зависит от состояния поверхности валков (и слабо — от состояния поверхности самого металла). На гладких валках после их токарной обработки обычно принимают $\alpha_{\max} = 22-24^\circ$. В первом калибре блюминга, представляющего собой участок гладкой бочки, можно загрузить поверхность валков путем наварки сварочным электродом бугров или нарубки топором выемок. При этом α_{\max} удастся увеличить до 30° . В последних калибрах, когда формируется конечная продукция (блюм) этого, конечно, делать нельзя. Поверхность валков слябинга также не загрубляют.

Силы трения будут также увеличиваться, если в момент захвата боковые стенки калибра защемят металл. Необходимо так строить калибры, чтобы их ширина по дну была меньше, а по буртам больше ширины раската. При прокатке в несколько пропусков в одном калибре эти условия во всех пропусках не обеспечить: первые пропуски обычно проходят без защемления (как на гладкой бочке), с тем чтобы не произошло переполнения калибра в последних

пропусках. За счет стесненной прокатки в калибрах α_{\max} может быть увеличен до 26–28°.

Коэффициент трения зависит от температуры металла: чем выше температура, тем выше должен быть коэффициент трения, но из-за образующейся окалины, разделяющей трущиеся поверхности, коэффициент трения падает (см. рис. 1.19, а). С другой стороны, при повышении температуры уменьшается предел текучести металла, и при одинаковой скорости подачи слитка в валки при высокой температуре образуется большая площадка смятия. В общем случае при повышении температуры металла сила трения увеличивается и захват улучшается.

Существенное влияние на коэффициент трения при высокой температуре оказывает скорость прокатки. При малых скоростях контакт металла с валками длительнее, следовательно, сцепление прочнее, чем при высоких, поэтому коэффициент трения падает с увеличением скорости прокатки (см. рис. 1.19, б). Для обеспечения надежного захвата приходится снижать скорость прокатки, хотя при этом снижается производительность. Обычно захват полосы осуществляют при низких скоростях в момент разгона двигателя. После захвата продолжается разгон валков вместе с полосой, что требует высокой квалификации от оператора и приводит к перегрузке двигателя. Видимо, существует некоторая оптимальная скорость захвата, при которой и захват надежен, и средняя скорость прокатки полосы достаточно велика. Обычно считают оптимальными скорости захвата на блюминге в пределах $n_{\text{зах}} = 15\text{--}25$ об/мин (см. рис. 9.13).

На блюмингах, где не требуется высокая производительность и допустимы “мягкие” режимы прокатки, оператор стана подводит раскат к валкам на ползучих скоростях и только тогда, когда убедится, что захват произошел, начинает разгонять валки (рис. 10.1). Цикл прокатки очень растянут. Такой режим прокатки не требует высокой квалификации оператора.

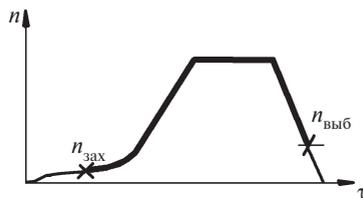


Рис. 10.1. Возможная диаграмма скоростей на блюминге

Сила прокатки

Сила прокатки P не должна превышать некоторого предельного значения $[P]$, которое на каждом стане определяется или задается исходя из прочности деталей и работоспособности механизмов стана. Эта характеристика должна быть записана в паспорт стана. При расчетах режимов обжатия она служит важным ограничением предельных значений.

Сила прокатки (в ньютонах, Н)

$$P = p_{\text{ср}} bl,$$

где b — средняя ширина очага деформации, $b = 0,5(b_0 + b_1)$; l — длина очага, $l = \sqrt{0,5\Delta h D}$.

На блюмингах силу прокатки выражают в килоньютонах (кН), разделив на 1000. В старой справочной литературе применяется устаревшая единица измерения силы прокатки — тонна-сила (тс), 1 тс = 10 кН.

Среднее давление на валки $p_{\text{ср}}$ (размерность — кН/мм², или МПа (мегапаскаль)) в общем случае рассчитывается по формуле:

$$p_{\text{ср}} = n_{\sigma} n_{\varepsilon} n_{\beta} n_{\text{нат}} K.$$

Коэффициенты влияния зон n_{ε} и сил трения n_{σ} рассмотрены выше (см. разд. 4.2). Коэффициент, учитывающий ширину проката n_{β} , на узких полосах при $b_0 < h_0$ рассчитывают по формуле

$$n_{\beta} = 1 + \frac{\mu b_0}{3 h_0},$$

на широких полосах, когда по приведенной формуле получается $n_{\beta} > 1,155$, принимают

$$n_{\beta} = 1,155.$$

Коэффициент $n_{\text{нат}}$, учитывающий влияние на давление напряжений переднего и заднего натяжения полосы при прокатке, на блюминге равен 1.

Предел текучести при прокатке K (Н/мм²) зависит от марки стали прокатываемого металла, температуры T , степени ε и скорости U деформации. В разд. 5.6 отмечалось, что этих факторов недостаточно, чтобы полностью описать предел текучести при прокатке. Однако в практических расчетах силовых параметров прокатки обычно принимают только три упомянутых фактора. Можно считать также, что при горячей прокатке наклеп, определяющийся степенью деформации $\varepsilon = \Delta h/h_0$, мгновенно снимается за счет процессов разупрочнения, поэтому степень деформации влияет на предел текучести K только при высоких скоростях деформации (выше 10 1/с), которые на блюмингах и слябингах не достигаются.

Скорость деформации, которую можно вычислять по формуле $U = C\varepsilon/l$, при горячей деформации оказывает существенное влияние на значение K . В этой формуле линейная скорость валков C (мм/с) вычисляется по формуле $C = \pi D_k n/60$. Диаметр валков по дну калибра D_k (мм) берется из чертежа валков, а среднее число оборотов за проход n выбирают равным первой предельной скорости n_1 , указанной в паспорте двигателя.

Графики зависимости $K = f(U)$ для различных температур и разных марок стали находят в справочниках, например в [5]. В разд. 5.6 на рис. 5.20, 5.21, 5.24 приведены кривые для некоторых марок стали.

Из приведенных выше формул видно, что с ростом ширины полосы растет усилие прокатки, следовательно, уменьшается обжатие, при котором достигается предельное значение $[P]$.

Момент на валу двигателя

На диаграмме моментов (см. рис. 9.13) видно, что наибольший момент прокатки в каждом пропуске затрачивается на участке 2 разгона стана после захвата слитка:

$$M_2 = M_{\text{х.х}} + M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{дин}}.$$

Этот момент не должен превышать значения, при котором происходит отключение двигателя от сети: $M_2 < M_{\text{откл}}$.

Отключающий момент $M_{\text{откл}} = kM_{\text{н}}$. Номинальный момент $M_{\text{н}}$ является основной паспортной характеристикой двигателя и всегда известен. Коэффициент перегрузки двигателя k записан в паспорте двигателя и в зависимости от исполнения отключающей системы колеблется в пределах $k = 2,25-2,75$.

Рассмотрим каждую из составляющих момента M_2 . Размерность везде кНм.

Момент холостого хода расходуется на вращение двигателя вхолостую, поэтому он не может быть вычислен, а должен быть измерен. Близкий результат получается, если в расчетах принять $M_{\text{х.х}} = 0,05M_{\text{н}}$.

Момент прокатки $M_{\text{пр}}$, как и остальные моменты, на валу двигателя и на валке совпадают, так как на блюминге каждый валок приводится от собственного двигателя напрямую через шпиндель. Для такого привода он определяется по формуле

$$M_{\text{пр}} = P\Psi l,$$

где Ψ — коэффициент приложения равнодействующей сил нормального давления на контактной площадке; l — длина дуги захвата, м.

Экспериментальным путем установлено, что Ψ зависит от фактора $l/h_{\text{ср}}$, и на высоких очагах деформации его предельное значение $\Psi = 0,5-0,58$. С ростом отношения $l/h_{\text{ср}}$ коэффициент Ψ уменьшается и на листовых станах ($l/h_{\text{ср}} > 4$) приближается к значению $\Psi = 0,28-0,30$. Существует несколько аппроксимаций этой зависимости. Мы рекомендуем формулу Чекмарева (см. разд. 5.5)

$$\Psi = 0,79 - 0,887l/h_{\text{ср}} + 0,444(l/h_{\text{ср}})^2.$$

Момент трения для блюмингов с индивидуальным приводом валков определяется по формуле

$$M_{\text{тр}} = P\mu_{\text{ш}}d_{\text{ш}}/2,$$

где $d_{\text{ш}}$ — диаметр шейки валка, м, которая должна быть взята из чертежа валков.

Однако на большинстве станов установились оптимальные соотношения между размерами шейки и номинальным диаметром бочки валка D_0 :

на блюмингах и сортовых станах, имеющих подшипники скольжения открытого типа, $d_{\text{ш}} = (0,6-0,65)D_0$;

на листовых станах $d_{\text{ш}} = (0,65-0,75)D_0$.

Коэффициент трения в подшипниках $\mu_{\text{ш}}$ зависит от их типа, и для подшипников скольжения открытого типа (текстолитовых), применяемых на блюминге, он чрезвычайно низок: $\mu_{\text{ш}} = 0,004-0,006$. Для сравнения: на бронзовых подшипниках скольжения $\mu_{\text{ш}} = 0,06-0,10$, на роликовых подшипниках качения $\mu_{\text{ш}} = 0,002-0,005$, на подшипниках жидкостного трения (подшипниках скольжения закрытого типа) $\mu_{\text{ш}} = 0,001-0,005$.

Динамический момент, проявляющийся только при разгоне и замедлении двигателя, определяется по формуле

$$M_{\text{дин}} = \frac{\sum G_i D_i^2}{4} \frac{d\omega}{dt} = \frac{\sum G_i D_i^2}{375} \frac{dn}{dt}, \text{ кНм},$$

где знак \sum означает суммирование по всем деталям, вращающимся от одного двигателя (для блюминга это валок, шпиндель, муфта, соединяющая шпиндель с валом двигателя, и якорь двигателя); G — масса вращающейся детали, т;

D — ее диаметр, м (учтено, что $9,8 \text{ кН} = 1 \text{ т}$); $G_i D_i^2$ — маховый момент i -й вращающейся детали, $\text{т}\cdot\text{м}^2$ (для якоря двигателя маховый момент $GD_{\text{я}}^2$ записан в паспорте двигателя и считается известным; маховые моменты остальных деталей необходимо рассчитывать, имея их чертежи.

Изменение угловой скорости вращения во времени $dn/dt \left(\frac{\text{об/мин}}{\text{с}} \right)$ является также паспортной характеристикой двигателя, на современных блюмингах при ускорении $dn/dt = A = 50\text{--}60 \text{ об/мин/с}$, а при замедлении $dn/dt = B = 60\text{--}70 \text{ об/мин/с}$.

В табл. 10.1 приведены паспортные данные некоторых двигателей, установленных на существующих отечественных блюмингах и слябингах и других крупных реверсивных станах.

Таблица 10.1

Техническая характеристика некоторых крупных реверсивных прокатных двигателей постоянного тока

Тип двигателя	Номинальная мощность N_n , кВт	Скорость, об/мин		Номинальный момент M_n , кНм	Коэффициент перегрузки k	Маховый момент $GD_{\text{я}}^2$, $\text{т}\cdot\text{м}^2$
		n_1	n_2			
МП20-4000	2940	60	120	476	2,50	220,0
ПБК250/145	4560	70	120	634	2,75	135,0
МП6250-50	5500	60	120	895	2,75	270,0
ПБК380/125	7400	60	90	1200	3,00	455,0
ПБК285/120	4100	70	120	570	2,75	200,0
МП24-7000-50	5150	50	120	1000	2,50	385,0
МП20-5000	3670	50	120	716	2,50	253,0
МП6250-50	5500	60	120	900	2,50	275,0
ПБК380/125	7400	60	90	1200	2,50	465,0
ПБК250/145	4600	70	120	640	2,50	135,0
МП6200-80	4560	80	160	556	2,50	260,0
МП5000-110	3680	110	220	325	2,50	160,0
МП7000-50	5150	50	120	1000	2,50	385,0
СМ840/75	5450	70	120	770	2,45	310,0
МП12000-65	8825	65	90	1323	2,50	450,0
МП10000-60	7360	60	90	1200	2,50	455,0
МП5000-50	3680	50	100	720	2,50	250,0
П24/160-6,8	6800	60	90	1100	2,50	300,0
МП5350-70	5350	70	120	745	2,50	172,0
ПК24-160-9К	7250	65	90	1090	2,50	300,0
МП4-500-50	3310	50	100	640	2,50	145,0
МП7900-70	5805	70	120	800	2,50	230,0
МП7600-70	5585	70	120	780	2,50	230,0

Тип двигателя	Номинальная мощность N_n , кВт	Скорость, об/мин		Номинальный момент M_n , кНм	Коэффициент перегрузки k	Маховый момент GD_n^2 , т·м ²
		n_1	n_2			
ДПП310/150-18	4600	50	100	900	2,50	275,0
МП9250-60	6800	60	90	1100	2,50	300,0
МП6250-60	5510	60	120	805	2,50	275,0
МП7300-70	5365	70	120	745	2,50	170,0
МП11000-65	6765	60	90	1100	2,50	300,0
ПБК380/125	7350	60	90	1200	2,50	455,0
МП2500-125	1840	125	250	144	2,50	44,0
МП2500-80	1840	80	160	275	2,75	60,0
МП2950-25	2170	25	60	845	2,75	270,0
МП3000-100	2200	100	200	214	2,75	33,0
ПБК285/95	2940	60	120	480	2,75	144,0
МП22-4000	2050	60	120	455	2,50	360,0
МП3100-75	2280	75	150	296	2,50	165,0
МП2500-80	1840	80	160	225	2,50	62,0
МП2500-125	1840	125	225	143	2,50	44,0
МП16-3500	2575	70	120	358	2,50	81,5
МП12-2500	1840	100	275	180	2,50	28,8
МП300-100	2205	100	200	214	2,50	21,0

Для двигателей постоянного тока, позволяющих плавно регулировать скорость вращения в широких пределах, номинальный момент M_n (кНм) зависит от скорости вращения. При регулировании скорости (оборотов) от 0 до n_1 номинальный момент M_n не зависит от скорости, так как регулирование ее осуществляется за счет изменения тока якоря двигателя. Это значение M_n записывается в паспорт двигателя. При дальнейшем повышении скорости до возможного значения n_2 уменьшается ток возбуждения статора двигателя, и это вызывает снижение номинального момента (рис. 10.2).

При скорости двигателя $n < n_1$ номинальный момент $M_{nn} = \text{const}$ и равен паспортному, а в диапазоне скоростей $n_1 < n < n_2$ номинальный момент M_n уменьшается обратно пропорционально скорости:

$$M_n = \frac{n}{n_1} M_{nn}.$$

На первом участке кривой мощность двигателя $N = M_{nn} \omega = M_{nn} \pi n / 30$. Мощность нарастает по мере увеличения оборотов, а на втором участке остается постоянной и равной номинальной:

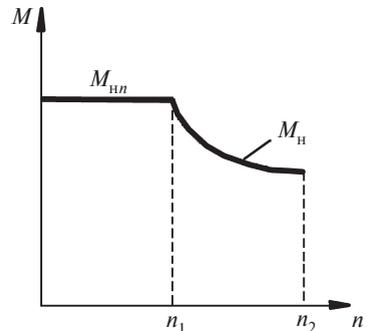


Рис. 10.2. Зависимость номинального момента двигателя от скорости

$$N_H = \frac{M_H n_1}{9,55} = \frac{M_H n}{9,55}, \text{ кВт.}$$

При выборе максимальной скорости прокатки на блюминге n_{\max} , с одной стороны, необходимо стремиться к максимально возможным значениям (например, $0,95n_2$), но, с другой стороны, высокие скорости, приближающиеся к n_2 , опасны по условию отключения двигателя при прокатке. Видимо, существуют некоторые оптимальные значения скорости n_{\max} , при котором номинальный момент M_H будет достаточным и производительность стана будет максимальной.

Предлагается следующий алгоритм их нахождения. При трапециевидной скоростной диаграмме в i -м пропуске длина раската L_i раскладывается на три участка с временами $\tau_2 = (n_{\max} - n_{\text{зах}})/A$, τ_3 , $\tau_4 = (n_{\max} - n_{\text{выб}})/B$:

$$L_i = V_2\tau_2 + V_3\tau_3 + V_4\tau_4.$$

Средние скорости на первом и последнем участках соответственно таковы:

$$V_2 = \pi D(n_{\text{зах}} + n_{\max})/2/60 \quad \text{и} \quad V_4 = \pi D(n_{\text{выб}} + n_{\max})/2/60.$$

Отсюда

$$L_i = \frac{\pi D}{60} \left(\frac{n_{\max}^2 - n_{\text{зах}}^2}{2A} + n_{\max}\tau_3 + \frac{n_{\max}^2 - n_{\text{выб}}^2}{2B} \right).$$

Допустим, мы имеем треугольную диаграмму скоростей, более производительную, чем трапециевидная. Третий участок диаграммы отсутствует, поэтому $\tau_3 = 0$, и из последнего уравнения определяется единственное неизвестное — скорость n_{\max} . Если n_{\max} меньше предельного значения $0,95n_2$, то прокатку выгодно производить по треугольной диаграмме. Если при этой скорости проходит проверка по отключающему моменту, то выбранная скорость допустима. Если n_{\max} по расчету больше значения $n_2 = 0,95n_2$ или недопустима по отключающему моменту, то снижаем ее, т. е. задаем n_{\max} . Диаграмма скоростей становится трапециевидной. При заданном n_{\max} из приведенного выше уравнения вычисляем τ_3 . Если при обоих типах диаграмм при полученном n_{\max} отключающий момент превышен, то можно попытаться пройти это ограничение за счет снижения n_{\max} . Если снижение скорости вплоть до значений n_1 не приводит к необходимому результату, то следует уменьшать обжатие. Этот алгоритм легко реализуется на ЭВМ, хотя несложен и при ручных расчетах.

Заметим также, что с увеличением ширины полосы момент на валу двигателя растет и, следовательно, предельное обжатие, ограниченное отключающим моментом, падает.

Перегрев двигателя

Перегрев двигателя определяется средней силой тока, протекающего по обмоткам якоря. Ток якоря пропорционален моментам, действующим на каждом из пяти участков скоростной диаграммы, и средний ток пропорционален среднему (эквивалентному) моменту, который для i -го пропуски определяется как среднеквадратичный:

$$M_{\text{эKB } i} = \sqrt{\frac{(M_1^2 \tau_1 + M_2^2 \tau_2 + M_3^2 \tau_3 + M_4^2 \tau_4 + M_5^2 \tau_5)_i}{(\tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5)_i}}$$

В i -м пропуске двигатель не перегревается, если $M_{\text{эKB } i} < M_{\text{н}}$.

Если двигатель в рассчитываемом пропуске перегревается, то вовсе не обязательно снижать обжатие. Перегрев в одном пропуске еще неопасен, он становится опасным, если за все n пропусков двигатель перегревается. Следовательно, следует подсчитать общий эквивалентный момент за весь цикл прокатки слитка:

$$M_{\text{эKB}} = \sqrt{\frac{\sum_i (M_1^2 \tau_1 + M_2^2 \tau_2 + M_3^2 \tau_3 + M_4^2 \tau_4 + M_5^2 \tau_5)_i}{\sum_i (\tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5)_i}}$$

Если за n пропусков эквивалентный момент превышает номинальный, то только тогда следует признать весь режим обжатий неудачным. Предстоит пересчитать все с начала при меньшем обжатии.

Соберем все ограничения обжатий. На рис. 10.3 приведена зависимость предельно допустимых обжатий Δh_{max} в i -м пропуске от ширины полосы B .

Предельное обжатие по углу захвата не зависит от ширины полосы, а по предельной силе и отключающему моменту снижается с ростом ширины. Из диаграммы следует, что максимальное обжатие узких полос до ширины B_1 определяется предельным углом захвата, на полосах шириной до B_2 лимитируется предельной силой прокатки, а на более широких — отключающим моментом (на некоторых двигателях ограничения по $[P]$ и $M_{\text{откл}}$ меняются местами). В заштрихованной области находятся допустимые обжатия за один пропуск. На диаграмме не показано ограничение по перегреву двигателя, поскольку оно применяется не для одного, а для всех пропусков.

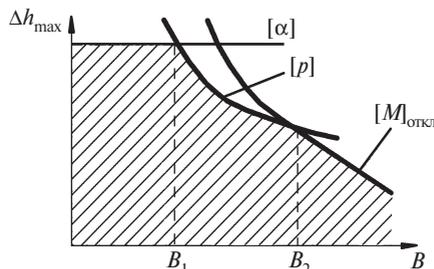


Рис. 10.3. Зависимость предельного обжатия от ширины раската

10.2. Расчет режимов обжатия на блюминге как оптимизационная задача

Расчет режимов обжатия на любом стане — это процесс оптимизационный, т. е. осуществляется как задача на получение минимума или максимума (экстремума) какого-нибудь технологического или технико-экономического критерия прокатки. В общем случае задача оптимизации включает в себя четыре обязательных компонента:

критерий оптимизации, значение которого должно быть максимальным (или минимальным); математическое выражение критерия называют функционалом; ограничения;

модель процесса;

метод достижения экстремума (метод решения задачи).

В результате решения оптимизационной задачи получаются значения параметров, варьируемых при решении, при которых критерий (функционал) достигает экстремума.

Ограничения могут быть:

технологическими (обжатие $\Delta h < \Delta h_{\max}$, сила $P < [P]$ и т. д.);

конструктивными (ускорение A и замедление B двигателя не должны превышать паспортных значений, диаметр головки шпинделя не может быть больше диаметра валков, максимальный подъем валков ограничен конструкцией станины и подушек и т. д.);

не связанными со станом или другими агрегатами цеха (исходящими от требований заказчика или поставщика слябов, продиктованными требованиями рынка, сезонными условиями и т. п.).

В совокупности все ограничения представляют собой систему неравенств, очерчивающих область, внутри которой отыскивается экстремум.

Моделью процесса называется совокупность всех математических выражений, которые его описывают. Для расчета моделью служат все формулы, по которым рассчитываются обжатие, сила прокатки, моменты, времена прокатки и остальные параметры, участвующие в задаче.

Метод решения является важнейшим элементом оптимизационной задачи.

Простейшим методом может служить некоторая логическая схема, в соответствии с которой сначала находится любое решение (в нашем случае — любой режим обжатий), а затем оно улучшается на основе некоторых логических рассуждений. До действительно оптимального решения, обеспечивающего фактический максимум или минимум критерия, как правило, не доходят, ограничиваются лучшим из нескольких вариантов. Наиболее сложными методами поиска оптимума являются математические, такие как методы линейной алгебры, метод нелинейного и динамического программирования, специальные методы поиска оптимума и т. п. Для расчета режимов обжатия на блюминге некоторыми авторами были применены методы динамического программирования, но такие задачи настолько сложны, что требуют много часов работы современных ЭВМ. Практическая ценность таких решений теряется. Они служат только некоторыми ориентирами для более простых методов расчета. К тому же технолог как инженер мыслит не так, как математик: ему часто совсем необязателен точный максимум критерия, его вполне может устроить лучшее из ряда решений. В связи с этим широко применяются человеко-машинные методы решения оптимизационных задач, когда в диалоге с ЭВМ человек перебирает достаточно большое число различных вариантов решения и очень быстро из них выбирает если не оптимальное, то близкое к нему.

В качестве *критериев оптимизации* на блюминге могут выступать:

производительность стана;

качество металла после прокатки;

расход энергии за весь цикл прокатки слитка;

расход энергии на 1 т прокатанного металла;

равномерность загрузки оборудования;

себестоимость или прибыль и т. д.

На слябинге важным критерием служит величина наплывов на готовом слябе. Можно построить режим обжатия, при котором наплывы минимальны.

Важнейшим из критериев для многих блюмингов и слябингов является производительность. Производительность стана (т/ч) определяется формулой

$$П = \frac{3600Q}{t_{ц}},$$

где Q — масса слитка, т; $t_{ц}$ — цикл прокатки слитка, с.

Цикл прокатки складывается из машинного и вспомогательного времени по всем n пропускам:

$$t_{ц} = \sum_{i=1}^n (t_{маш\ i} + t_{всп\ i}).$$

Таким образом, математической формой критерия максимума производительности (функционалом) может служить выражение

$$\sum_{i=1}^n (t_{маш\ i} + t_{всп\ i}) \rightarrow \min.$$

Из скоростных диаграмм прокатки на блюминге (см. рис. 9.13) видно, что за один пропуск машинное время, т. е. время, когда металл находится в валках,

$$t_{маш\ i} = (\tau_2 + \tau_3 + \tau_4)_i.$$

С позиций минимизации машинного времени выгодно уменьшать времена τ_2 и τ_4 за счет увеличения скорости захвата и выброса. Но с точки зрения надежности захвата первую скорость полезно снижать. Также нельзя завывать скорость выброса, так как раскат далеко отлетает от стана и на обратную транспортировку потребуется много времени (это время относится к вспомогательному). Таким образом, скорости захвата и выброса $n_{зах}$ и $n_{выб}$ следует отнести к числу варьируемых параметров задачи оптимизации. Очевидно также, что время τ_3 необходимо снижать, что возможно при увеличении скорости n_{max} . Но последняя ограничена не только предельным значением n_2 , но и номинальным моментом двигателя. Скорость n_{max} относится также к числу варьируемых параметров.

Вспомогательным называется время, которое тратится на вспомогательные операции, связанные с прокаткой полосы. Рассмотрим вспомогательные операции, которые выполняются в одном i -м пропуске прокатки.

1. Ускорение и замедление стана без металла, включая время простоя двигателя до начала следующего пропуска. Из скоростной диаграммы (см. рис. 9.13) видно, что на эти операции требуется время

$$\tau'_1 = \tau_1 + \tau_5 + \tau_0.$$

Полезно снижать его за счет снижения скоростей захвата и выброса.

2. Опускание (или подъем) валков до начала пропуска. До начала i -го пропуска необходимо либо опустить валки на величину обжатия Δh_i , если отсутствует кантовка полосы, затратив на опускание время

$$\tau'_2 = (h_{i-1} - h_i) / V_{н.в},$$

либо после кантовки поднять валки, затратив время

$$\tau'_2 = (b_{i-1} - h_i) / V_{н.в.},$$

где $V_{н.в.}$ — скорость опускания и подъема нажимных винтов.

3. Кантовка полосы, на что затрачивается время τ'_3 . Естественно, если в рассчитываемом пропуске кантовка отсутствует, то $\tau'_3 = 0$.

4. Перемещение раската из калибра в калибр. Эта операция осуществляется также не в каждом пропуске. Обозначим время на ее осуществление τ'_4 .

5. Транспортировка полосы по рольгангу к валкам стана после реверса. Эту операцию мы уже рассматривали и установили, что длительность ее τ'_5 увеличивается с ростом скорости выброса полосы в предыдущем пропуске.

Времена τ'_3 , τ'_4 и τ'_5 можно вычислить, если будут известны скоростные характеристики соответствующих механизмов стана.

Все перечисленные вспомогательные операции осуществляются одновременно, поэтому в i -м пропуске вспомогательное время определяется наиболее продолжительной из них, и видимо, максимальное из перечисленных времен необходимо уменьшать, чтобы увеличить производительность стана:

$$\tau_{всп\ i} = \max\{\tau'_1, \tau'_2, \tau'_3, \tau'_4, \tau'_5\} \rightarrow \min.$$

Это выражение представляет собой известное в теории прокатки пятерное условие по Тягунову.

Видно, что поиск оптимального режима осуществляется путем варьирования числа пропусков, обжатий по пропускам, скоростей $n_{зак}$, $n_{выб}$ и n_{max} в каждом пропуске. Задача очень сложная даже для решения на современных ЭВМ.

Важны также другие критерии оптимальности.

Качество проката, как установлено выше, в значительной мере зависит от высоты очага деформации, т. е. от параметра l/h_{cp} . Когда $l/h_{cp} < 1$, очаг деформации высокий, и в центральной зоне слитка возможны трещины. С этих позиций следует признать лучшим такой режим обжатия, при котором металл меньше находится в условиях высоких очагов. Можно предложить математическую форму этого критерия, например в виде

$$K_2 = \prod (l/h_{cp})_i,$$

где знак \prod означает произведение параметров $(l/h_{cp})_i$ по тем пропускам, в которых их значения меньше единицы.

Те пропуски, в которых $(l/h_{cp})_i > 1$, следует не включать в произведение (положить в произведении $(l/h_{cp})_i = 1$). В такой постановке критерий K_2 должен стремиться к максимуму.

Расход энергии для двигателя постоянного тока равен $A = UI t$, где напряжение в обмотке якоря $U = IR$. Сила тока якоря I пропорциональна действующим моментам. Общее время t складывается из времен действия каждого из моментов на диаграмме моментов (см. рис. 9.13). Можно записать критерий расхода энергии на стане за n пропусков:

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^5 M_{ij}^2 \tau_{ij},$$

где i, j — соответственно номер пропуска и номер участка от 1 до 5 на диаграмме моментов.

Очевидно, при оптимальном режиме обжатий $\Theta \rightarrow \min$.

Вместо последнего критерия может быть выбран *расход энергии на одну тонну проката*: Θ/Q , где Q — вес годного проката, полученного из одного слитка в тоннах. Различие между этими критериями будет лишь в том случае, когда имеется возможность варьировать развесом слитка. Можно определить оптимальный развес слитка для данной схемы обжатий или выбрать наилучшее сочетание веса слитка и режима обжатия.

По такому критерию, как *загрузка оборудования*, режим прокатки будет оптимальным, когда по пропускам расходуемая мощность примерно одинакова и близка к равномерной. В i -м пропуске расход мощности по всем пяти участкам скоростной диаграммы выразится суммой

$$S_i = \sum_j^5 M_j n_{jc},$$

где n_{jc} — средняя скорость вращения валков (об/мин) на j -м участке диаграммы.

Необходимо вычислить среднюю загрузку по n пропускам:

$$S_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i.$$

Режим прокатки будет оптимальным при $\sum_{i=1}^n (S_i - S_{cp})^2 \rightarrow \min$.

Остальные критерии оптимизации рассматривать не будем, лишь отметим, что для них также необходимо найти математическую форму записи, что иногда представляет значительную трудность.

Часто в задаче нельзя обойтись одним критерием: нам хочется обеспечить максимум производительности при максимальном качестве металла и минимуме расхода энергии. Поскольку разные критерии, как правило, требуют разной стратегии прокатки, то удовлетворить все их одновременно невозможно. Но можно составить из них некий комплексный критерий, устремляя который к максимуму можно получить приемлемое решение по всем критериям.

Компоновка такого критерия осуществляется с помощью двух операций. Сначала каждый из критериев представляют в безразмерном виде. При этом важно, чтобы полученные безразмерные критерии C_1, C_2, \dots, C_m изменялись от 0 до 1 и в оптимальном решении стремились к 1. Затем каждому из критериев придают весовой множитель $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, причем $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m = 1$.

Значение весового множителя назначается самим технологом исходя из опыта и представления о важности того или иного критерия.

Обобщенный критерий должен быть устремлен к максимуму:

$$C_1 \alpha_1 + C_2 \alpha_2 + \dots + C_m \alpha_m \rightarrow \max.$$

При достижении максимума решение будет оптимальным по всем критериям одновременно, хотя по каждому критерию существуют лучшие режимы.

10.3. Методика расчета режима обжатия на блюминге

Сначала рассмотрим “ручную” методику расчета режимов обжатия, осуществляемую без применения ЭВМ и сложных методов поиска экстремума, направленную на получение любого решения, проходящего по ограничениям.

Эту методику удобно представить “по пунктикам”, прослеживая логику и технику расчета. Естественно, нам известны все размеры валков, шпинделей, характеристики двигателя, а также параметры прокатываемого металла: размеры слитка, размеры готового блюма, марка стали, температура прокатки и прочие параметры, используемые при расчетах. Известны также все ограничения и модель (формулы) процесса.

1. Рассчитываем суммарное обжатие слитка за весь цикл прокатки.

При известных размерах поперечного сечения слитка $H \times B$ и готового блюма $h \times b$ (см. рис. 9.10) суммарное обжатие

$$\Sigma \Delta h = k_b(H - h) + k_b(B - b).$$

Здесь коэффициент k_b характеризует среднее уширение одной стороны слитка, когда обжатие осуществляется по другой. Можно записать

$$k_b = 1 + (\Delta b / \Delta h)_{\text{ср}}.$$

На блюмингах коэффициент k_b в первом приближении принимают равным 1,15. Истинное уширение будет уточнено по ходу расчета. По мере уменьшения высоты прокатываемой полосы коэффициент k_b растет, но с увеличением ширины он снижается (табл. 10.2).

Для расчетов на других станах можно использовать данную таблицу значений коэффициента k_b .

2. Рассчитываем максимально возможное обжатие на блюминге. Предположим вначале, что прокатываемая полоса по ширине не превышает значения B_1 (см. рис. 10.3), поэтому обжатие ограничено максимальным углом захвата:

$$\Delta h_{\text{max}} = D(1 - \cos \alpha_{\text{max}}).$$

Задаем α_{max} в пределах 24–28°.

3. Количество пропусков n , за которое можно осуществить заданное суммарное обжатие, определяется неравенством

$$n > \Sigma \Delta h / \Delta h_{\text{max}}.$$

Как известно, число пропусков n нечетно, и по одной стороне слитка (например, по H) оно таково:

$$n_H = (n + 1) / 2,$$

а по другой стороне (стороне B)

$$n_B = (n - 1) / 2.$$

Если, к примеру, получим по расчету $n > 7,3$, то можно выбрать $n = 9$ или 11, хотя увеличение числа пропусков ведет к потере производительности стана

Таблица 10.2

Значения коэффициента k_b

Тип стана	Значение k_b
Блюминг	1,15
НЗС	1,20
Крупносортовые станы	1,25
Среднесортные станы	1,30
Мелкосортные станы	1,35–1,45

и снижению интенсивности обжатий. Однако при большем числе пропусков можно лучше распределить обжатия по пропускам по силе прокатки и моменту, добиться более равномерной загрузки привода, снизить опасность перегрева, иногда снизить суммарный расход энергии на прокатку.

4. Среднее обжатие по стороне H

$$\Delta h_{\text{ср} H} = k_b(H - h) / n_H,$$

и по стороне B

$$\Delta h_{\text{ср } B} = k_b(B - b) n_B.$$

5. Далее необходимо распределить кантовки, определить последовательность прокатки по каждой из сторон, номер калибра на валках для каждого пропуска. Можно воспользоваться схемами кантовок, данных в разд. 9.3.

Отметим, что распределение кантовок и назначение номеров калибров всегда должен осуществлять человек вручную в диалоговом режиме, но не по программе.

6. Результаты расчетов можно представить графически. На рис. 10.4 приведены максимальное и среднее обжатия и число пропусков для стороны H и B . Чем больше разница между максимальным и средним обжатием, тем больше возможностей у технолога для варьирования режимом обжатия по пропускам.

Он имеет право произвольно назначить любые обжатия в пропуске, руководствуясь только двумя условиями: во-первых, они не должны превышать допустимое и, во-вторых, среднее обжатие по пропускам должно равняться значению, нанесенному на график. Можно назначить возрастающий (кривая 2) или убывающий (кривая 1) графики обжатия при прокатке. Кривые не обязаны быть обязательно плавными. Принципиально возможны распределения обжатий по другим кривым, например с минимумом или максимумом в средних пропусках. Рассмотрим подробно преимущества и недостатки каждого из графиков обжатий.

Если распределить обжатия по возрастающему графику 2, то небольшие обжатия будут приходиться на первые пропуски, когда высота полосы велика. В этих пропусках фактор $l/h_{\text{ср}}$ будет малым, очаг деформации высоким, возможны трещины в центральных зонах слитка, появятся большие наплывы, качество металла будет невысоким, которое, возможно, не удастся исправить в последних пропусках. С позиций качества металла график обжатий 1 более удачен, так как обжатия снижаются по мере снижения высоты раската, и практически во всех пропусках фактор $l/h_{\text{ср}}$ более приближен к 1.

Производительность, наоборот, будет выше, если катать по графику 2. При таком режиме прокатки в первых пропусках полоса короткая и при невысоких обжатиях удлиняется медленно. Машинное время прокатки зависит от длины полосы, и в этих пропусках оно небольшое. Оно станет большим лишь в нескольких последних пропусках. При прокатке по графику 1 уже в первых пропусках длина полосы становится большой, машинное время велико, и при дальнейшей прокатке с небольшими обжатиями полоса уже будет длинной

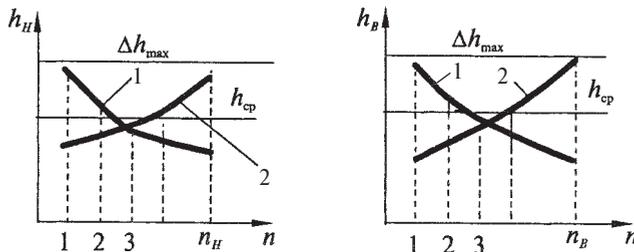


Рис. 10.4. Распределение обжатий по пропускам по сторонам H и B

и машинное время останется большим. Суммарная длина полос по всем пропускам по графику 1 выше, чем по графику 2, что и определяет различие машинных времен. При прокатке часто критерий производительности несовместим с критерием качества металла, эти критерии требуют прямо противоположной стратегии обжатия металла: либо качество, либо количество. Впрочем, такое наблюдается практически всегда и в других случаях.

Загрузка оборудования по мощности более равномерна, если в первых пропусках обжатия меньше, чем в последних, т. е. прокатка ведется по графику 2. Большие моменты в первых пропусках возникают за счет как высокой неравномерности деформации металла, так и большой ширины слитка. К концу прокатки эти параметры снижаются, и обжатие можно увеличить.

По критерию минимума расхода энергии на прокатку $\Theta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^5 M_{ij}^2 \tau_{ij}$ различие в графиках прокатки 1 и 2 не столь очевидно. По возрастающему графику 2 моменты более равномерно распределены по пропускам, и они ниже в первых и выше в последних пропусках, чем при прокатке по графику 1. Время прокатки τ_i также более равномерно возрастает к последним пропускам. Если катать по графику 1, то в первых пропусках будут максимальные моменты, но полоса короткая и τ_i невелико. В следующих пропусках длина полосы будет быстро наращиваться, но момент прокатки падать. Суммарный расход энергии по любому из этих графиков может оказаться ниже.

Итак, руководствуясь приведенными логическими рассуждениями или более сложными подсчетами критериев, технолог назначает обжатия по пропускам Δh_i . Необходимо подчеркнуть слово “назначает”, потому что даже при применении сложных математических методов расчета, когда обжатия по пропускам выбираются с помощью программы на ЭВМ, решение должен принять технолог.

7. Имея обжатия по пропускам, можно построить таблицу режима обжатия по пропускам. Примерная форма ее представлена в табл. 10.3.

Первые семь столбцов таблицы обязательны и отражают размеры проката после каждого пропуска. Остальные столбцы пока неважны, они отражают значения параметров, по которым производится проверка режима обжатия.

Теперь можно уточнить уширение полосы Δb_i , рассчитав его по одной из известных формул, например по формуле Бахтинова с поправкой Смирнова:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{1,15}{2h_0} \left(\sqrt{0,5\Delta h \cdot D} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^v. \text{ Здесь } \mu \text{ — коэффициент трения, } v \text{ — коэффициент Смирнова; } v = 1, \text{ если } b_0 < h_0, \text{ и } v = 0, \text{ если } b_0 > h_0.$$

Таблица 10.3

Таблица обжатий

Номер пропуска	Номер калибра	Направление обжатия	Размеры проката $B \times H$	Δh_i	Δb_i	Длина полосы L_i	P	M_2	$\tau_{\text{маш}}$	n_{max}

Уширение, рассчитанное по этой формуле, не обязано быть равным среднему значению, заложенному коэффициентом k_b , поэтому конечное сечение блюма может немного не совпадать с заданным $b \times h$. Необходимо подогнать его под заданные размеры, изменив обжатия в любых пропусках. Технику корректировки проследим ниже на конкретном примере.

8. Полученную таблицу прокатки необходимо проверить по давлениям и моментам прокатки. В каждом пропуске должны выполняться известные условия:

$$P_i < [P] \quad \text{и} \quad M_2 < M_{\text{откл.}}$$

Если в каких-то пропусках одно из этих условий не выполняется, необходимо снизить обжатие в этом пропуске и перераспределить обжатия в некоторых остальных пропусках. Режим прокатки принимается как возможный, если приведенные ограничения пройдены во всех пропусках. При ручном расчете этот режим считается приемлемым. При расчете на ЭВМ следует просчитать несколько вариантов, варьируя числом пропусков, обжатиями по пропускам и скоростными параметрами, и выбрать лучший по заданному критерию.

10.4. Пример расчета режима обжатия на блюминге

Рассчитаем режим обжатия на блюминге 1300 Криворожского металлургического комбината при прокатке из слитка размерами $\frac{820 \times 720}{680 \times 600} \times 2200$ блюма размерами 360×360 из стали марки Ст45. Слиток без головной насадки имеет форму усеченной пирамиды с максимальным сечением $H_0 = 820$, $B_0 = 720$ мм (для примера выбран блюминг криворожского комбината потому, что данные по стану и режимам обжатия указанного слитка опубликованы).

1. Суммарное обжатие

$$\Sigma \Delta h = 1,15(820 - 360) + 1,15(720 - 360) = 943 \text{ мм.}$$

2. Все данные по блюмингу 1300 будут введены по ходу расчета. По чертежу диаметр валка по дну первого калибра $D_k = 1100$ мм. Максимальный угол захвата в среднем по всем пропускам можно принимать в пределах $24-28^\circ$. Выбираем $\alpha_{\text{max}} = 27^\circ$. Тогда

$$\Delta h_{\text{max}} = 1100(1 - \cos 27^\circ) = 119,9 \text{ мм.}$$

3. Количество пропусков

$$n > \frac{943}{119,9} > 7,86.$$

Примем $n = 9$ (можно 11 или 13).

Имеем количество пропусков по сторонам H и B

$$n_H = 5; n_B = 4.$$

Средние обжатия

$$\begin{aligned} \text{по стороне } H \quad \Delta h_{\text{cp } H} &= 1,15(820 - 360)/5 = 105,8; \\ \text{по стороне } B \quad \Delta h_{\text{cp } B} &= 1,15(720 - 360)/4 = 103,5. \end{aligned}$$

Важно отметить, что средние обжатия по обеим сторонам примерно равны. Это признак того, что размеры слитка выбраны правильно и по обеим сторонам будут примерно одинаковые обжатия, что полезно по загрузке стана.

4. Строим схему обжатий и назначаем кантовки. Для примера на рис. 10.5 приведены две возможные схемы деформации. Реализуем первую из них, в которой обжатия начинаются с уменьшения стороны H и кантовки осуществляются после каждого второго пропуска (схема 2—2—2—2—1 = 9).

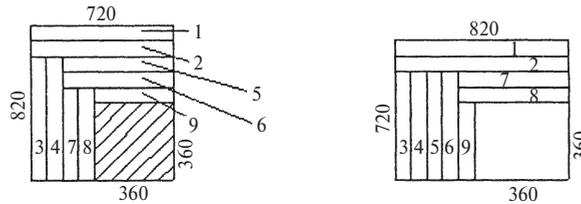


Рис. 10.5. Схемы кантовок

По второй схеме (2—4—2—1 = 9) на одну кантовку меньше, но после первой кантовки есть опасность потери устойчивости полосы. Следует заметить, что даже при расчете режимов обжатия на ЭВМ схему обжатий полезно составлять вручную.

5. Строим графики обжатий по каждой из сторон (рис. 10.6). Допустим, критерием оптимизации является производительность стана, поэтому выберем возрастающие обжатия к концу прокатки. По критерию равномерности загрузки оборудования этот график обжатий также предпочтителен.

Пусть обжатия по пропускам таковы:

по стороне H : 90—100—100—110—115, среднее — 103;

по стороне B : 90—100—110—115, среднее — 103.

Следует обратить внимание на то, что обжатия округлены до 5 мм, так как с такой точностью осуществляется прокатка на блюминге. В связи с этим все расчеты на блюминге необходимо осуществлять с точностью до 1 мм с конечным округлением высоты до 5 мм и уширения до 1 мм.

6. Строим таблицу обжатий, точнее, заполняем пока первые шесть столбцов таблицы 10.3. По чертежу на валках блюминга 1300 нарезано четыре калибра, расположенных последовательно (см. рис. 9.7, а). Первые четыре пропуска

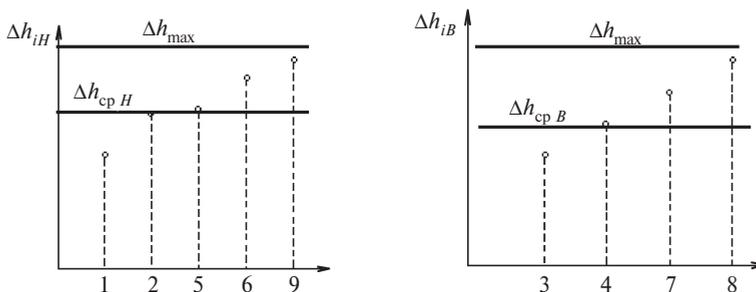


Рис. 10.6. Распределение обжатий по пропускам

будем осуществлять в первом, следующие два — во втором, очередные два — в третьем и последний пропуск — в четвертом калибрах.

Во всех пропусках без кантовки (в нашем случае — во всех четных пропусках) высота полосы $H_i = H_{i-1} - \Delta h_i$, ширина $B_i = B_{i-1} + \Delta b_i$, где уширение Δb_i рассчитывается по формуле Бахтинова без поправки Смирнова ($\nu = 0$), так как в этих пропусках ширина b_{i-1} примерно равна или больше высоты h_{i-1} .

Во всех пропусках после кантовка (у нас — во всех нечетных, включая первый) высота $H_i = B_{i-1} - \Delta h_i$, ширина $B_i = H_{i-1} + \Delta b_i$, в формуле уширения Бахтинова следует принять поправку $\nu = 1$, так как полоса после кантовки всегда узкая. Например, для первого пропуска (при $\mu = 0,5$ и $\nu = 1$, так как $b_0 < h_0$)

$$H_1 = 820 - 90 = 730 \text{ мм,}$$

$$\Delta b_1 = \frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{1,15}{2h_0} \left(\sqrt{0,5\Delta h \cdot D} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \left(\frac{b_0}{h_0} \right)^\nu =$$

$$= \frac{1,15 \cdot 90}{2 \cdot 820} \left(\sqrt{0,5 \cdot 90 \cdot 1100} - \frac{90}{2 \cdot 0,5} \right) \left(\frac{720}{820} \right) = 7,3.$$

Округляем до любого ближайшего целого значения, например 8, и заносим в табл. 10.4. Ширина $B_1 = 720 + 8 = 728$ мм.

Для второго пропуска $\nu = 0$ и

$$\Delta b_2 = \frac{1,15 \cdot 100}{2 \cdot 730} \left(\sqrt{0,5 \cdot 100 \cdot 1100} - \frac{100}{2 \cdot 0,5} \right) = 10,4.$$

Округлили до 10.

Таблица 10.4

Результаты расчета (таблица обжатий)

Номер про-пуска	Номер калиб-ра	Сторо-на	Размеры проката $H \times B$	Δh_i	Δb_i	Корректировка размеров		L	P	M_2	$\tau_{\text{маш}}$	n_{max}
						Δh	$H \times B$					
			820×720									
1	1	H	730×728	90	8							
2	1	H	630×738	100	10							
			×									
3	1	B	648×638	90	8							
4	1	B	548×649	100	11							
			×									
5	2	H	549×558	100	10							
6	2	H	439×571	110	13	105	444×571					
			×				×					
7	3	B	461×450	110	11	110	461×455					
8	3	B	346×465	115	15	115	346×470					
			×				×					
9	4	H	350×360	115	14	110	360×360					

По расчетам получился блюм размерами 350×360, отличающийся от заданного, потому что среднее расчетное уширение $(\Delta b/\Delta h)_{\text{ср}}$ не совпадает с заданным $\Delta b/\Delta h = k_b - 1 = 0,15$. Полученную таблицу прокатки необходимо подкорректировать. Видно, что по стороне H слэб пережат на 10 мм. Следует уменьшить обжатия в одном пропуске на 10 мм или в двух — по 5 мм. Уменьшим обжатия на 5 мм в шестом и девятом пропусках. Уширение при этом изменится незначительно, поэтому его пересчитывать не будем (хотя можно), а высоты, начиная с шестого пропуска, пересчитываем.

7. В полученную табл. 10.4 необходимо внести длину проката по пропускам L_i . Так как длина слитка задана и объем его V можно вычислить, то из условия постоянства объема во всех пропусках определяется длина $L_i = V/(H_i B_i)$. Однако в нескольких первых пропусках, когда уплотняются рыхлые объемы слитка, эта формула не подходит. Можно примерно принять в этих пропусках длину слитка неизменной и равной исходной.

Когда известен вес слитка, лучше использовать условие постоянства веса:

$$Q = \gamma H_i B_i L_i.$$

Если удельный вес γ принять постоянным во всех пропусках (для стали $\gamma = 7,8 \text{ т/м}^3$), то длина L_i в первых пропусках при расчете по формуле окажется меньше длины слитка. В этих пропусках ее следует принять равной длине слитка L_0 .

Например, известно, что заданный слиток весит 8,5 т. При плотном строении он имел бы длину после первого пропуска

$$L_1 = Q/\gamma H_1 B_1 = 8,5/(7,8 \cdot 0,730 \cdot 0,728) = 2,05 \text{ м.}$$

Мы оставляем $L_1 = L_0 = 2,2 \text{ м}$.

Далее в каждом пропуске или в наиболее нагруженных из них необходимо рассчитать силу прокатки P_i и максимальный момент M_{2i} и осуществить основные проверки по ограничениям.

Для примера рассчитаем силу прокатки в первом пропуске. Имеем $h_0 = 820$, $b_0 = 720$, $h_1 = 730$, $b_1 = 728$, $\Delta h = 90$,

$$l = \sqrt{0,5 \cdot 90 \cdot 1100} = 222,5.$$

Степень деформации $\varepsilon = \Delta h/h_0 = 90/820 = 0,11$.

Параметр $l/h_{\text{ср}} = 222,5 \cdot 2/(820 + 730) = 0,29 < 1$. Очаг деформации высокий, поэтому $n_{\text{с}} = 1$ и

$$n_3 = 2 - \sqrt{0,29} = 1,46.$$

Коэффициент натяжения полосы $n_{\text{нат}} = 1$. Коэффициент, учитывающий ширину полосы,

$$n_{\text{б}} = 1 + \frac{\mu}{3} \frac{b_0}{h_0} = 1 + \frac{0,5}{3} \frac{720}{820} = 1,14,$$

что меньше значения 1,155, поэтому принимаем расчетное значение 1,14.

$$\text{Скорость деформации } u = \frac{\pi D n_1 \varepsilon}{60 l} = \frac{\pi \cdot 1100 \cdot 60 \cdot 0,11}{60 \cdot 222,5} = 1,7 \text{ с}^{-1}.$$

Температура нагрева слитка под прокатку для стали 45, согласно диаграмме Fe—C (см. рис. 9.6), может лежать в пределах 1250–1300 °С. Температура прокатки будет на 50–100 °С ниже. В процессе прокатки тепло, выделяемое за счет пластической деформации, примерно компенсирует потери тепла за счет остывания слитка, поэтому обычно в расчетах на блюминге и слябинге температуру прокатки во всех проходах считают неизменной. Примем температуру прокатки $T = 1150$ °С. По справочнику [5] (с. 185) по графику $K = f(\epsilon, u, T)$ находим $K = 3,8$ кгс/мм² = 38 Н/мм².

Получаем

$$p_{\text{cp}} = n_3 n_{\beta} K = 1,46 \cdot 1,14 \cdot 38 = 63,2 \text{ Н/мм}^2;$$

$$P = p_{\text{cp}} l b_{\text{cp}} = 63,2 \cdot 222,5 \cdot 0,5(720 + 728) = 10180000 \text{ Н} =$$

$$= 10,18 \text{ МН} = 10180 \text{ кН} = 1018 \text{ тс}.$$

В старой справочной литературе (включая использованную) было принято считать силу прокатки на блюминге в тонносилах (тс), а моменты в тонносилах, умноженных на метр (тс·м) (обозначаемых обычно тм). Мы рекомендуем все расчеты производить только в системе единиц СИ. Только для сравнения со справочными данными оставим значения также в старых единицах.

Обычно допустимые силы прокатки $[P]$ на блюмингах лежат в пределах 20–25 МН (2500–3000 тс). На слябингах они больше: $[P] = 30$ –40 МН. Самые высокие усилия прокатки возникают на крупных толстолистовых станах: $[P] = 50$ –90 МН (даже до 150 МН).

Итак, в нашем примере первый пропуск по силе прокатки проходит. Проверим его по отключающему моменту.

1. Примем предельный коэффициент плеча равнодействующей $\Psi = 0,58$. Момент прокатки

$$M_{\text{пр}} = P\Psi l = 210180 \cdot 0,58 \cdot 222,5 \cdot 10^{-3} = 1314 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

2. При коэффициенте трения в подшипниках $\mu_{\text{ш}} = 0,005$ и диаметре шеек $d_{\text{ш}} = 0,6D$ (диаметр шеек лучше брать из чертежа валков) момент трения в подшипниках

$$M_{\text{тр}} = P\mu_{\text{ш}} d_{\text{ш}}/2 = 10180 \cdot 0,005 \cdot 0,6 \cdot 1100 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 16,8 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

3. Момент холостого хода следует измерить на холостом ходу стана, однако можно положить $M_{\text{х.х}} = 0,05M_{\text{н}}$. Номинальный момент, как и другие паспортные характеристики двигателя, должны быть известны. При выборе нового двигателя или в учебных целях можно воспользоваться табл. 10.1. Допустим, для привода каждого валка выбран двигатель МП5000-50 мощностью $N_{\text{н}} = 3680$ кВт с номинальным моментом 720 кН·м. На один двигатель

$$M_{\text{х.х}} = 0,05M_{\text{н}} = 0,05 \cdot 720 = 36 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

4. Расчет динамического момента. По паспорту двигателя (см. табл. 10.1) номинальные скорости валков $n_1 = 50$ и $n_2 = 100$ об/мин, маховый момент якоря двигателя $GD_{\text{я}}^2 = 250$ т·м², коэффициент перегрузки $k = 2,5$. Выберем ускорение $A = dn/dt = 60$ об/мин/с и замедление $B = dn/dt = 60$ об/мин/с.

Полный маховый момент на валу одного двигателя

$$\sum GD^2 = GD_{\text{в}}^2 + GD_{\text{шп}}^2 + GD_{\text{я}}^2.$$

Для валка и шпинделя необходимо по чертежу или паспорту стана найти диаметры в метрах и массы валка и шпинделя в тоннах. Попытаемся восстановить эти данные, пользуясь имеющимися соотношениями между размерами. Исходной и главной характеристикой блюминга (как и сортового стана) является номинальный диаметр D валка. Остальные размеры связаны с ним примерными соотношениями: для шейки валка — длина $l_{\text{ш}} = D$, диаметр шейки $d_{\text{ш}} = 0,6D$, длина бочки валка $L = (2,2-2,3)D$; для средней части шпинделя (расточка) — длина $L_{1\text{шп}} = 8-12$ м и диаметр $D_{1\text{шп}} = (0,4-0,5)D$; для головки шпинделя — диаметр $D_{2\text{шп}} = (0,9-1,0)D$ и длина $L_{2\text{шп}} = D_{2\text{шп}}$.

Маховый момент валка принято вычислять в старой системе единиц ($\text{т}\cdot\text{м}^2$) потому, что справочная литература оперирует такими данными. Если размеры проставлены в метрах, он таков:

$$\begin{aligned}\sum GD_{\text{в}}^2 &= GD_{\text{боч}}^2 + 2GD_{\text{ш}}^2 = \pi(D^2LD^2 + 2d_{\text{ш}}^2l_{\text{ш}}d_{\text{ш}}^2)\gamma/4 = \\ &= \pi(1,3^4\cdot 2,2 + 2\cdot 0,36\cdot 0,36\cdot 1,3^4\cdot 1,3)7,8/4 = 44,5 \text{ т}\cdot\text{м}^2.\end{aligned}$$

Аналогично оцениваем маховый момент шпинделя:

$$\begin{aligned}\sum GD_{\text{шп}}^2 &= GD_{1\text{шп}}^2 + 2GD_{2\text{шп}}^2 = \\ &= \pi(0,5^4\cdot 1,3^4\cdot 10 + 2\cdot 1,3^4\cdot 1,3)7,8/4 = 56,4 \text{ т}\cdot\text{м}^2.\end{aligned}$$

Суммарный маховый момент на валу одного двигателя

$$\sum GD^2 = 44,5 + 56,4 + 250 = 350,9 \text{ т}\cdot\text{м}^2.$$

Динамический момент при разгоне и остановке двигателя

$$M_{\text{дин}} = \frac{\sum GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = 350,9\cdot 60/375 = 56,2 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Обращаем внимание на то, что коэффициент в знаменателе равен 375 только потому, что маховый момент рассчитывался в старой системе единиц — $\text{т}\cdot\text{м}^2$.

Максимальный момент на валу двигателя, возникающий на втором участке скоростной диаграммы, таков:

$$M_2 = 1314 + 16,8 + 36 + 56,2 = 1423,0 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Полезно сравнить соотношение моментов, входящих в сумму.

Отключающий момент $M_{\text{откл}} = 2,5\cdot 720 = 1800 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Прокатка по выбранному режиму возможна, двигатель не отключается ($M_2 < M_{\text{откл}}$).

Проверим возможность перегрева двигателя в рассчитываемом пропуске. Предположим, что реализуется прокатка по треугольной диаграмме скоростей. Тогда при $\tau_3 = 0$ и скоростях $n_{\text{зах}} = 15$ об/мин и $n_{\text{выб}} = 25$ об/мин получим

$$L_1 = \frac{\pi D}{60} \left(\frac{n_{\text{max}}^2 - n_{\text{зах}}^2}{2A} + \frac{n_{\text{max}}^2 - n_{\text{выб}}^2}{2B} \right) = \frac{1,1\pi}{60} \left(\frac{n_{\text{max}}^2 - 15^2}{2\cdot 60} - \frac{n_{\text{max}}^2 - 25^2}{2\cdot 60} \right).$$

Решая относительно n_{max} , получим $n_{\text{max}} = 54,6$ об/мин. Скорость не превышает значения n_2 , даже ниже n_1 , поэтому принимаем прокатку по треугольной диаграмме.

$$\begin{aligned}\tau_1 &= n_3/A = 15/60 = 0,25 \text{ с}; \\ \tau_2 &= (54,6 - 15)/60 = 0,66 \text{ с}; \\ \tau_4 &= (54,6 - 25)/60 = 0,49 \text{ с}; \\ \tau_5 &= 25/60 = 0,42 \text{ с}.\end{aligned}$$

Введем паузу после остановки двигателя ($\tau_0 = 0,5$ с). Моменты на валу двигателя на каждом участке скоростной диаграммы:

$$\begin{aligned}M_1 &= 36 + 56,2 = 92,2 \text{ кН}\cdot\text{м}; \\ M_2 &= 1423,0 \text{ кН}\cdot\text{м}; \\ M_4 &= 36 + 1314 + 16,8 - 56,2 = 1310,6 \text{ кН}\cdot\text{м}; \\ M_5 &= 36 - 56,2 = -20,2 \text{ кН}\cdot\text{м}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{\text{экв}} &= \sqrt{\frac{(M_1^2 \tau_1 + M_2^2 \tau_2 + M_3^2 \tau_3 + M_4^2 \tau_4 + M_5^2 \tau_5)_i}{(\tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5)_i}} = \\ &= \sqrt{\frac{92,2^2 \cdot 0,25 + 1423,0^2 \cdot 0,66 + 1310,6^2 \cdot 0,49 + 20,2^2 \cdot 0,42}{0,25 + 0,66 + 0,49 + 0,42 + 0,5}} = 969,5 > 720 \text{ кН}\cdot\text{м}.\end{aligned}$$

В первом пропуске двигатель перегревается, однако это еще ничего не значит. Режим прокатки не принимается тогда, когда по всем пропускам не удовлетворяется условие перегрева.

Кстати, на криворожском комбинате при менее мощном двигателе предпочитают прокатывать рассмотренный слиток за 13 пропусков.

10.5. Особенности расчета режима обжатия на слябинге

Для слябинга расчет режимов обжатия в целом производится по той же методике, что и для блюминга, но для каждой пары валков отдельно. Однако необходимо учитывать ряд особенностей.

Первый и иногда единственный пропуск осуществляется “на ребро”. В нем назначают небольшие обжатия, достаточные только для разрыхления окалины на основных гранях сляба ($\Delta h = 20-40$ мм). В том случае, когда требуется уменьшить ширину сляба, применяются дополнительные ребровые пропуски.

В “пластовых” пропусках металл обжимается одновременно горизонтальными и вертикальными валками. Здесь количество пропусков в вертикальных не должно превышать количества пропусков в горизонтальных валках: $n_r \geq n_b$. Нормален режим прокатки, когда в вертикальных валках, выполнивших работу по деформации металла до требуемой ширины, в нескольких последних пропусках установки не изменяются, убирается лишь появляющееся уширение, и выравниваются наплывы. Таким способом удастся уменьшить величину наплывов на готовом слябе.

В пластовых пропусках обжатия за проход должны выбираться по тем же рекомендациям, что и на блюминге. Для вертикальных валков лимитирующим обжатие фактором является максимальный угол захвата (реже — момент прокатки), поэтому

$$\Delta h_{\text{max в}} = D_{\text{в}}(1 - \cos \alpha_{\text{max}}).$$

Для горизонтальных пропусков максимально возможное обжатие следует выбирать по максимально допустимому усилию $[P]$ и проверять его (обжатие) по отключающему моменту. Если $[P]$ определяется прочностью валков, то максимальное обжатие Δh_{\max} рассчитывается по формуле

$$\Delta h_{\max} = \frac{0,32D^5 [\sigma_{\text{изг}}]^2}{[(L + l - 0,5B) pB]^2},$$

где D — диаметр горизонтального валка, мм; L, l — длина бочки и шейки валка, мм; B — ширина прокатываемой полосы, мм; $[\sigma_{\text{изг}}]$ — допустимое изгибное напряжение, для стального валка $[\sigma_{\text{изг}}] = 100-120$ Н/мм²; p — среднее давление металла на валки, при горячей прокатке углеродистых сталей $p = 70-90$ Н/мм².

На слябинге оптимальность режима обжатия оценивают теми же критериями, что и на блюминге, однако следует выделить дополнительный и важнейший критерий: толщина наплывов на готовом слябе должна стремиться к минимуму. Для борьбы с наплывами слябовый слиток отливают со скосами по боковым граням (рис. 10.7), которые при прокатке заполняются наплывами, и форма сляба приближается к прямоугольной.

Кроме того, существенное влияние на толщину и форму наплывов на готовом слябе оказывает режим обжатия в вертикальных и горизонтальных пропусках и их соотношение. В горизонтальных пропусках максимальные обжатия полезны всегда, особенно в последних: снижение высоты очага деформации способствует уменьшению наплывов. В вертикальных же пропусках очаг деформации очень высокий: фактор $l/h_{\text{ср}}$ здесь не выше 0,15–0,20. На таких сверхвысоких очагах увеличение обжатия вызывает почти пропорциональное увеличение уширения в приконтактных зонах, а уширение центральных слоев всегда равно 0. В вертикальных пропусках с увеличением обжатия наплывы растут, особенно при больших относительных ширинах полосы b/h . Но при прокатке с очень малыми обжатиями уширения в вертикальных валках хватает только на заполнение металлом выемки наплывов, поэтому такие обжатия применяются для уменьшения суммарной величины наплывов на слябе. С позиций качества сляба (с минимальными наплывами) полезно всю работу по формированию требуемой ширины сляба сосредоточить в первых трех–семи пропусках. В пластовых пропусках вертикальные валки должны выполнять только разглаживание наплывов, образующихся в горизонтальных пропусках. Однако по производительности такая прокатка нерациональна, так как суммарное количество ребровых пропусков возрастает, а все ребровые пропуски, кроме первого, “лишние” и увеличивают цикл прокатки слитка. Прослеживается известная закономерность: стратегия прокатки, направленная на получение качественного проката, приходит в противоречие с требованиями по максимуму производительности.

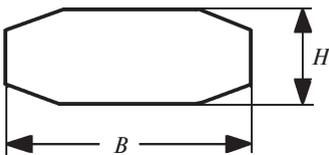


Рис. 10.7. Форма поперечного сечения слитка для прокатки слябов

ПРОКАТКА НА ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНАХ

11.1. Типы непрерывно-заготовочных станов

Прокатанные на блюминге блюмы направляются на заготовочные станы. Наиболее распространены непрерывные заготовочные станы (НЗС), которые расположены на одной линии прокатки с блюмингом. На рис. 11.1 и 11.2 представлены упрощенные схемы расположения оборудования типовых НЗС.

Станы первого типа содержат горизонтальные и вертикальные клетки, поэтому кантовка полосы при прокатке не требуется. Станы второго типа не имеют вертикальных валков.

Рассмотрим схему расположения основного оборудования НЗС 1000/730/530 первого типа (рис. 11.3), состоящего из 14 клеток дуо, который установлен после блюминга-слябинга на заводе ОАО “Северсталь”. Такого типа НЗС установлены также на Челябинском, Криворожском металлургических комбинатах, а также на металлургических заводах некоторых зарубежных стран. В отличие от них на рассматриваемом стане после второй клетки 1000 расположена МОЗ, которая на большинстве заводов устанавливается перед ножницами блюминга.

Первую группу составляют две отдельно стоящие черновые клетки А и Б 1000, за которыми следует черновая, а затем чистовая непрерывные группы клеток с валками диаметром соответственно 730 мм (клетки 1–6) и 530 мм (клетки 7–12). Прокатка на НЗС осуществляется в нереверсивном режиме, т. е. клетки всегда вращаются в одну сторону, и заготовка проходит последовательно через стан, находясь одновременно в нескольких клетях одной группы. Между группами клеток расстояние таково, что заготовка целиком умещается между ними, и возможна кантовка заготовки.

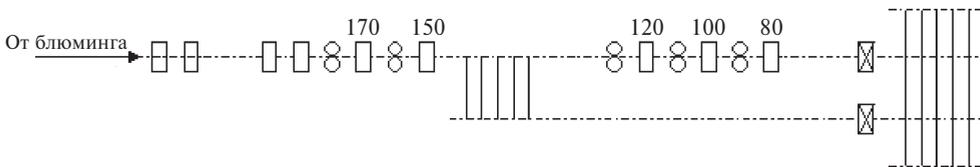


Рис. 11.1. Схема расположения клеток НЗС с вертикальными валками

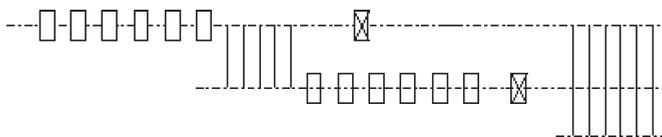


Рис. 11.2. Схема расположения клеток НЗС без вертикальных валков

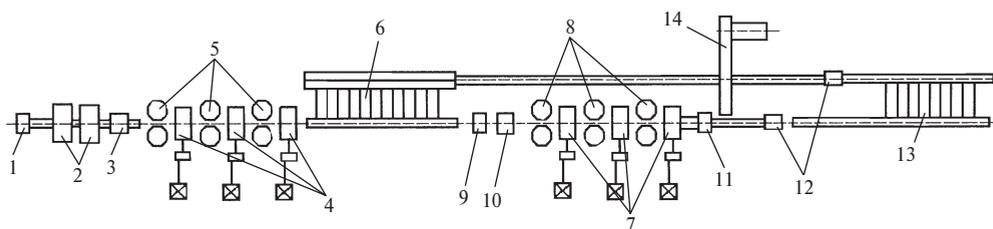


Рис. 11.3. Непрерывно-заготовочный стан ОАО «Северсталь»:

1 — клеймовочная машина в составе блюминга-слябинга 1300; 2 — рабочие клети А и Б 1000; 3 — машина огневой зачистки (МОЗ); 4 — горизонтальные клети 730 черновой группы; 5 — вертикальные клети 730 черновой группы; 6 — передаточный шлеппер для крупной заготовки; 7 — горизонтальные клети 530 чистовой группы; 8 — вертикальные клети 530 чистовой группы; 9 — аварийные ножницы; 10 — шайбовый кантователь; 11 — летучие ножницы; 12 — клеймитель; 13 — холодильник; 14 — передача слябов к листовому стану 2800/1700

Каждая из горизонтальных клетей черновой и чистовой клетей производит квадратного сечения заготовку, которая может быть направлена на сортовой стан. Указанный стан может производить квадратную заготовку размерами по стороне от 200 до 80 мм. На рис. 11.1 приведены размеры наиболее распространенной заготовки, выпускаемой на станах такого типа. Как видно, разнообразием выпускаемой продукции стан не отличается. На некоторых НЗС выпускают также круглую трубную заготовку примерно тех же диаметров. Производительность стана — до 6 млн. т проката в год. Прослеживается еще одна закономерность, свойственная всему прокатному производству: чем выше производительность стана, тем уже сортамент выпускаемой продукции.

Представленный стан признан лучшим в мире по многим критериям прокатки, прежде всего по производительности. Однако он имеет существенный недостаток. Обычно на каждом валке нарезают четыре-пять одинаковых калибров, таким образом, образуется четыре-пять линий прокатки. После прокатки определенного количества металла все калибры первой линии изнашиваются, и стан перестраивается на вторую линию калибров. Если для горизонтальных калибров переход осуществляется достаточно просто — путем простого переключения входной стрелки на следующий калибр первой клети, то для вертикальных валков эта процедура сложна: валок перемещается сразу в двух плоскостях, а положение его относительно линии прокатки необходимо контролировать соответствующими датчиками.

В этом смысле более удобен НЗС второго типа, установленный на Магнитогорском металлургическом комбинате (см. рис. 11.2) и не имеющий вертикальных клетей. Некоторые разновидности станов такого типа имеются на ряде других отечественных и зарубежных заводов. На таких станах на следующую линию прокатки можно переходить путем переключения стрелки в паузе между двумя заготовками без остановки и настройки клетей. Сбоя в ритме прокатки не происходит. Кантовка полосы внутри непрерывной группы осуществляется с помощью неприводных валков, образующих калибр, повернутый на угол α к горизонтали (рис. 11.4). Этот угол рассчитан таким образом, чтобы выходящий из клети стана передний конец полосы при подходе

к следующей клетке повернулся на 90° . Полоса скручивается, что не опасно, пока полоса массивная и имеет высокую температуру. Однако возможно, что готовый прокат будет скрученным, и нет средств для устранения этого вида брака, который именуется “штопор”. При хорошей настройке стана скручивание полосы происходит редко.

Следует отметить, что существующие НЗС конструктивно могут значительно отличаться друг от друга. Количество клеток изменяется от 4 до 14 (но всегда четное). По типу привода прослеживается история его совершенствования по мере накопления опыта. Более старые станы имеют дешевый групповой привод, при котором все клетки приводятся от одного двигателя, вращающегося с постоянной скоростью, через редукторы, передаточное отношение которых рассчитывается из условия постоянства секундного объема металла, проходящего через каждую i -ю клетку:

$$V_i F_i = \text{const},$$

где V_i — линейная скорость прокатки, м/с; F_i — площадь поперечного сечения полосы после i -го пропуска.

Однако в связи с износом калибров и неточностями в настройке стана условие постоянства секундного объема не выполняется абсолютно точно, оно всегда изменяется в каких-то пределах, поэтому полоса при прокатке испытывает со стороны соседних клеток либо подпор, либо натяжение. С подпором катать нельзя, потому что через заготовку i -я клетка будет дополнительно проворачивать следующую клетку. В этом случае момент прокатки в i -й клетке возрастает почти вдвое, а в следующей клетке он падает почти до 0. На НЗС катают всегда с небольшим натяжением, поэтому каждая следующая клетка имеет скорость на 1–2 % больше, чем требует условие постоянства секундного объема:

$$V_i F_i / (1,01–1,02) = \text{const}.$$

Появилась потребность в индивидуальном регулируемом приводе с более дорогим двигателем постоянного тока, который позволяет плавно и точно регулировать скорости. На всех современных НЗС установлены такие приводы.

11.2. Калибровка валков НЗС

На рис. 11.5 приведен один из первых вариантов калибровки валков 14-клеточного НЗС ОАО “Северсталь”. Первые черновые клетки стана скалиброваны по системе ящичных калибров. Однако форма проката в ящичном калибре отличается от квадратной, в таких калибрах производят *болванку* по ГОСТ 4692 (почти квадратную заготовку с закругленными углами и неровной боковой гранью). В чистовой группе клеток применяют систему ромбических калибров, которая позволяет выдавать из каждой четной клетки заготовку в форме точного квадрата, которая так и называется — *заготовкой* (по ГОСТ 4693). Такая система калибров неприменима в черновых клетях (точнее, при стороне квадрата более

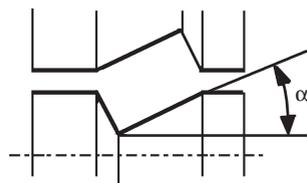


Рис. 11.4. Кантующая клетка

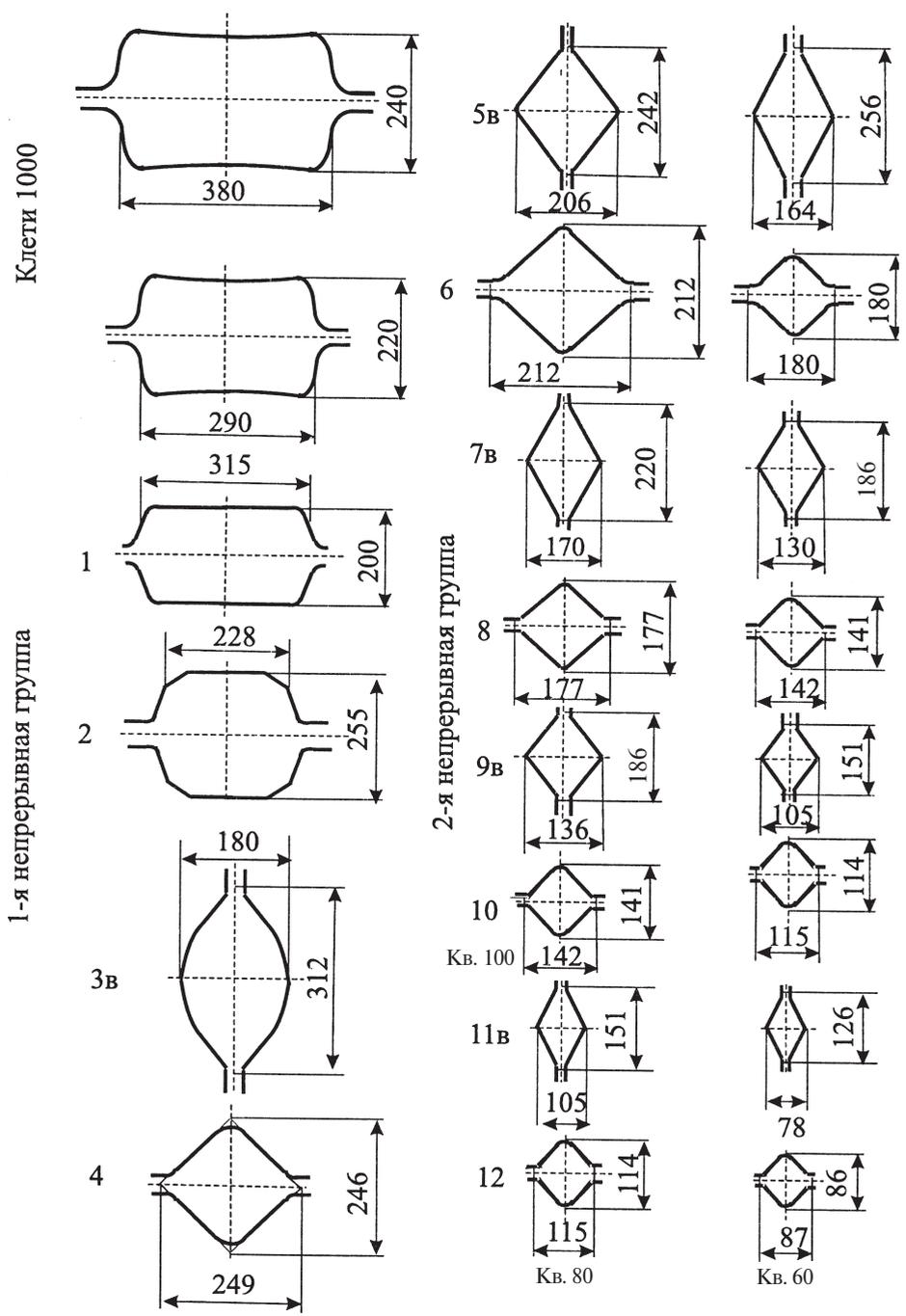


Рис. 11.5. Калибровка валков НЗС 900/700/500 ЧерМК (старый вариант)

170–175 мм), так как врез в валки становится большим и за счет концентрации напряжений резко ослабляется сечение валка.

В приведенной калибровке квадрат 175 мм (по диагонали 246 мм) также прокатывается в ромбическом калибре, и, чтобы сгладить переход от ящичной к ромбической системе, в клетях 2 и 3в нарезаны калибры системы ребровой овал — овал — квадрат (в которой ребровой овал выполнен в форме десятигранника, а овал по форме является чем-то средним между овалом и ромбом).

Система чистовых калибров рассчитывается так, чтобы из каждой четной клетки получалась квадратная заготовка по ГОСТ 4693: по одной ветви калибровки с размерами 150, 120, 100 и 80 мм и по другой — с размерами 120, 100, 80 и 60 мм. Некоторые заготовочные станы, в том числе рассматриваемый череповецкий, в настоящее время не прокатывают квадратную заготовку со стороной 60 и 80 мм, так как такая заготовка на современных мелкосортных и проволочных станах уже не применяется, хотя может быть еще востребована на более старых предприятиях и на мини-заводах.

Для трубных станов заготовку диаметром 80–220 мм также получают на НЗС. На таких станах после ряда ящичных калибров следует система калибров овал—круг, в которой каждый четный калибр способен выдавать товарный круг.

Ящичная система калибров на НЗС рассчитывается практически так же, как и на блюминге. Однако есть некоторые отличия.

1. Количество ящичных калибров на НЗС почти всегда задано конструкцией стана. Количество клетей, занятых ящичной системой, колеблется от четырех до восьми. Кроме того, оно всегда четное, поэтому по сторонам *V* и *H* количество пропусков одинаково, также одинаковы средние обжатия, и могут быть одинаковыми режимы обжатия. Эти обжатия необходимо проверить по максимальному углу захвата, допустимой силе прокатки и по моменту двигателя.

2. Так как на НЗС привод валков принципиально иной, чем на блюминге, то и методика проверки обжатий по моменту двигателя будет другой. На рис. 11.6 приведена общая схема индивидуального привода заготовочных, сортовых и листовых станов (кроме некоторых толстолистовых). Как видно, здесь оба валка приводятся от одного двигателя через шпиндели, шестеренную клеть и редуктор (последний может отсутствовать). На НЗС прокатка проводится в нереверсивном режиме, поэтому динамический момент отсутствует.

Статический момент

$$M = \frac{2M_{\text{пр}} + 2M_{\text{тр}}}{\eta i} + M_{\text{х.х}},$$

где 2 в числителе означает, что моменты от обоих валков передаются на один вал двигателя; *i* — передаточное отношение редуктора; η — коэффициент полезного действия привода, который равен произведению КПД всех передающих узлов шпинделя,

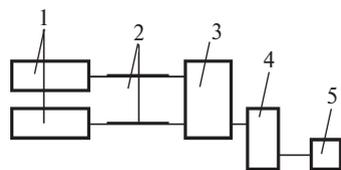


Рис. 11.6. Схема привода двух валков от одного двигателя:

1 — валки; 2 — шпиндели;
3 — шестеренная клеть;
4 — редуктор; 5 — двигатель

шестерен редуктора и шестеренной клетки; $\eta = \prod \eta_j$ (j — счетчик пар передаточных шестерен и узлов шпинделя); можно принять в каждой паре и узле $\eta_j = 0,98$.

Статический момент M не достигает отключающих значений, поскольку раньше наступает перегрев двигателя, поэтому для такого привода осуществляется проверка двигателя только по перегреву путем сравнения статического момента с номинальным: $M < M_n$.

11.3. Система резки заготовки на мерные длины

Для заготовочного стана проблема резки прокатанной полосы на мерные длины очень актуальна. Сортные станы потребляют заготовку определенной длины, потому что более длинная не помещается в нагревательных печах, а короткая застревает на некоторых участках раскатных полей стана, к тому же при короткой заготовке снижается производительность стана. Для типовых высокоскоростных непрерывных мелкосортных и проволочных станов, как правило, требуется заготовка длиной от 10,5 до 12,0 м. Для среднесортных станов длина заготовки обычно укладывается в пределы 4,5–6,0 м.

На блюминге после обрезки головной и донной частей никак не измерялись объем и длина здоровой части слитка, а она может колебаться в широких пределах. Возможность измерить длину полосы появляется только на НЗС. Здесь же можно построить систему автоматического раскроя ее на мерные длины, т. е. рассчитать количество целых кусков, каждый из которых укладывается в заданные пределы.

Система раскроя работает следующим образом. После второй клетки стана, где расстояние до следующей клетки больше длины полосы, на известном расстоянии L друг от друга установлены два ФЭП (фотоэлектрические пирометры), которые засвечиваются в момент прохождения перед ними горячего металла, и в электрической цепи этих приборов появляется ток. Времена t_1 и t_2 начала засветки обоих пирометров при прохождении переднего конца полосы фиксируются локальной счетно-решающей машиной. Она же вычисляет скорость прохождения полосы по рольгангу за второй клетью:

$$V = L / (t_2 - t_1).$$

Если зафиксировать также время t_3 окончания засветки первого пирометра, то вычисляется длина полосы после второй клетки:

$$L_2 = (t_3 - t_1) V.$$

По калибровке валков известны достаточно точно площади F_i после каждой i -й клетки, поэтому вычисляется длина полосы после 14-й клетки:

$$L_{14} = L_2 F_2 / F_{14}.$$

Пока полоса прокатывается в клетях 3–14, счетно-решающая машина успевает провести все приведенные расчеты, а также вычислить длину реза, которая обеспечивает безотходный раскрой. Она же подает сигнал на автоматическую установку упора ножниц на требуемое расстояние реза. Упор успевает занять расчетное положение к подходу прокатанной полосы.

11.4. Особенности прокатки и расчета режима обжатия на одноклетевых 3-валковых заготовочных станах

На многих заводах черной металлургии успешно работают старые заготовочные станы, которые по производительности резко уступают НЗС, но значительно дешевле последних, легко настраиваются и перестраиваются и способны выдавать заготовку более широкого сортамента, чем магистральные высокопроизводительные НЗС. В основном такие станы используются для прокатки заготовки из легированных марок стали небольшими партиями, прокатка которых на НЗС нецелесообразна.

Стан имеет одну или две отдельно стоящие 3-валковые клетки, каждая из которых приводится от отдельного сравнительно дешевого асинхронного двигателя переменного тока, вращающего валки с постоянной скоростью через редуктор и 3-валковую шестеренную клетку (рис. 11.7). Стан нереверсивный, однако позволяет проводить прокатку в реверсивном режиме: в одном направлении между верхним и средним валком (четные пропуски) и в другом — между средним и нижним валком (нечетные пропуски). При переходе с верхнего уровня прокатки на нижний (после каждого четного пропуска) осуществляется кантовка раската.

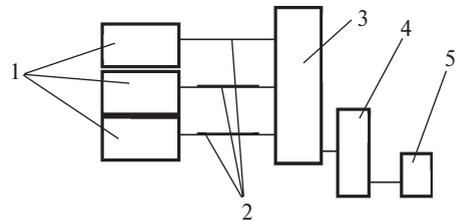


Рис. 11.7. Схема привода трехвалкового стана (обозначения см. на рис. 11.6)

Расстояние между валками устанавливается при настройке стана и не меняется при прокатке, поэтому режим обжатия полностью определяется калибровкой валков стана. Чтобы прокатка в калибрах проходила по расчетным и независимым режимам, верхний калибр не должен иметь общих ручьев с нижним калибром. Средний валок должен иметь ручьи для всех калибров, а верхний и нижний — только для четных или нечетных соответственно. Однако при такой нарезке калибров бочка валков используется нерационально, по ее длине уместается мало калибров. Чтобы исправить эти недостатки, применяют калибровку с совмещенными калибрами (рис. 11.8), когда ручей среднего валка является общим для верхнего и нижнего калибров. На рис. 11.9 приведена реальная калибровка одноклетевого заготовочного стана 750 с совмещенными калибрами.

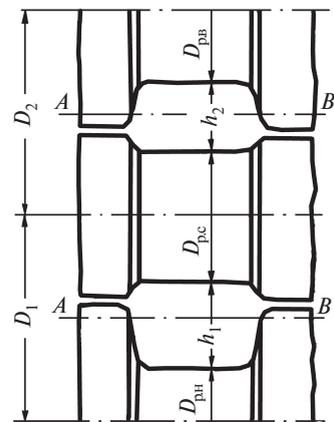


Рис. 11.8. Совмещенные калибры 3-валкового заготовочного стана

Рассмотрим особенности прокатки в паре совмещенных калибров (см. рис. 11.8). Первый пропуск производится в нижнем калибре, а затем без кантовки полоса передается в верхний калибр. Кантовка полосы осуществляется автоматически при падении заготовки с верхнего уровня (после четного пропуска) на нижний. Для этого на ее пути достаточно поставить некоторый упор-кантователь, на котором заготовка сама повернется на 90° .

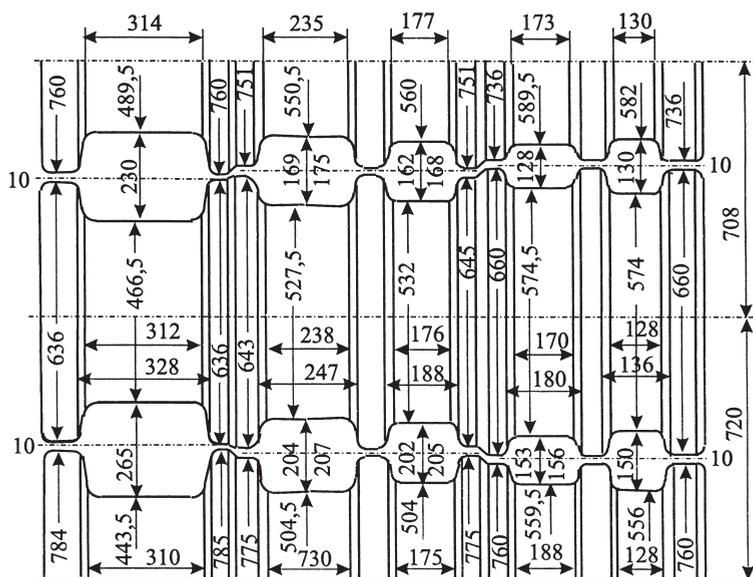


Рис. 11.9. Калибровка валков 3-валкового заготовочного стана 750

Обжатие в верхнем калибре

$$\Delta h = h_1 - h_2,$$

где h_1, h_2 — высоты нижнего и верхнего калибров.

Диаметры валков по дну калибров обозначим $D_{p.в}$, $D_{p.с}$ и $D_{p.н}$, а расстояния между осями нижней и верхней пары валков — D_1 и D_2 . Чтобы полоса выходила из валков прямолинейной, линейные скорости валков должны быть одинаковыми, поэтому должно выполняться равенство $D_{p.в} = D_{p.с} = D_{p.н}$. Диаметры всех валков по дну калибра должны быть одинаковыми. Известно, что именно в этом случае полоса редко бывает прямолинейной, поскольку, помимо скоростей, на прямолинейность влияют много других факторов: неравномерность температуры по сечению полосы, разное состояние поверхности и разный износ верхнего и нижнего ручьев калибра и т. д. Это приводит к тому, что одна полоса при прокатке может загнуться вверх, другая — вниз. Поэтому на всех станах диаметры верхних валков делают на 3–4 мм больше нижних (на более мелких сортовых станах подобное отклонение составляет 1–3 мм). В этом случае полоса при прокатке всегда стремится прижаться к нижней проводке арматуры стана, установленной на выходе из клетки, и выправляется за счет движения по проводке. Только на блюмингах нижний валок на 3–5 мм выше нижнего, чтобы полоса на выходе изгибалась вверх (в виде лыжины) и не ударяла по станинным роликам рольганга стана.

Пока будем считать $D_{p.в} = D_{p.с} = D_{p.н}$. Из чертежа следуют равенства

$$D_2 = D_{p.в}/2 + D_{p.с}/2 + h_2;$$

$$D_1 = D_{p.с}/2 + D_{p.н}/2 + h_1.$$

Вычтем из второго равенства первое, получим

$$D_1 - D_2 = (D_{p.н}/2 - D_{p.в}/2) + h_1 - h_2,$$

откуда

$$\Delta h = D_1 - D_2.$$

Обжатие в верхнем калибре равно разности расстояний между осевыми линиями нижних и верхних валков, которое определено конструкцией стана. Обжатие в верхнем (четном) пропуске совмещенных калибров нельзя назначать произвольно, оно задано конструкцией стана. И наоборот, при конструировании новых 3-валковых станов с совмещенными калибрами необходимо изготавливать шестеренные валки стана и соответственно расстояния D_1 и D_2 в соответствии с заранее рассчитанными оптимальными обжатиями в четных пропусках.

Глава 12

ДЕФЕКТЫ ЗАГОТОВКИ И ИХ УСТРАНЕНИЕ

12.1. Виды дефектов слитков и литой заготовки

При прокатке контроль качества металла должен осуществляться на всех технологических операциях, однако, как мы видели, на блюминге этого сделать не удастся. Только после прокатки на НЗС после остывания металла впервые предоставляется возможность провести контроль качества заготовки на наличие поверхностных и внутренних дефектов. На заготовке необходимо не только обнаружить, но и устранить дефекты. Любые затраты на ремонт заготовки практически всегда окупаются увеличением выхода годного в сортовом производстве. Ввиду большого объема прокатной продукции на крупном заводе трудно организовать сплошной контроль заготовки. Чаще всего здесь применяют выборочный контроль, поэтому есть вероятность пропустить часть проката с дефектами в сортопрокатное производство.

Дефекты бывают внутренними и наружными. Внутренние опасны тем, что трудно выявляются. При определенных условиях при прокатке они дробятся, утоняются, вытягиваются и закрываются, становясь неопасными, но чаще внутренние дефекты окисляются, выходят на поверхность и при прокате увеличиваются. Наружные дефекты опасны всегда, так как при прокатке не закрываются, поэтому их можно и нужно выявлять и устранять перед следующим переделом.

Традиционно все дефекты делят по происхождению: дефекты, которые возникают в результате несоблюдения или несовершенства технологии в сталеплавильных цехах, и дефекты, которые появляются в прокатном цехе. Деление это условно, так как некоторые дефекты сталеплавильного происхождения исправимы в прокатном цехе, и в появлении их на металле “виноваты” оба производства.

Рассмотрим некоторые типовые дефекты сталеплавильного передела.

Трещины

Трещины на поверхности слитка или литого бляма (сляба) являются следствием больших механических напряжений, возникающих при несвободной усадке в момент кристаллизации. Они возникают также при наличии примесей и неметаллических включений на поверхности, при быстром или неравномерном охлаждении слитков и литых слябов и т. д. “Горячие” трещины образуются обычно тогда, когда термические и механические деформации растяжения достигают 0,2–0,3 %, и на слитках и литых слябах многих марок стали мелкие трещины появляются всегда. Они могут располагаться вдоль, поперек или под углом к оси слитка, трещины всегда имеют сильно окисленные и обезуглероженные края. С увеличением углерода, хрома, серы, ниобия, отношения Mn/S, газовых примесей (например, азота) склонность стали к развитию трещин при разливке возрастает.

Разновидностью трещин следует считать *волосовины* — вытянутые вдоль проката мелкие прерывистые групповые трещины, выходящие на поверхность. Причиной их образования является наличие в слитках неметаллических включений, газовых подкорковых пузырей, выделившихся в результате снижения растворимости газов в металле или при использовании некачественной (густой) смазки изложниц. Волосовины опасны тем, что под окалиной на заготовке трудноопределимы. Тонкие и длинные, они могут быть легко пропущены при осмотре. На изломе образца металла видно, что волосовины могут быть очень глубокими.

Пузыри

На слитках и литых заготовках могут быть пузыри различного размера и располагаться в различных зонах. Причины их образования разнообразны. Наиболее распространены подкорковые пузыри и поверхностные пузыри-поры. Подкорковые пузыри располагаются поперек оси слитка в приповерхностных слоях. Причиной их образования является снижение растворимости газов — азота, кислорода и водорода — при понижении температуры металла до начала и в процессе его кристаллизации. В жидкой фазе перед фронтом кристаллизации интенсивно проходит также реакция окисления углерода. На оба процесса оказывает существенное влияние образование дендритов, затрудняющее перемешивание расплава и выделение пузырей газа. В газовых пузырях часто содержатся скопления неметаллических включений.

Главными причинами повышенной газонасыщенности жидкого металла являются попадание влаги в металл, сильный перегрев металла в печи, нарушение технологии раскисления, повышенная скорость разливки, неправильный подбор смазки изложниц и пр. Подкорковые пузыри характерны для кипящей стали при позднем кипении, особенно при высоком содержании марганца и хрома в ее составе. При прокатке газовые пузыри вытягиваются вдоль оси, образуя прерывистые несплошности, располагающиеся группами. Замечено, что с повышением содержания кремния в углеродистой стали размер микропор снижается.

Поверхностные поры при прокатке могут располагаться перпендикулярно направлению прокатки, они заполнены окалиной и частицами оксидов. Они образуются по тем же причинам, что и пузыри. При длительном нагреве слитков в колодцах корочка металла, отделяющая подкорковые пузыри от поверх-

ности, может прогореть (окислиться), и подкорковые пузыри и поры станут поверхностными.

Корочки

Корочки образуются при разливке слитков сифонным способом, когда зеркало металла открыто и имеет низкую температуру. В этом случае отдельные порции металла могут отделиться от основного металла и окислиться. Такие объемы будут плавать в основном металле, не соединяясь с ним. Затем они либо всплывают и уходят в прибыльную часть слитка, став неопасными, либо привариваются к краям изложницы и заливаются жидким металлом, образуя поверхностный дефект, глубоко уходящий внутрь тела слитка. Возможно также застревание корочки внутри слитка с образованием внутреннего дефекта под названием “темная корочка”. Обычно по границам корочки концентрируются окислы не только железа, но и других металлов (оксиды), здесь же могут быть различные неметаллические включения, газовые соединения. Края корочек обычно сильно обезуглерожены. После прокатки корочка частично располагается на поверхности, но рваными и окисленными краями может глубоко уходить внутрь заготовки. Такой дефект очень трудно устраняется. Также неустраима “темная корочка”.

Основными способами борьбы с корочками является увеличение температуры зеркала металла при разливке. Для каждой марки стали существует минимальная температура разливки, выше которой корочки маловероятны. Однако увеличение температуры разливки увеличивает склонность стали к трещинообразованию. Для уменьшения корочек полезно также увеличение скорости разливки, защита зеркала металла шлаком, чешуйками слюды (вермикулитом) или специальными смесями. Чем чище металл, тем меньше условий для образования корочек.

При непрерывной разливке стали также возможно образование корочек, поэтому струю металла следует защищать от окисления аргоном или азотом, а также с помощью огнеупорных трубок, устанавливаемых между деталями разливочного и промежуточного ковшей и кристаллизатора.

Плены

Плены образуются при разливке слитков сверху, когда металл разбрызгивается на стенки изложницы и застывает в виде окисленных поверхностных образований. При разливке сифоном плены образуются только в донной части слитка. Применение изложниц с кюмпельным дном, использование различных манжет и воронок, разливка со снижением кинетической энергии струи — короче, все, что уменьшает разбрызгивание металла при разливке, способствует уменьшению плен на поверхности слитков.

Расслой

Расслоем называется нарушение сплошности металла в осевой части слитка при неправильной отрезке головной части на блюминге. Усадочные дефекты, оставшиеся на здоровой части бьюма, при прокатке раскрываются, и слиток расслаивается на две части в разные стороны. Количество головной обрезки для каждого типа слитков определяется экспериментальным путем на основе накопления фактического статистического материала. Результат по статистике справедлив обычно для 95 % слитков. Около 5 % слитков могут содержать дефекты усадочной раковины, которые, возможно, приведут к расслою. При

большом объеме прокатываемого металла иногда выгоднее забраковать такие слитки, чем увеличивать норму обрезки головной части для всех слитков. Видимо, вычисление нормы обрезки для каждого типа слитков является оптимизационной технико-экономической задачей.

В современных сталеплавильных цехах все шире внедряются комплексные методы борьбы сразу с несколькими видами дефектов сталеплавильного происхождения. К ним следует отнести разливку металла под синтетическими шлаками, защиту струи инертными газами или вакуумирование струи при разливке. При непрерывной разливке электромагнитное перемешивание металла способствует снижению трещинообразования, уменьшает пористость и образование газовых пузырей, одновременно повышая пластичность металла при прокатке. Применяется очистка металла путем переплава его методами ЭШП (электрошлакового переплава) или ВДП (вакуумно-дугового переплава).

Флокены

Флокены образуются в сталеплавильном производстве, однако проявляются и предотвращаются в прокатном цехе. Причиной их образования является водород, растворимость которого резко снижается при снижении температуры металла. В жидком металле водорода может быть достаточно много, затем при кристаллизации он выделяется и скапливается в различных микропорах. Здесь он легко соединяется с углеродом металла, образуя метан CH_4 . Давление газа в микропоре резко возрастает, так как метан занимает больший объем, чем водород, размер микропор растет. Этот процесс протекает также при горячей прокатке и дальнейшем охлаждении металла. На готовом прокате флокены представляют собой мелкие внутренние трещины, никогда не выходящие на поверхность и имеющие в изломе округлую форму и светлую неокисленную поверхность. Флокены особенно опасны при циклическом нагружении деталей, изготовленных из этого металла, когда эти мелкие трещинки соединяются между собой в сплошные трещины.

На образование флокенов влияет содержание водорода в атмосфере плавильной печи. Они возникают тогда, когда содержание водорода превышает 2 см^2 на 100 г твердой стали. Кроме того, в стали должно быть достаточно большое содержание углерода. В низкоуглеродистых нелегированных сталях, а также в сталях аустенитного, ферритного, аустенитно-ферритного и полуферритного классов флокены не образуются никогда. Чаще всего флокены образуются в хромистых, хромоникелевых, хромокремнистых, хромоникельвольфрамовых, шарикоподшипниковых и подобных сталях. Часто появляются они в сталях мартенситного, бейнитного, трооститного типа, в легированных сталях перлитного класса. Среднеуглеродистые и высокоуглеродистые конструкционные стали также подвержены флокенообразованию.

Основными способами борьбы с флокенами является уменьшение содержания водорода в стали, например путем вакуумирования струи при разливке, и обеспечение условий для свободного выделения водорода из металла при его охлаждении. После прокатки флокеночувствительные стали подвергаются специальной антифлокенной обработке. Наиболее эффективно водород удаляется из металла при температурах $650\text{--}700 \text{ }^\circ\text{C}$ (для легированных конструкционных сталей), поэтому при этих температурах металл очень медленно охлаждают в отапливаемых печах или колодцах. Чем меньше сечение проката, тем меньше

он поражен флокенами, поэтому, как правило, антифлокенная обработка производится на заготовке, а не на готовом сортовом прокате. Крупносортные профили типа рельсов и пр., получаемые из слитков, также нуждаются в антифлокеной обработке.

12.2. Дефекты, возникающие при нагреве и прокатке

Дефекты металла, возникающие в прокатных цехах, многочисленны. Многие из них имеют одну и ту же природу, хотя выглядят по-разному. Мы рассмотрим основные дефекты, объединив под одним названием несколько их разновидностей. Условно все дефекты, рождающиеся в прокатном цехе, можно разделить на две группы: дефекты, связанные с неправильным нагревом металла под прокатку, и дефекты, возникающие непосредственно при прокатке или охлаждении металла после прокатки.

12.2.1. Дефекты, возникающие при неправильном нагреве

Перегрев и пережог. На поверхности проката они выглядят иногда как разрывы в виде раковин, рванин клиновидной формы, достигающие иногда крупных размеров. При небольшой степени перегрева дефект имеет вид мелкой сетки трещин, поражающих все грани или отдельные места готовых блюмов. При прокатке сетка трещин отслаивается в виде чешуек, поэтому такой брак называется также *чешуйчатостью*.

Склонность металла к перегреву и пережогу растет с увеличением содержания углерода и легирования стали легкоокисляющимися элементами. Для сталей, легированных никелем, марганцем и медью при прокатке перегретых слитков, характерна более глубокая сетка трещин, называемая сеткой разгара.

Причиной пережога является окисление металла по границам зерен в результате высокой температуры нагрева. При длительном пережоге зерна металла окисляются не только на поверхности, но и в глубине слитка, поэтому он рассыпается в колодце или в валках стана. Пережженные слитки восстановлению не подлежат.

Перегрев происходит при длительном пребывании металла при высоких (но правильно выбранных) температурах, при которых успевает вырасти зерно, отчего пластичность металла снижается, на поверхности слитка при прокатке появляются дополнительные растягивающие напряжения, приводящие к поверхностным трещинам. Перегрев можно устранить, если металл до прокатки охладить до температуры начала рекристаллизации (примерно 700–750 °С), за счет перекристаллизации можно получить новые мелкие зерна металла, затем снова нагреть его по технологической инструкции.

Окисление и обезуглероживание. Высокотемпературный нагрев металла в обычной атмосфере печи вызывает интенсивное развитие газовой коррозии на поверхности, результатом которой является окалинообразование и обеднение поверхностных слоев углеродом (обезуглероживание). Слой окалины на поверхности слитка сам по себе еще не является дефектом, так как при про-

катке он легко удаляется гидросбивом — системой сопел, подающих струи воды под давлением до 150 атм. Однако на готовом прокате, особенно в трещинах, окалина может сохраниться. При прокатке возможно вдавливание кусочков окалины в основной металл, отчего образуются различные по названию виды брака (например, “рябизна”, “мазки” и пр.). При большом слое окалины на кислых сталях возможен выход на поверхность подкорковых газовых пузырей с образованием поверхностных трещин при прокатке.

Если в атмосфере печи содержится свободный кислород, углекислота, водород и водяные пары, то углерод металла, диффундируя из глубинных слоев к поверхности, вступает в реакцию с ними, отчего поверхностный слой металла обезуглероживается. Особенно нежелательно обезуглероживание для инструментальных сталей, для которых обезуглероженный слой может повлиять на свойства режущей кромки готового инструмента.

Процессы окисления и обезуглероживания протекают одновременно, поэтому окончательная толщина обезуглероженного слоя зависит от соотношения скоростей протекания этих процессов. В качестве меры борьбы с обезуглероживанием можно предложить наведение окислительной атмосферы в печи, что приведет к увеличению скорости окисления. На поверхности проката появится толстый слой окалины, но обезуглероженный слой образоваться не успеет.

На скорость протекания обоих процессов оказывают влияние температура, состав, давление газов в печи, режим нагрева, особенно химический и фазовый состав поверхностных слоев нагреваемой стали. С увеличением углерода снижаются и скорость окисления, и скорость обезуглероживания в связи с интенсивным образованием защитного слоя из окиси углерода. Трудно предупредить обезуглероживание среднеуглеродистых сталей (0,3–0,7 %). Сера, фосфор, марганец, никель практически не изменяют скорость окисления, а титан, медь, кобальт заметно ее снижают. Очень сильно замедляют окисление хром, алюминий и кремний, образуя защитные пленки на поверхности. Наоборот, ванадий, вольфрам и молибден образуют легкоплавкие и летучие оксиды, поэтому способны заметно ускорить окисление стали. При высоких температурах более устойчивы к окислению однородные однофазные стали (аустенит с полным растворением в нем других составляющих), чем двухфазные, в связи с тем что неоднородные пленки оксидов быстрее разрушаются. Также можно разрушить защитные пленки при быстром или неравномерном нагреве металла.

Скорость обезуглероживания в значительной степени зависит от диффузии углерода в поверхностные слои металла, поэтому карбидообразующие элементы (хром, ванадий, молибден, марганец и др.), связывая атомы углерода, снижают их подвижность и препятствуют диффузии. Стали, содержащие несколько легирующих элементов, обезуглероживаются значительно меньше, чем углеродистые (У7–У13). Чтобы не допустить или сократить одновременно окисление и обезуглероживание металла, легированные марки стали часто нагревают по ускоренным режимам в защитных атмосферах. Иногда используют различные защитные обмазки, которые при деформации служат также смазками.

Рванины и трещины. При ускоренном или неравномерном нагреве металла возможны большие термические напряжения, которые могут привести к раз-

рушению металла, особенно в условиях пониженной пластичности (например, при фазовых превращениях, при структурной неоднородности и пр.). Особенно склонны к термическим трещинам слитки средне- и высокоуглеродистых марок стали (ШХ15, У13, 30ХГСА и др.). Такие трещины могут быть большими и грубыми (“скворечники” в виде широко раскрытых полостей, “надрывы” поверхностных слоев и пр.) или сравнительно неглубокими и мелкими, часто расположенными по границам зерен.

Склонность стали к термическим трещинам резко возрастает при наличии в стали неметаллических включений, при “выпотевании” на поверхности легкоплавких фаз и хрупких пленок, при наличии других поверхностных дефектов, плохом качестве поверхности слитка и т. п.

12.2.2. Дефекты, возникающие при горячей деформации

Деформационные трещины (рванины). Надрывы поверхности различной глубины концентрируются обычно у ребер прокатываемого профиля и располагаются перпендикулярно его оси. Они образуются при превышении рекомендованных обжатий, низкой или неравномерной температуре металла при прокатке, в зонах, пораженных различными дефектами слитка, описанными выше. Деформационные напряжения в зоне разрушения обычно опасны на трещиночувствительных, легированных и высокоуглеродистых марках стали, имеющих сравнительно узкий температурный интервал пластичности.

Плены. Прокатные плены имеют вид отслоений в форме языков, односторонне соединенных с основным металлом и отделенных от него слоем окалины. Они образуются вследствие раскатки рванин и трещин, следов насечки на валках блюминга и пр.

Усы и закаты. При переполнении калибров при прокатке по всей длине раската в плоскости разъема валков образуются “усы” или лампасы, которые после кантовки полосы превращаются в закаты. Закаты не соединяются с основным металлом, так как окислены. Они плохо заметны на готовом прокате, имеют вид тупой трещины, уходящей внутрь металла под острым углом к поверхности и проходящей по всей длине раската. Такой дефект возникает при неправильной калибровке валков, при задаче в валки “перекошенных” полос, при нарушении режимов прокатки.

С неправильной калибровкой и нарушением режимов деформации связан также дефект, который называется “морщины”. В ящичном калибре морщины образуются по неизбежной стороне раската, когда боковые стенки калибра плохо прорабатывают металл, а обжатия по основным граням велики. После кантовки образовавшиеся морщины могут не распрямиться, заполниться окалиной и сохраниться на готовом прокате. При прокатке заготовки в ромбических и квадратных калибрах морщины образуются в углах профиля, располагаясь в зоне разъема валков в виде неглубоких закатов по всей длине заготовки или на отдельных участках.

Риски, царапины, подрезы. Эта группа дефектов связана с неисправностью оборудования, проводок, роликов рольгангов, с неправильной настройкой калибров валков. При смещении верхнего ручья калибра относительно

нижнего возможны не только подрезы металла, но и нарушение геометрии профиля, что связано с большой группой так называемых геометрических дефектов профиля.

12.3. Методы обнаружения дефектов

Качество проката, в частности заготовки, регламентируется соответствующими ГОСТами и ТУ, которые содержат несколько групп показателей, оценивающих:

1) химический и фазовый состав металла (микро- и макроструктура, вид карбидных включений, характер обезуглероженной зоны и пр.);

2) геометрические характеристики (точность, допуски, разнотолщинность и пр.);

3) требования к поверхности (допускаемые границы поверхностных дефектов, состояние поверхности, наличие окалины, шероховатость и т. д.);

4) физико-химические требования к металлу (электрические, магнитные и прочие свойства).

На всех металлургических заводах проходит процесс внедрения международной системы управления качеством продукции на базе ИСО 9000, которая описана выше.

Контроль качества продукции развивается в двух направлениях. С одной стороны, важно контролировать качество уже произведенной продукции, механизировать и автоматизировать адъюстажные работы по выявлению дефектов и ремонту готового проката. С другой стороны, необходимо стремиться к тому, чтобы на адъюстаж поступала только годная продукция. Необходимо увеличивать затраты не столько на средства контроля и ремонт некачественного проката, сколько на контроль всех технологических операций, выявление и устранение причин появления дефектов на всех стадиях производства металла. По второму пути идет развитие средств контроля во всех видах производства, в том числе в металлургии, хотя доля адъюстажного контроля здесь еще очень велика. Например, в Японии за счет внедрения в металлургию новейших технологий и благодаря крупным затратам в средства контроля и регулирования технологических операций выход годного стального проката достигает 90 %, тогда как в США он равен 75 %. Однако одностороннее развитие только средств управления технологией ведет к существенному удорожанию готовой продукции, поэтому существует оптимальное соотношение между двумя описанными тенденциями. В той же Японии вкладывают значительные средства в механизацию и автоматизацию адъюстажных работ. В некоторых производствах, например в часовой промышленности, бесполезно проверять качество часов на выходе, если не организовать 100 %-ный контроль технологии их изготовления, но в металлургии оба направления будут сосуществовать, видимо, всегда.

Рассмотрим основные методы контроля дефектов заготовки после ее охлаждения.

Главным остается *визуальный* метод, с помощью которого можно определять поверхностные дефекты. Чтобы дефекты были видны невооруженным глазом, заготовку перед осмотром зачищают от окалины в форме змейки наждач-

ным кругом. Если для оценки используются оптические приборы, то метод становится *визуально-оптическим*. Эти методы обнаружения дефектов наиболее просты и доступны. Человеческий глаз, особенно вооруженный освещающими и увеличительными приборами, способен различать самые мельчайшие дефекты. Однако субъективность и низкая производительность не обеспечивают требуемой достоверности таких методов контроля. Тем не менее они очень распространены на металлургических заводах, особенно при небольших объемах производства.

После выявления дефектов следует их устранение. Дефектное место удаляют либо с помощью газовой горелки, либо наждачным или шлифовальным кругом. Газовая горелка применима на простых низкоуглеродистых марках стали, когда термические напряжения от местного перегрева неопасны. Высокоуглеродистые, легированные и высоколегированные марки стали зачищают на шлифовальных станках, однако на некоторых марках местный разогрев при шлифовке может привести к появлению шлифовочных трещин, поэтому их зачищают на разогретой заготовке. Для этой же цели пригодны фрезерные установки. Все существующие способы зачистки металла от поверхностных дефектов различаются степенью механизации и автоматизации применяемого оборудования — от ручных до автоматизированных, управляемых от ЭВМ станков.

12.3.1. Магнитные методы контроля

Среди объективных необходимо выделить группу *магнитных методов контроля*. Они основаны на обнаружении поля рассеяния магнитных полей, возникающего вблизи дефекта, с помощью чувствительных индикаторов, взаимодействующих с магнитным полем. В зависимости от типа применяемых индикаторов существует несколько таких методов.

Одним из самых распространенных является *магнитно-порошковый* метод, в котором индикатором служит магнитный порошок. Метод характеризуется высокой чувствительностью, повышенной производительностью и простой технологией. Он позволяет выявлять поверхностные несплошности шириной от 2,5 мкм и выше в виде волосовин, трещин, расслоений, закатов и т. п. Важно, что таким методом удается выявить дефекты не только на гранях, но и на ребрах профиля, хотя на ребрах напряженность магнитного поля слабее, чем в центре грани, примерно в четыре раза.

Принцип работы метода основан на том, что частицы порошка под действием электрического поля намагничиваются и притягиваются, накапливаясь в зоне наибольшей неоднородности магнитного поля в поле дефекта. Магнитные порошки наносят на поверхность проката либо путем распыления, либо мокрым методом с использованием порошковых суспензий. Второй способ обеспечивает более высокую чувствительность. В ряде случаев применяют люминисцентные (светящиеся) порошки, дающие контрастные изображения в затемненном помещении и в свете ультрафиолетовых ламп. Совершенствуются также методы фиксации скоплений порошка путем применения электронных и телевизионных систем. Метод, естественно, работает хорошо на чистом металле, свободном от окалины, на металле с окалиной можно обнаруживать только крупные дефекты. В связи с этим ведутся работы как по совершенство-

ванию методов зачистки металла перед испытанием, так и по созданию более чувствительных магнитных суспензий, позволяющих контролировать незачищенный металл. На рис. 12.1 представлена схема шведской установки Centrotest, в которой реализован мокрый магнитно-порошковый метод контроля дефектов. Имея два модуля, она позволяет просматривать одновременно две стороны заготовки.

Заготовка 1 с загрузочного устройства поступает на модули 3, где намагничивается и опрыскивается водной ферромагнитной суспензией. Линия контроля выполнена в трех вариантах:

ручном, когда дефекты отмечаются контролером вручную в ультрафиолетовом свете;

с автоматической отметкой дефектов с помощью краскоотметчиков;

с автоматическим вычислением координат размещения дефектов, которые используются при автоматическом управлении шлифовальным станком, устраняющим дефекты с помощью шлифовального круга.

Фирма Kobe Steel (Япония) разработала дефектоскоп, в котором используется магнитно-люминисцентный метод, а для автоматического считывания дефектов — высокочувствительные телекамеры (рис. 12.2). Устройство намагничивания 7 создает магнитное поле и следит за положением заготовки на стеллаже. Суспензия с порошком наносится форсункой 6. Светящиеся в ультрафиолетовом свете 5 валики порошка на дефектах распознаются высокочувствительными телекамерами 4. Блоки 1–3 преобразуют видеосигнал в цифровую форму и записывают его в память микро-ЭВМ, которая после

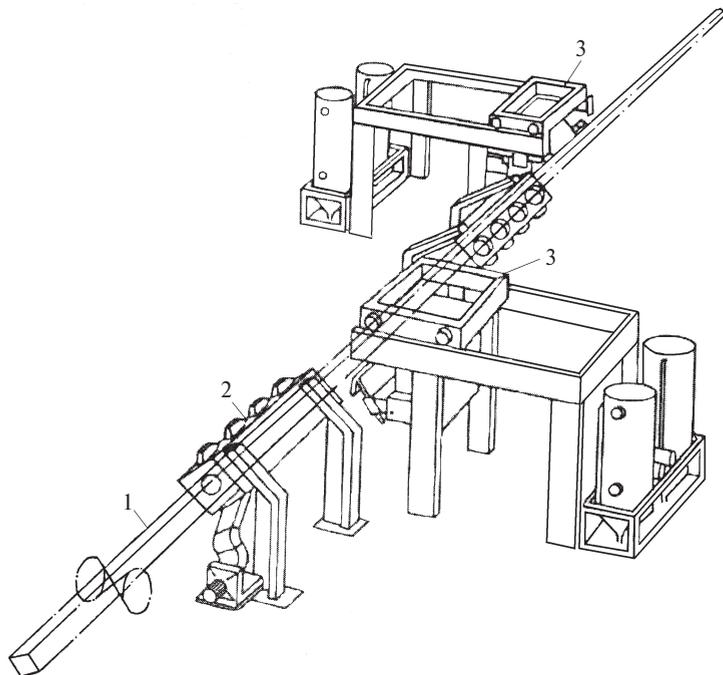


Рис. 12.1. Установка Centrotest (Швеция)

соответствующей обработки передает эти данные на устройство управления дефектоотметчиками, распыляющими краску в места дефектов. Описанный дефектоскоп вмонтирован в агрегатную линию, вторая часть которой содержит три фрезерных агрегата с четырьмя фрезами каждый (по каждой стороне заготовки), снабженными кантователями. Агрегатная линия полностью автоматизирована и работает надежнее, чем описанная выше магнитно-порошковая установка.

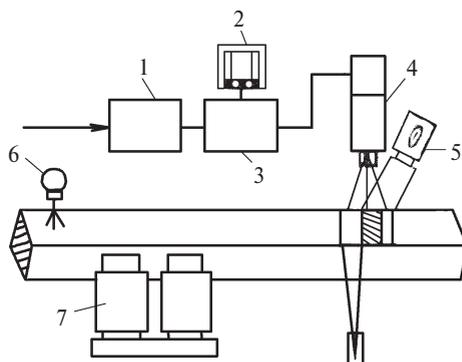


Рис. 12.2. Дефектоскоп фирмы Kobe Steel

Другой разновидностью магнитного метода является *магнитографический*, заключающийся в намагничивании металла и записи полей рассеивания на магнитный носитель. Таким способом удастся записать дефекты глубиной 0,3 мм и выше при высоте неровностей на поверхности металла не выше 0,10–0,15 мм. Окалина снижает чувствительность метода на 25–30 %.

Рассмотрим схему магнитографического устройства (рис. 12.3) для контроля дефектов на заготовках сечением от 70×70 до 200×200 мм со скоростью контроля 0,5 м/с. Магнитная лента 4 предварительно намагничивается до насыщения, а затем вводится в контакт с контролируемой, предварительно зачищенной от окалины заготовкой 1, намагниченной переменным полем в направлении, перпендикулярном поверхности ленты. Затем сигналы усиливаются и с помощью пороговых триггеров классифицируются в целях выде-

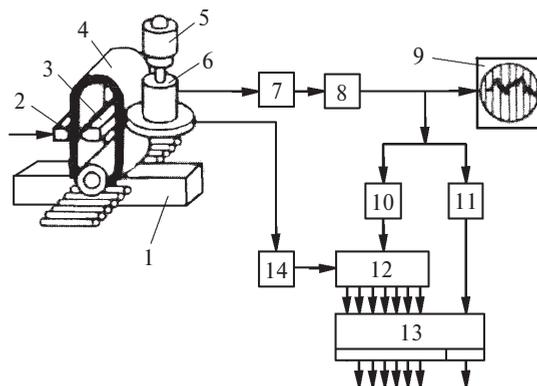


Рис. 12.3. Схема магнитографической установки с намагничиванием переменным током:

- 1 — заготовка; 2 — блок намагничивания заготовки;
- 3 — блок стирания записи; 4 — магнитная лента;
- 5 — двигатель головки; 6 — головка съема сигнала;
- 7 — усилитель; 8 — фильтр; 9 — осциллоскоп; 10,
- 11 — пороговые триггеры; 12 — переключатель;
- 13 — дефектоотметчики; 14 — усилитель

ления крупных и мелких дефектов. Для визуального просмотра дефектов установлен осциллоскоп. Семь дефектоотметчиков маркируют дефекты разными красками.

В *феррозондном* методе магнитные поля фиксируются с помощью феррозонда — преобразователя напряженности магнитного поля в электрический сигнал. Феррозонды имеют разную конструкцию, простейший представляет собой сердечник из магнитно-мягкого материала с намотанными на него обмотками возбуждения и измерения. Более сложны в изготовлении, но более просты в управлении преобразователи, работающие на использовании эффекта Холла, возникающего под действием силы Лоренца при взаимодействии магнитного поля с током, протекающим по проводнику. Применяются также более простые магнитодиодные преобразователи, в которых используется эффект Гаусса — изменение электрического сопротивления проводника (или полупроводника) при помещении его в магнитное поле.

Таким образом, все магнитно-порошковые методы контроля дефектов предусматривают выполнение следующих технологических операций: подготовка поверхности металла, намагничивание проката, нанесение магнитных порошков или суспензий, осмотр или иная фиксация дефектов и разбраковка проката. В конце обязательно производится размагничивание годного проката. Метод применим только для контроля металла, способного намагничиваться. Кроме того, он не позволяет дифференцировать дефекты по глубине, не дает возможности регулировать чувствительность. Поэтому идут поиски других методов.

12.3.2. Вихрековые методы контроля

Вихревые методы контроля основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в поверхностном слое контролируемого металла. Катушку при работе накладывают на заготовку или заготовку располагают между двумя катушками (возбуждающей и измерительной). Так различаются метод накладной катушки от экранного метода.

Вихревые токи — это замкнутые токи, индуцированные в проводящей среде изменяющимся магнитным полем. Если через катушку пропускать ток определенной частоты, то магнитное поле катушки возбуждает в испытуемом металле вихревые токи, поля которых оказывают воздействие на поле катушки. Появление трещины на металле вызывает искажение или даже разрыв поля вихревых токов, изменяется характер взаимодействия индуцированного поля и поля катушки, которое требуется зафиксировать и расшифровать.

Метод вихревых токов позволяет обнаружить как поверхностные, так и подповерхностные дефекты, с его помощью удастся выявить малораскрытые трещины, покрытые “мостиками”. Однако метод не столь нагляден, как группа предыдущих. На обычной стали из-за ее высокой магнитной неоднородности он может давать искаженные результаты, поэтому чаще всего применяется для контроля заготовок из немагнитных материалов.

Чувствительность метода практически целиком зависит от конструкции катушки индуктивности (датчика). В процессе работы датчик перемещается по

поверхности изделия, при этом прежде наведенные вихревые токи исчезают, и новые токи появляются только в месте расположения датчика. Они в основном концентрируются в поверхностных слоях и ослабевают по мере заглубления в металл. Глубина проникновения вихревых токов — расстояние от поверхности, на котором плотность вихревых токов уменьшается в e раз (e — основание натурального логарифма), — определяет ту максимальную глубину залегания дефектов, на которой они определяются. Чем выше электропроводность материала и частота возбуждения, тем больше глубина выявляемых дефектов. Меняя частоту, можно оценить характер распределения дефектов по глубине.

Метод вихревых токов очень чувствителен к различным мешающим факторам (расстояние датчика от поверхности, неоднородность магнитных свойств металла, форма и чистота поверхности металла и т. д.), поэтому большинство исследований и конструктивных решений ведется в направлении стабилизации и надежности метода. Его применяют также в сочетании с другими методами.

12.3.3. Тепловые методы контроля

Температура поверхностных слоев горячего металла при остывании различна на дефектных и бездефектных участках за счет разной их теплопроводности. Современная аппаратура позволяет уловить очень небольшое отличие в температуре этих участков и классифицировать дефекты поверхностных и подповерхностных слоев. Можно организовать непрерывный и дистанционный контроль тепловой картины в потоке металла. Такой метод применяется при контроле качества катаных заготовок и непрерывно-литых слябов.

Однако горячий контроль металла из-за окалины не очень эффективен, многие внешние факторы снижают чувствительность метода. В отличие от описанного пассивного метода контроля более высокую разрешающую способность имеет активный метод теплового контроля. Здесь, наоборот, холодную заготовку на контрольном стеллаже разогревают и по разности свечения определяют поверхностные дефекты. Тепловая картина поверхностных слоев будет обратной, чем при охлаждении. Наибольшее распространение получили быстрые методы нагрева с использованием сканирующего источника тепла.

Возможности тепловых методов во многом определяются средствами оценки температурных полей. Особенно широко применяют оптические сканирующие системы, позволяющие выполнить поэлементный обзор металла. Мгновенное изображение, полученное примерно с площади 1 мм^2 , преобразуется в электрический сигнал, который затем усиливается и преобразуется в двухмерную картину теплового поля участка, высвечиваемую для визуального наблюдения на большом экране. Для повышения разрешающей способности метода применяют термочувствительные покрытия обычно светло-желтых тонов, наносимые на холодный металл распылением или накаткой. При нагреве всего до $50\text{--}70 \text{ }^\circ\text{C}$ при осмотре в ультрафиолетовых лучах выявляются эффекты изменения цвета на дефектных участках. Разработаны также индикаторные суспензии, образующие на поверхности металла термоиндикаторные покрытия, изменяющие цвет при температурах до $150\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$. Такие покрытия позволяют выяв-

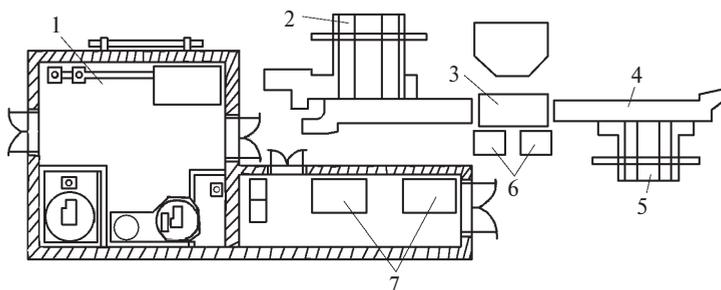


Рис. 12.4. Размещение термоцветовой дефектоскопической установки:

- 1 — участок приготовления и хранения индикаторной суспензии;
 2 — загрузочное устройство; 3 — блок термоцветовой дефектоскопии;
 4 — транспортный ролик; 5 — разгрузочное устройство;
 6 — блоки нагревательных контуров; 7 — высокочастотные генераторы

лять закаты и плены глубиной 0,2 мм и поверхностные трещины глубиной 0,4 мм с минимальным раскрытием 10 мм. На рис. 12.4 приведена схема расположения оборудования установки термоцветовой дефектоскопии с нанесением на поверхность заготовки термочувствительной суспензии и нагревом ее поверхности токами высокой частоты.

12.3.4. Электромагнитно-тепловые методы контроля

Электромагнитно-тепловой метод также основан на фиксации тепловых полей в поверхностных слоях металла, однако физические основы его иные, чем в описанных тепловых методах. Здесь холодная прокатанная заготовка проходит с постоянной скоростью через высокочастотный индуктор. В поверхностных слоях индуцируются токи, которые равномерно разогревают здоровый поверхностный слой, но в результате концентрации тока на дефектах и удлинения пути прохождения тока на трещинах дефектные участки разогреваются больше. Одним из главных параметров, определяющим эффективность контроля, является глубина проникновения тока в металл, которая в основном зависит от частоты тока индуктора. Чем выше частота, тем меньше толщина прогреваемого слоя и выше чувствительность к поверхностным дефектам. При частоте тока 44–66 кГц минимальная глубина выявляемых дефектов составляет 0,2–0,4 мм, при частоте 440 кГц выявляются дефекты на глубине до 0,15–0,20 мм, но возможность определения более мелких дефектов возрастает. Возможна настройка частоты на заданную глубину выявляемых дефектов.

Чувствительность метода возрастает, если предварительно на поверхность металла нанести индикаторное покрытие в виде суспензии, цвет которого в зависимости от степени нагрева изменяется от белого до темно-коричневого. Считывая картину распределения цвета по поверхности, можно контролировать дефекты на глубине 1–2 мм. Главное достоинство термоцветных методов считывания информации состоит в том, что они позволяют определять дефекты без удаления окалины на заготовке, причем дефекты на гранях и ребрах выявляются с равной чувствительностью.

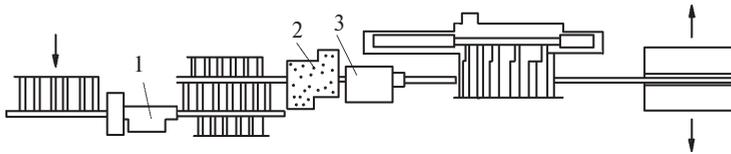


Рис. 12.5. Адьюстажная линия для контроля квадратной заготовки и сортового металла

На рис. 12.5 приведена схема норвежской установки Therm-O Matik, встроенной в адьюстажную линию, на которой реализован электромагнитно-тепловой метод контроля.

После правки на роликоправильной машине 1 заготовка или сортовой металл подвергаются дробеструйной очистке от окалины 2 и поступает на дефектоскоп 3. Сам дефектоскоп представляет собой набор агрегатов, на которых выполняются следующие операции: после смачивания поверхности и нанесения термочувствительной суспензии заготовка поступает в индукционный нагреватель. Четыре радиометра фиксируют тепловую картину поверхности, которая затем обрабатывается с помощью ЭВМ, расшифровывается и фиксируется; эта информация является исходной для управления работой пистолетов-краскораспылителей, накладывающих краску на дефектные участки. Результаты контроля выдаются на печать. Дефектоскоп обслуживается одним оператором с пульта управления.

Распределение температуры по поверхности можно зафиксировать также с помощью сканирующих инфракрасных камер (радиометров), показания которых обрабатываются с помощью ЭВМ. Однако технически это сложнее, чем считывание цветовой картины при использовании термоиндикаторных покрытий.

Все перечисленные методы контроля заготовки отличаются общим недостатком: они применяются уже на конечной стадии производства заготовки, тогда как необходимо выявлять дефекты на самых ранних стадиях, т. е. в процессе прокатки на блюминге и НЗС или непосредственно перед посадкой слитков в колодец. При этом температура поверхности металла лежит в пределах 700–1000 °С. В настоящее время еще нет надежных приборов для контроля дефектов при таких температурах. Однако работы в этом направлении интенсивно ведутся, и значительные успехи уже достигнуты, особенно в Японии и Швеции. В основном для этой цели применяют оптический, тепловой и электромагнитный методы обнаружения дефектов. Наиболее распространены оптические методы. Они основаны на том, что на поверхности горячего металла такие дефекты, как завороты, корочки, заливины, темнее, а трещины ярче, чем бездефектные участки. В момент прокатки, когда окалина сбивается водой высокого давления, различие в яркости участков можно записать с помощью телевизионной установки. По окончании прокатки из-за появления вторичной окалины яркость практически выравнивается.

На рис. 12.6 представлена система цветного телевизионного сканирования поверхности горя-

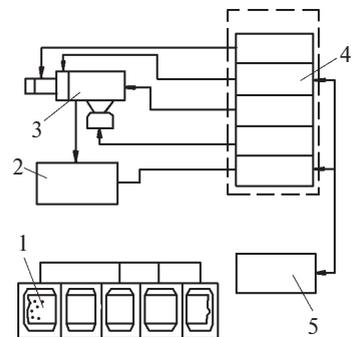


Рис. 12.6. Схема телевизионного изображения поверхности горячего изображения поверхности сляба

чего сляба, разработанная в Японии. Система состоит из цветной телевизионной камеры с механическим затвором 3, регистрирующего устройства на видеодиске 2, цветных мониторов 1 для наблюдений и управляющего устройства 4. Положение сляба фиксируется счетчиками 5. Оператор рассматривает на экране увеличенное цветное изображение сляба. Система позволяет обнаруживать раковины диаметром более 50 мм, трещины глубиной более 4 мм и протяженностью более 100 мм. Неглубокие трещины не выявляются ввиду низкого контраста изображения. Короткие дефекты также не видны из-за низкой разрешающей способности цветного телевизионного сигнала. В целях увеличения разрешающей способности японская фирма Nippon Steel применила лазерный сканирующий луч диаметром 0,1–0,2 мм, в результате чего при температуре сляба 900 °С при скорости движения 15–22 мм/с удалось зарегистрировать трещины шириной более 0,3 мм.

12.3.5. Ультразвуковые методы контроля

В основе ультразвуковых методов контроля лежит взаимодействие ультразвуковых колебаний, наводимых в металле, с микротрещинами. Чем больше частота ультразвуковых колебаний, тем меньше глубина их проникновения внутрь металла. На заданной глубине, отражаясь от дефекта, ультразвуковые колебания возвращаются и улавливаются специальной головкой. Таким образом, меняя частоту колебаний, можно “прослушать” металл на разном расстоянии от поверхности металла и записать дефектограмму каждой заготовки, которая часто служит паспортом этой заготовки, сопровождающим ее при последующей обработке. На холодном металле ультразвуковые головки часто применяются в переносном варианте. В этом случае прибор представляет собой легкий портативный ранец с источником ультразвуковых колебаний и датчик-улавливатель, который можно вручную перемещать по заготовке, фиксируя дефекты на разной глубине и в разных частях заготовки.

Недостатком метода является практически обязательная зачистка металла от окалины перед контролем, хотя имеются стационарные ультразвуковые установки, способные прозвучивать дефекты на металле, покрытом небольшим слоем окалины.

Глава 13

ПРОИЗВОДСТВО СОРТОВОГО МЕТАЛЛА

13.1. Сортопрокатные станы

Прокатные станы по назначению можно разделить на две группы: общего назначения, производящие сортовую продукцию широкого сортамента для всех отраслей машиностроения и строительства; станы специализированные, предназначенные для производства сортового металла сравнительно узкого, специализированного сортамента, используемого только в отдельных отраслях промышленности.

Станы общего назначения, в свою очередь, по сортаменту бывают:

крупносортными, производящими крупные круги диаметром выше 50 мм, равновеликие по площади поперечного сечения квадраты, уголки, полосы, швеллеры и другие профили, специализированные и общего назначения;

среднесортными, в сортамент которых входят круглые профили от 30 до 50 мм, и равновеликие по площади другие профили;

мелкосортными, производящими круглый прокат диаметром от 10 до 30 мм, и другие равновеликие профили; к этой же группе иногда относят специализированные проволочные станы, производящие круглый покат (катанку) диаметром 5,0–8,0 мм.

Заметим, что границы разделения профилей между станами приблизительно. Понятно, что при существующей системе сдачи продукции в тоннаже, на каждом стане выгодно прокатывать профили более тяжелые, чем мелкие, поэтому верхние границы профилеразмеров часто переходят на более мелкие станы. С другой стороны, потребности промышленности некоего конкретного региона могут потребовать пересмотреть также нижние границы типоразмеров стана.

Станы второй группы, предназначенные для производства более узкой и специализированной продукции, как правило, характеризуются их названием: рельсо-балочные, выпускающие кроме рельсов и балок другие крупные сортовые простые и сложные профили;

полосовые или штрипсовые, производящие полосу (штрипс) для трубо-сварочных станов;

проволочные (напомним, что проволочные станы производят не проволоку, а **катанку**, которая служит заготовкой для производства проволоки волочением).

Сортовые станы достаточно полно характеризуются диаметром валков. По диаметру можно определить примерные габариты стана, мощности привода его клетей, технологические возможности и многое другое. Поэтому диаметр валков последней клетки стана (с округлением) определяет его название. Станы 900–500 относятся к крупносортным, 550–300 — к среднесортным и 330–250 — к мелкосортным станам. Проволочные станы имеют диаметр валков последних клетей в пределах 150–280 мм.

Как видно, диапазон изменения диаметров валков на станах перекрывается. Имеется только одно исключение из правила: стан 450 Западно-Сибирского металлургического комбината назван так по сортаменту производимой продукции, характерному для среднесортных станов, хотя последняя клеть его имеет диаметр 630 мм, и стан должен был бы называться крупносортным станом 600.

Прокатные станы классифицируют также по типу расположения оборудования. От этого зависят его технологические возможности. Рассмотрим основные типы станов.

На рис. 13.1 представлена схема расположения оборудования типового крупносортного стана 550 последовательного типа (диаметр валков черновых клетей 650 мм, чистовых — 570 мм). На нем прокатывают круглую сталь диаметром 50–105 мм, квадраты со стороной 50–105 мм, полосу толщиной 10–50 мм и шириной 100–200 мм, угловую равнобокую сталь размером от 75×75×8 до

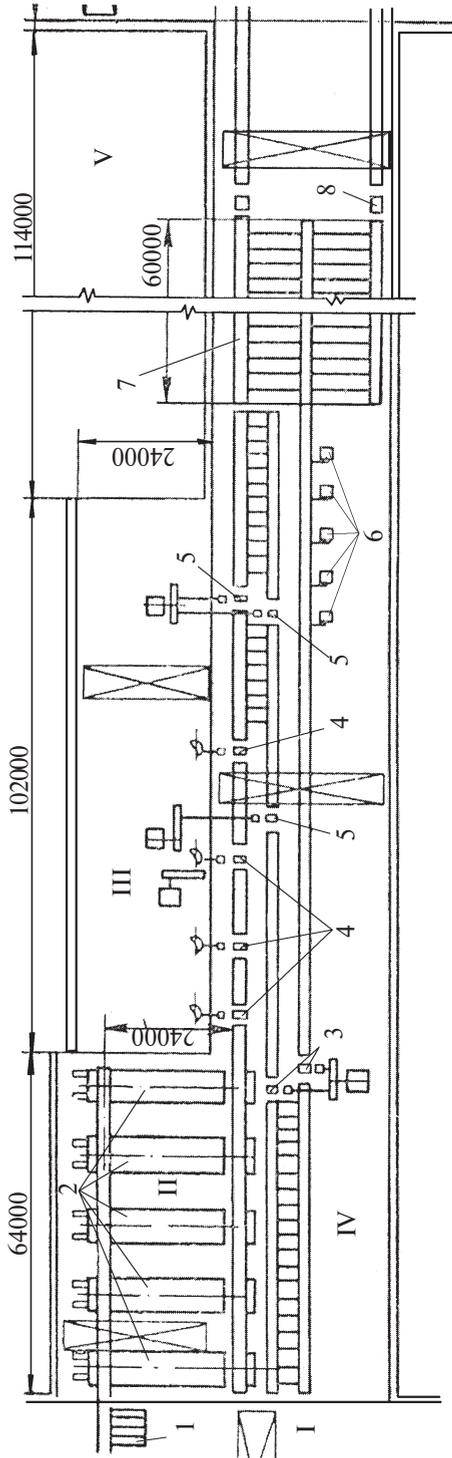


Рис. 13.1. Расположение оборудования крупноортного стана 550 последовательного типа:

- I* — склад заготовок; *II* — печной пролет; *III* — машинный зал; *IV* — пролет стана; *V* — склад готовой продукции;
1 — сборочные карманы; *2* — нагревательные печи; *3* — клетки дуо 570; *4* — черновые клетки дуо 660; *5* — подготовительные клетки дуо 570; *6* — пила; *7* — холодильник; *8* — правильные машины

125×125×16 мм, неравнобокую — от 100×63×18 до 140×90×16 мм, периодические профили, швеллеры № 12–18 (соответственно высотой 120–180 мм), двутавровые балки № 12–14, рельсы узкой колеи из углеродистых низколегированных и ряда легированных марок стали. Как видно, сортамент стана весьма разнообразен. Возможность прокатать профили широкого сортамента и самой сложной формы — это первое преимущество станов такой конструкции. Кстати, поэтому на выходе стана установлены пилы для разрезки раската на мерные длины, а не ножницы.

Исходная заготовка для прокатки поступает с непрерывно-заготовочного стана после ее охлаждения, осмотра, контроля и ремонта. На приемном рольганге нагревательных печей происходит подготовка заготовки к нагреву, осмотр ее, проверка соответствия заданной марке стали, ввод информации о заготовке в систему автоматизированного слежения за металлом, используемой по ходу дальнейшего технологического процесса. Далее с помощью толкателя заготовка загружается в методическую печь для нагрева. При загрузке одной заготовки также одна нагретая заготовки выдается из торцевого окна на отводящий рольганг, по которому она движется к клетям прокатного стана. При прокатке раскат находится только в одной клетке стана и не испытывает воздействия со стороны других клеток. По мере уменьшения площади поперечного сечения и увеличения длины раската расстояние между клетями увеличивается, чтобы раскат умещался между клетями. При таком расположении оборудования практически после каждой клетки можно осуществить кантовку полосы (если между клетями установлен кантователь). Каждая клетка имеет свой независимый привод. Независимая прокатка в каждой клетке обеспечивает ее независимую настройку и регулировку и, как следствие, высокую точность получаемых профилей. Это второе преимущество последовательных станов.

Завершая описание общей технологии, отметим, что после горячей резки пилами прокат поступает на холодильники и после охлаждения правится на роликотправильной машине и разрезается на требуемые по заказу длины на ножницах холодной резки. Далее следуют операции контроля качества продукции, маркировки и подготовки металла к отгрузке заказчику.

К недостаткам последовательных станов следует отнести большую протяженность прокатной линии. Чем длиннее раскаты, тем длиннее стан. Для сокращения длины цеха стан располагают в три линии со шлепперной передачей раската с одной линии на другую. Из-за высокой протяженности стана температура металла к концу прокатки быстро падает. Поэтому такие станы могут быть в основном только крупносортными. На средне- и мелкосортных станах количество клеток больше, длины раскатов также выше, поэтому уложиться в требуемый температурный интервал прокатки не представляется возможным (напомним, что при горячей прокатке, например, доэвтектоидных сталей температура начала прокатки на 50–100 °С ниже линии солидуса, а температура конца прокатки на 50 °С выше линии A_{c3}).

Несколько сокращают протяженность цеха станы шахматного типа. На среднесортном стане 350 с шахматным расположением клеток (рис. 13.2) черновые клетки расположены в первых двух линиях последовательно, а чистовые клетки смещены друг относительно друга и вращаются в разные стороны. Между клетями установлены косые рольганги, двигаясь по которым полоса перемещается как

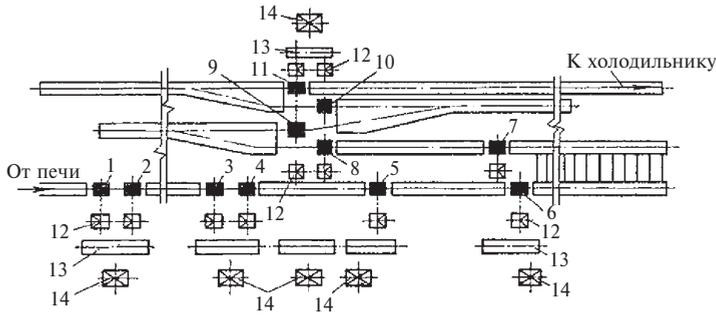


Рис. 13.2. Расположение прокатных клетей стана 350 шахматного типа:

1—11 — рабочие клетки; 12 — шестеренные клетки;
13 — редукторы; 14 — двигатели

вдоль оси прокатки, так и в поперечном направлении, становясь на линию прокатки следующей клетей. Задача в нее осуществляется путем реверса вращения роликов рольганга. Потери температуры по клетям на таких станах меньше, чем на последовательных, но в целом основные недостатки последовательного стана здесь сохраняются.

Мелкосортный стан (рис. 13.3) в некоторой степени противоположен последовательному. Здесь клетки собраны в непрерывные группы с минимальным расстоянием между клетями. От первой до последней клетки потери температуры незначительны. Суммарная степень деформации может быть увеличена за счет установки большого числа клетей.

Но у такого стана имеются свои недостатки: точность проката ниже, чем на последовательном стане из-за того, что раскат находится одновременно в нескольких клетях и прокатка ведется в две нитки. При непрерывной прокатке имеется воздействие на полосу со стороны соседних клетей: полоса испытывает либо натяжение, либо подпор, а на мелких станах за счет подпора образуется петля между клетями. Чтобы устранить натяжение или петлю, в каждой i -й клетке необходимо строго выполнять условие постоянства секундного объема металла: $F_i V_i = \text{const}$. Однако в силу разных причин это условие не всегда выполняется, и полоса либо испытывает натяжение, либо образует между клетями петлю. Сложные профили невозможно прокатывать при наличии петли или натяжения, так как размеры и форма их сечения искажаются. Непрерывные станы предназначены для прокатки только простых профилей — круглого, квадратного, прямоугольного, шестигранного сечения. На современных мелкосортных станах освоена прокатка еще мелких угловых профилей и швеллеров, но с некоторыми послаблениями по точности. Более сложные профили прокатывать нельзя.

На рассматриваемом стане 250 ЧерМК производят круглую сталь диаметром 10—30 мм, арматурную сталь № 10—20 (что соответствует ее среднему диаметру), квадратную сталь 16 мм, угловую равнобокую сталь 36×36×4 и 40×40×4 мм, швеллер № 4. Заготовка с НЗС имеет размеры поперечного сечения 100×100 мм, длину 10500—12000 мм. В настоящее время освоена прокатка всего сортамента профилей из литой заготовки сечением 150×150 и 120×120 мм после переката ее на квадрат 100 мм на среднесортном стане 350.

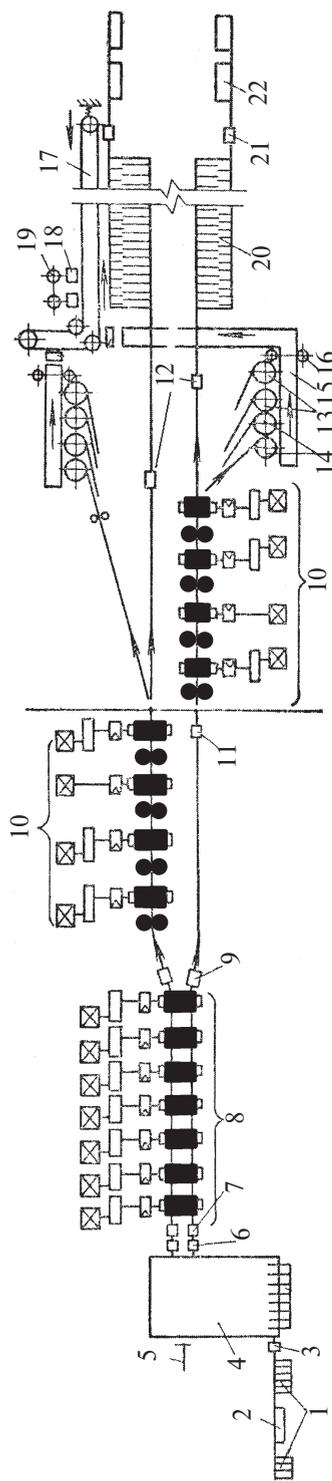


Рис. 13.3. Расположение оборудования двухниточного непрерывного мелкосортного стана 250:

1 — загрузочные решетки; 2 — карманы для бракованной заготовки; 3 — втакиватель заготовок; 4 — нагревательная печь; 5 — выталкиватель; 6 — распределительное и вытаскивающее устройство; 7 — ножницы; 8 — черновая группа клетей; 9 — ножницы; 10 — чистовая группа клетей; 11 — ножницы; 12 — летучие ножницы; 13 — сортовые могалки; 14 — ленточные могалки; 15 — пластинчатый транспортер; 16 — бунтовязальная машина; 17 — крюковой конвейер; 18 — бунтосъемное устройство; 19 — пакетировочная машина; 20 — холодильник реечного типа; 21 — ножницы холодной резки; 22 — карманы

После осмотра, контроля и ремонта заготовку подают краном на загрузочные решетки нагревательной печи, на которых осуществляется заключительная отбраковка заготовок, индентификация по марке стали, ввод фактических данных в автоматизированную систему слежения за металлом. С помощью втащивателя заготовка попадает в методическую нагревательную печь. Толкатель проталкивает всю садку на один шаг, и последняя нагретая заготовка оказывается напротив бокового окна выдачи печи. Распределительное и вытаскивающее устройство позволяет выдать сразу две заготовки по одной на каждую линию прокатки. Прокатка в черновой группе клетей ведется в две нитки.

Кривошипно-рычажные ножницы при необходимости обрезают разломаченный передний конец заготовки или, в случае аварии на стане, разрезают ее на части, удобные для удаления с линии стана. В чистовых клетях стана прокатка производится в одну нитку. Чистовые клетки имеют чередующиеся горизонтальные и вертикальные валки, что полностью устраняет кантовку полосы при прокатке. Это способствует увеличению точности прокатанного профиля.

Готовый прокат либо сматывается в бунты с помощью моталок, либо в виде прутков поступает на холодильник. Бунты после смотки на бунтовязальных машинах обвязываются с двух сторон и поступают на крюковой конвейер для охлаждения. Охлажденные бунты пакетируются и отправляются на склад готовой продукции.

Прутки после охлаждения на холодильнике, длина которого 125 м, нарезаются на требуемые длины на ножницах холодной резки, затем поступают в накопительный карман, где вручную обвязываются, затем пакетом взвешиваются и доставляются на склад готовой продукции.

Чтобы расширить возможности непрерывных станов, на них стали устанавливать комбинированные и универсальные клетки. Комбинированными называются такие клетки, которые могут быть как с горизонтальным, так и с вертикальным расположением валков. Станины их изготовлены таким образом, что могут быть установлены на плитовине в двух положениях, каждая клеть может иметь либо горизонтальный, либо вертикальный привод валков. Это дает возможность в зависимости от калибровки профиля набирать требуемый состав горизонтальных и вертикальных клетей. Универсальными называются 4-валковые клетки, в которых калибр образуется парой горизонтальных и парой вертикальных валков, оси которых расположены в одной плоскости. Такие клетки позволяют прокатывать фланцевые профили типа швеллера, тавровой и двутавровой балки.

На Западно-Сибирском металлургическом комбинате установлен непрерывный стан 450 с универсальными и комбинированными клетями (рис. 13.4). По проекту стан предназначен для выпуска тонкостенных балок и швеллеров высотой 100–300 мм, балок нормального типа высотой 100–180 мм, угловой стали 75×125 мм, круглой стали диаметром 30–56 мм, полосовой стали (штрипса) шириной 125–200 мм и толщиной 4–16 мм. Как видно, по сортаменту это среднесортно-балочный стан, хотя диаметр его последней клетки составляет 600 мм (это единственное исключение, когда название сортового стана сделано не по диаметру последней клетки, а по сортаменту). Однако построенный стан отличается от проектного: не была построена полосовая линия, включая

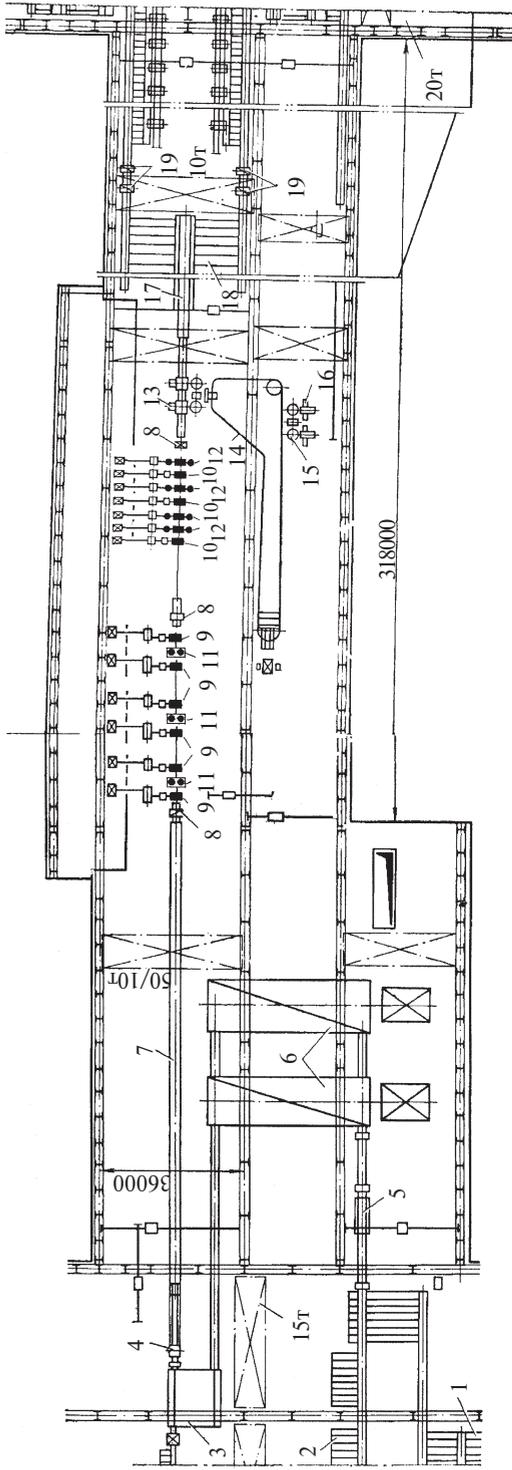


Рис. 13.4. Схема расположения оборудования среднесортно-балочного непрерывного стана 450 (по проекту):

1 — холодильник непрерывно-заготовочного стана; 2 — загрузочная решетка; 3 — подогревательная печь; 4 — летучая стыковарочная машина; 5 — весы; 6 — нагревательные печи; 7 — проходная секционная печь; 8 — летучие ножницы; 9 — горизонтальные черновые клетки; 10 — комбинарованные чистовые клетки; 11 — комбинарованные (горизонтально-вертикальные) черновые клетки; 12 — универсальные клетки; 13 — моталки для штрипсов; 14 — крюковой конвейер для рулонов штрипсов; 15, 16 — съемщик и пакетирующий рулонов штрипсов; 17 — отводящий рольганг; 18 — холодильники; 19 — правильные машины

оборудование для смотки и охлаждения полосовых рулонов, не реализована также идея бесконечной прокатки, поэтому отсутствует стыкосварочная машина и проходная секционная печь. Исходной заготовкой является прокат, полученный на НЗС, размерами 150×150, 200×200 и 200×250 мм. Нагрев заготовок осуществляется в методической печи, и далее они поступают на стан, состоящий из 16 рабочих клетей — горизонтальных, комбинированных и универсальных.

При прокатке балок и швеллеров применяют комбинированные клетки и прокатку заканчивают в универсальной клетке. При прокатке других профилей универсальные клетки не используются. Все профили прокатывают без кантовки полосы между клетями. После стана установлены летучие ножницы, разрезающие прокат на длины, уместяющиеся на холодильнике. Простые профили, а также швеллеры и балки после охлаждения разрезаются на мерные длины на ножницах. После этого прокат пакетируется, маркируется и направляется на отгрузку. Годовая производительность стана 1,5 млн. т/год.

Преимущества последовательной и непрерывной схемы расположения оборудования использованы на полунепрерывных станах. Рассмотрим схему расположения оборудования полунепрерывного среднесортного стана 350 ЧерМК (рис. 13.5). Четырнадцать клетей стана собраны в отдельные непрерывные группы по две-три клетки в каждой. Имеются также отдельно стоящие клетки. Расстояние между группами изменяется, как на последовательном стане, т. е. заготовка всегда уместяется между группами клетей. С одной стороны, исключили воздействие на раскат со стороны соседних клетей, с другой — удалось достаточно компактно разместить необходимое количество клетей для обеспечения требуемой суммарной деформации при небольших потерях тепла.

На стане из углеродистых, низколегированных и некоторых легированных марок стали прокатывают круглый профиль диаметром 25–65 мм, периодический профиль для арматуры № 25–40, сталь угловую равнобокую 45×45×5; 50×50×5,6; 63×63×5,6 мм и полосовую сталь 105×28,5 мм. В последние годы на стане освоена прокатка швеллеров средних размеров. Исходная заготовка получается на НЗС и имеет сечение квадрата от 100 до 150 мм. Осваивается прокатка из литой квадратной заготовки 120 и 150 мм. Нагрев заготовки осуществляется в методических печах с двусторонним нагревом. Температура конца прокатки 950–1020 °С. В зависимости от профиля при прокатке используются от 10 до 14 клетей. После прокатки раскаты направляются на двусторонний холодильник длиной 90 м, перед которым установлены пилы горячей резки для отбора проб. После охлаждения прутки правятся на роликоправильных машинах и разрезаются ножницами холодной резки на длины 6–24 м.

Представляет интерес схема расположения рабочих клетей линейных станков. Рассмотрим один из цехов со среднесортным линейным станом (рис. 13.6). Средне-, крупносортные и рельсобалочные линейные станы имеют в своем составе малый блюминг, после которого установлены в линию две-три нереверсивные клетки трио. Прокатка в клетях трио ведется в реверсивном режиме в одном направлении между верхним и средним, а в другом — между средним и нижним валками. Эти клетки приводятся от одного, как правило, дешевого нереверсивного асинхронного двигателя. Передача раската из одной клетки в другую осуществляется с помощью шлеперных транспортеров или обводных аппаратов. Последняя клеть в этой линии имеет два валка, приводимых от

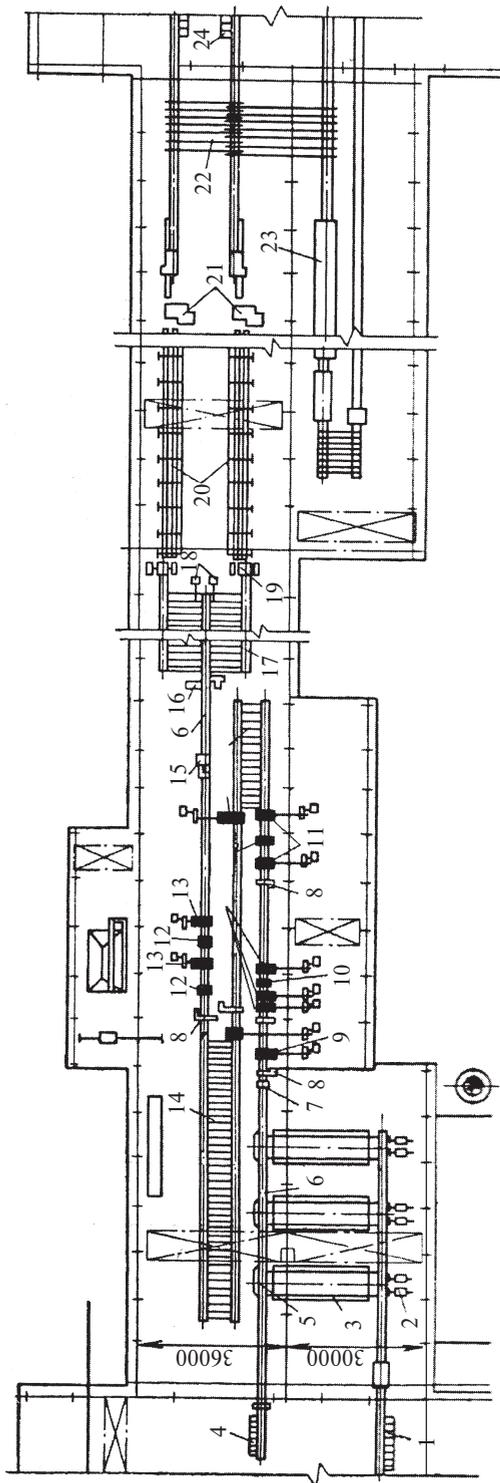


Рис. 13.5. Расположение оборудования полунепрерывного стана 350:

1 — загрузочные решетки; 2 — толкатели; 3 — нагревательные печи; 4 — карман для бракованной заготовки; 5 — амортизатор у печей; 6 — рольганг; 7 — ножницы; 8 — кантователи; 9 — горизонтальные клетки 530; 10 — вертикальные клетки 420; 11 — горизонтальные клетки 420; 12 — вертикальные клетки 370; 13 — горизонтальные клетки 370; 14 — шлепёрный транспортер; 15 — переводная стрелка; 16 — дисковые пилы; 17 — двусторонний холодильник; 18 — привод клапанов холодильника; 19 — сортировальная машина; 20 — пакетирующие рольганги; 21 — ножницы холодной резки; 22 — шлепперы; 23 — печь для термообработки проката; 24 — уборочные карманы

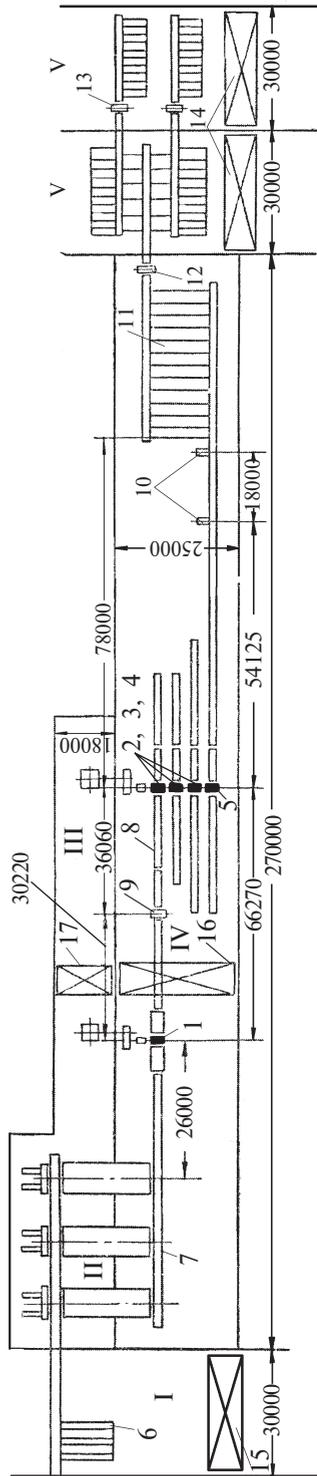


Рис. 13.6. Расположение оборудования среднесортного стана 450 линейного типа:

I — склад заготовки; *II* — печной пролет; *III* — машинный зал; *IV* — пролет стана; *V* — склад готовой продукции;
I — обжимная клеть трио 600; 2–4 — черновые клеть трио 450; 5 — чистовая клеть трио 450; 6 — загрузочная решетка; 7 — подводящий ролик; 8 — рабочий ролик чистового калибра; 9 — ножницы; 10 — пила; 11 — холодильник; 12 — мостовые краны;
 13 — ножницы холодной резки; 14–17 — мостовые краны

отдельного нереверсивного двигателя, поэтому в этой клетке можно осуществить только один чистовой пропуск. После прокатки продукция на пилах или ножницах режется на мерные длины.

Более мелкие линейные станы могут иметь две или три линии (рис. 13.7), каждая из которых приводится от собственного двигателя. Передача проката из клетки в клетку осуществляется с помощью специальных обводных аппаратов.

Принципиальным достоинством линейных станов является то, что полоса при прокатке не испытывает натяжения, можно организовать также прокатку без петли. Отсюда точность прокатки потенциально должна быть выше, а сортament продукции разнообразнее, чем на непрерывных станах. Однако новых линейных станов не строят, так как они малопроизводительны и плохо механизмируются и автоматизируются, а старые станы не обеспечивают ожидаемую точность и стабильность размеров проката из-за конструктивных недостатков.

Поскольку все типы станов имеют определенные преимущества и недостатки, построено много комбинированных станов, совмещающих возможности разных типов. Комбинированные станы бывают двух типов. Станы первого типа включают в себя несколько линий, каждая из которых предназначена для прокатки определенного сортамента продукции. Это позволяет значительно расширить количество производимых профилеразмеров на стане, обеспечить перевалку и настройку незадействованных линий без остановки процесса прокатки.

Черновая и промежуточная группы рабочих клеток полунепрерывного комбинированного мелкосортного стана 250-1 ММК построена по непрерывному, а чистовая — по линейному типу (рис. 13.8). Это позволяет увеличить возможности стана по сортаменту и точности проката. На стане прокатывают круглую сталь диаметром 10–19 мм, арматурную сталь № 10, 12, 14, 16, сталь квадратную 14 и 16 мм, сталь угловую равнобокую 25×25×3–4, 28×28×3, 32×32×4 мм, полосовую 20–45×4–12 мм из сталей углеродистых, конструкционных, низколегированных, автоматных и других марок. Особенностью данного стана является групповой привод через общий редуктор и индивидуальные шестеренные клетки на каждую непрерывную группу клеток. Это

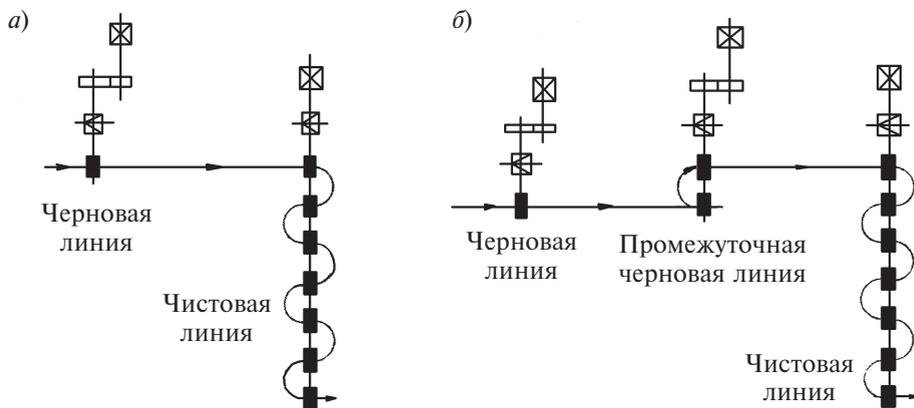


Рис. 13.7. Схемы расположения клеток мелкосортных линейных станов

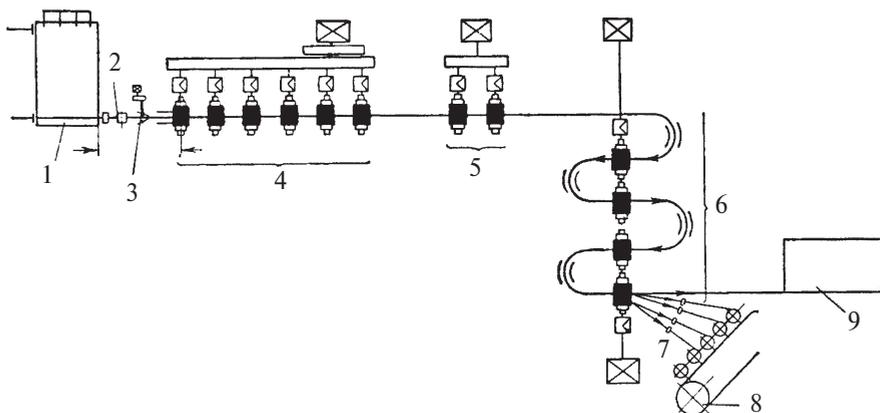


Рис. 13.8. Схема полунепрерывного комбинированного мелкосортного стана 250-1 ММК:

1 — нагревательная печь; 2 — ножницы; 3 — распределительная стрелка; 4 — черновая группа клетей; 5 — промежуточные клетки; 6 — чистовая группа клетей; 7 — моталки; 8 — конвейер; 9 — холодильник

значительно удешевляет привод, хотя не обеспечивает регулировку скоростей в широком диапазоне, что требуется при непрерывной прокатке.

Есть более сложные комбинированные станы, производящие в очень широком диапазоне различные профили малыми партиями. Например, мелкосортно-проволочный и штрипсовый стан в Милане (Италия — рис. 13.9) включает в себя, по сути, несколько станов для прокатки мелкосортного металла, катанки и штрипса. Имеется также возможность прокатки более сложных профилей. Катанка после клетей группы 4 поступает на бунтовые моталки и далее

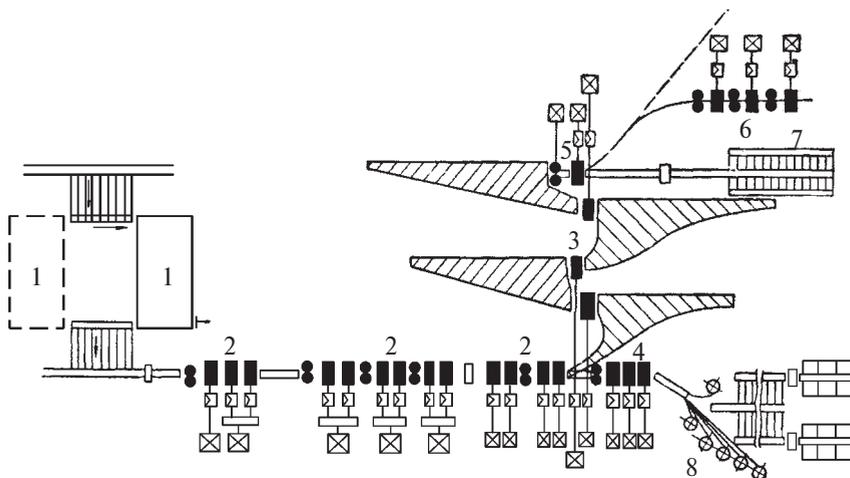


Рис. 13.9. Комбинированный мелкосортно-проволочный и штрипсовый стан:

1 — печи; 2 — черновые непрерывные группы клетей; 3 — линейная группа клетей; 4 — чистовые клетки для катанки; 5 — чистовые клетки для сорта; 6 — чистовая линия для штрипса; 7 — холодильник; 8 — моталки

на охлаждение. По этой же схеме производятся некоторые сортовые профили и полоса. Мелкий сорт прокатывается в клетях 3–5 в виде прутков и направляется на холодильник 7. Дополнительная группа клетей 6 предназначена для прокатки штрипса, однако может быть настроена также на прокатку других профилей.

В Дортмунде установлен комбинированный мелкосортный стан второго типа (рис. 13.10). Он содержит дублированные группы клетей. Это позволяет быстро переходить с одной линии прокатки на другую, меняя набор клетей и режим обжатия. Можно строить много различных вариантов прокатки. Один и тот же раскат может быть получен на разных линиях по разным схемам прокатки. Когда ведется прокатка на одной линии, клетки на другой линии готовятся к прокатке других профилей. Стан предназначен для прокатки малотоннажных партий среднего и мелкого сорта.

Все комбинированные станы дороги, так как содержат большое количество малоиспользуемых клетей, поэтому могут быть оправданы только на мини-заводах, обеспечивающих по приемлемой цене самым разнообразным прокатом потребителей какого-то компактного региона.

В настоящее время комбинированные станы уже не строят. Найдены новые конструктивные решения, позволяющие собирать конструкцию стана из небольшого набора унифицированных клетей по модульному принципу. Модули (клеть или группа клетей вместе с арматурой) перед прокаткой настраиваются на стенде, оборудованном специальными приборами и приспособлениями, и устанавливаются на специальной платформе. Затем собранная на платформе конструкция задвигается на линию прокатки, замещая платформу с отработанными клетями. Переход с одного профиля на другой осуществляется за 5 мин. Время перенастройки стана практически не влияет на производительность стана. Можно в широких пределах варьировать сортаментом проката. Особенно эффективны такие станы при производстве мелких профилей. За счет высокой жесткости клетей и стабилизации условий прокатки удается резко повысить скорости прокатки до 100–120 м/с и выше, тогда как обычные станы имеют скорости прокатки 30–45 м/с.

В последние годы в мировой практике наметились вполне устойчивые тенденции развития производства сортового проката. Во многих промышленно развитых странах сортовой прокат производят из стали, выплавляемой в электро-дуговых печах на мини-заводах с объемом производства 0,8–2,0 млн. т/год. Высокое качество металла достигается методами ковшовой обработки жидкой

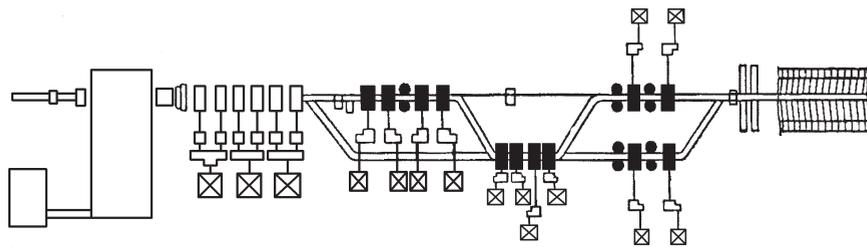


Рис. 13.10. Схема расположения комбинированного стана с дублирующим оборудованием

стали, вакуумной дегазации, глубокого рафинирования, ограничения содержания примесей (Cu, Sn, Pb и др.), попадающих в сталь из загрязненного лома. При прокатке на новых станах исходным материалом практически на 100 % является непрерывно-литая заготовка квадратного или круглого сечения размером 120–260 мм. При ее отливке применяют защиту струи от окисления нейтральным газом и интенсивное электромагнитное перемешивание металла в кристаллизаторе, оптимизируют скорость и температуру разливки и кристаллизации металла.

На ММК в 2004 г. началась реконструкция сортопрокатного производства: будет создан современный комплекс на 2 млн. т/год в составе проволочного мелко- и среднесортного станов с использованием унифицированной непрерывно-литой заготовки 150×150 мм. На ЗСМК в 2002 г. пущена сортовая НЛМЗ с полным отказом от прокатки на блюминге, закончено строительство нового мелкосортного стана 250-2.

При использовании литой заготовки коренным образом меняется структура современного сортопрокатного производства. Применяются МНЛЗ радиального типа. Есть опыт использования более дешевых МНЛЗ горизонтального типа. Отлитая заготовка режется на мерные длины и поступает в накопительные печи, назначение которых — выровнять температуру металла по сечению заготовки на температуре начала прокатки (на 50–100 °С ниже солидуса). Заготовка поступает непосредственно на непрерывный стан, построенный по блочному принципу и имеющий конструктивные средства для быстрой переделки и перенастройки клетей.

Такая технология значительно дешевле традиционной, поэтому более конкурентоспособна на мировом рынке, но при условии обеспечения надлежащего качества металла. Помимо тщательной очистки исходного металла, требуется обеспечить надлежащую проработку (уков) сечения заготовки при прокатке. Количественной характеристикой укова является отношение площадей поперечного сечения литой заготовки и готового профиля. Опыты показали, что при укове меньше 8–15 в центральной части готового профиля сохраняются фрагменты литой структуры, возможны неуплотненные рыхлые зоны, величина зерна неравномерна по сечению, качество металла существенно ниже, чем при обычной технологии прокатки (через блюминг — НЗС). По новой технологии прокатывают в основном мелкосортную продукцию и катанку. При производстве среднего и крупного сорта имеются проблемы, связанные с недостаточным уковом.

На ОАО “Северсталь” установили минимальный уков для формирования требуемой микроструктуры сортового проката, полученного из литой заготовки: для углеродистой качественной низколегированной — 7, для металлокордовых и канатных сталей — 11, для шарикоподшипниковых — 15. Оценка прорабатываемости сечения оценивалась по карбидной сетке, центральной пористости, осевой ликвации, ликвационным полоскам и трещинам и точечным краевым загрязнениям.

Следует иметь в виду, что в описанной технологии практически отсутствует возможность проконтролировать качество металла по трещинам, пузырям и т. п. по всей технологической цепочке. Только контроль готовой продукции недостаточен и трудно организуем. Необходимо разрабатывать и внедрять дат-

чики качества горячего металла, установленные на всех основных этапах производства, что пока вызывает определенные трудности.

Чтобы увеличить уков, можно воспользоваться опытом Оскольского электрометаллургического завода (ОЭМЗ). На этом заводе сталь получают, минуя доменный передел, непосредственно в электрических печах из обогащенных металлизированных окатышей, поэтому сталь имеет высокую чистоту, хотя и значительно дороже металла, получаемого из доменного чугуна. Размеры разливаемого квадрата 260×260 мм. Это обеспечивает высокий уков даже при производстве среднесортной продукции. Для этого перед среднесортным станом 350 установили четыре клетки непрерывно-заготовочного стана, в которых отлитую исходную заготовку перекачивают на требуемую для среднесортного стана заготовку 100×100, 120×120 и 150×150 мм.

С 1990 по 1995 г. во всем мире введено в эксплуатацию новых или кардинально модернизированных 33 проволочных, 23 мелкосортных и 96 прочих сортовых станов. На этих станах удалось заметно улучшить технологию прокатки и повысить требования по точности и качеству проката. Приоритетная роль в настоящее время отводится экономии энергии на 1 т производимой продукции.

Основные направления развития прокатного производства в современных условиях сводятся к следующему:

- сокращение длительности обработки металла за счет применения непрерывных процессов литья и прокатки, использования непрерывно-литой заготовки требуемого сечения;

- повышение гибкости производства за счет гибкого планирования производства, непрерывного моделирования технологического процесса, автоматизации управления процессом;

- повышение качества проката, достигаемого за счет применения средств контроля точности размеров и состояния поверхности проката, компьютерного моделирования и оптимизации технологии, разработки моделей для управления микроструктурой и свойствами металла при прокатке;

- повышение производительности и снижение энергозатрат за счет совершенствования мониторинга производства, совершенствования оборудования;

- улучшение экологии за счет целого комплекса мероприятий как по совершенствованию технологии, так и по улучшению состояния складов, установок утилизации отходов, очистных сооружений и т. д.

13.2. Требования к сортовому прокату по точности

Повышение точности прокатываемого металла является одним из основных направлений развития сортопрокатного производства. Существуют различные характеристики точности сортового металла. Рассмотрим их на примере круглого проката. Объем производства круглого профиля значительно превышает остальные. Кроме того, требования к нему со стороны потребителей часто выше, чем к другим сортовым профилям.

В некотором поперечном сечении по длине круглой штанги, которому придадим номер j , фактическая форма проката отличается от идеального круга (рис. 13.11). Если фактическое сечение заменить равновеликим по площади

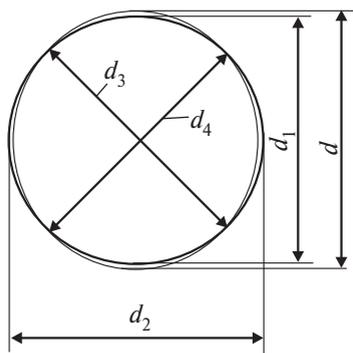


Рис. 13.11.
Фактическая форма
круглого проката

кругом, то диаметр его d_j можно назвать *фактическим диаметром* проката в j -м сечении. Однако при таком определении фактический диаметр измерить трудно, поэтому практически его вычисляют как среднее из четырех измерений:

диаметр d_{1j} в направлении высоты калибра, в котором он прокатывался, т. е. под углом $\beta = 0$ к вертикали;

диаметр d_{2j} в направлении ширины калибра ($\beta = 90^\circ$);

два диаметра d_{3j} и d_{4j} , измеренных по диагоналям, т. е. под углами к вертикали $\beta = \pm 45^\circ$.
Итак,

$$d_j = 0,25(d_{1j} + d_{2j} + d_{3j} + d_{4j}).$$

В литературе можно встретить определение фактического диаметра как половина суммы максимального и минимального диаметров, которое не учитывает размеров диагоналей, поэтому такое определение не всегда достоверно.

Отклонение по абсолютной величине каждого из четырех измеренных значений диаметра от фактического называется *поперечной разнотолщиной* проката δ_{ij} в j -м сечении:

$$\delta_{ij} = |(d_{ij} - d_j)|,$$

где i — номер измерения ($i = 1, \dots, 4$).

Если вычислить среднее из четырех отклонений

$$\delta_j = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \delta_{ij},$$

то его можно трактовать как некоторую усредненную характеристику разнотолщинности в j -м сечении. Средняя поперечная разнотолщинность по всей полосе

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_j,$$

где n — количество продольных сечений; $j = 1, 2, \dots, n$; δ может выступать как обобщенная характеристика поперечной разнотолщинности проката.

В нашем определении поперечная разнотолщинность в j -м сечении — это график распределения поперечной разнотолщинности по сечению, построенный по четырем значениям.

Для других форм поперечного сечения проката, отличных от круга (например, для полосы или квадрата), под размером d_j можно понимать любой из характеристических размеров, например высоту.

По аналогии дадим определение продольной разнотолщинности. График изменения фактического диаметра d_j по длине полосы (в зависимости от номера j) качественно характеризует продольную разнотолщинность проката. Если вычислить среднее значение фактического диаметра

$$d = \frac{\sum_{j=1}^n d_j}{n}, \quad (13.1)$$

то количественной мерой продольной разнотолщины будет служить разность

$$\sigma_j = |d_j - d|,$$

которую также можно представить в виде графика в зависимости от номера j (по длине необходимо выбрать n сечений, $j = 1, 2, \dots, n$). Этот график и называется *продольной разнотолщиной*. Обобщенной характеристикой продольной разнотолщины является ее усредненное значение:

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sigma_j.$$

Все данные выше определения предполагают, что существуют автоматические измерители диаметра в четырех (или больше) направлениях. Через какие-то интервалы по длине в любом j -м сечении полосы производятся автоматические измерения всех четырех диаметров, автоматическая обработка данных по приведенным формулам и автоматическая распечатка всех характеристик каждой штанги. На самом деле таких измерителей на подавляющем большинстве действующих станов нет. Точнее, существуют технические проекты и выполненные в металле устройства, но они либо дороги, либо имеют низкую надежность работы в металлургических условиях. Чаще на стане производят измерения только в одном сечении на отрезанном конце полосы и только на одной штанге из партии полос. Измеряют вручную с помощью соответствующих скоб, настроенных на минусовый и плюсовый допуски на прокат. По этим показаниям производят настройку стана, и при прокатке считают, что при заданной настройке размеры проката будут находиться в пределах допуска. На самом деле это далеко не так. Судить о точности проката при такой методике измерения можно с большой долей условности.

Измеренные диаметры d_{ij} должны укладываться в допуски, которые отсчитываются от номинального диаметра $d_{\text{НОМ}}$ (рис. 13.12). Номинальным называется диаметр, определенный заказом. Допустимое отклонение в сторону увеличения диаметра Δ_+ называется плюсовым, а в сторону уменьшения Δ_- — минусовым допуском. Эти допуски определяются ГОСТом. Фактические отклонения измеренных значений диаметра d_{ij} от номинального определяют *фактическую точность* проката:

$$\Delta_{ij} = |d_{ij} - d_{\text{НОМ}}|.$$

Очевидно, точность проката может быть различной как в пределах одного сечения, так и по длине полосы (в разных j -х сечениях). Для ее определения необходимы автоматические измерители. При их наличии мож-

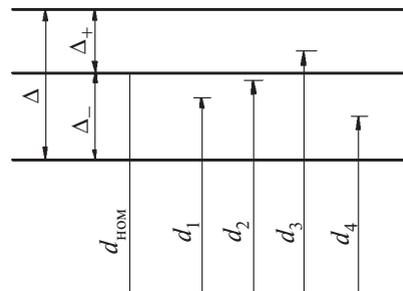


Рис. 13.12. Допуски на отклонения измеренных диаметров от номинального

но вычислить среднюю точность для полосы в целом. Для этого необходимо произвести n измерений фактического диаметра ($j = 1, 2, \dots, n$) и вычислить средний фактический диаметр d полосы по формуле (13.1).

Средняя фактическая точность полосы

$$\Delta = |d - d_{\text{ном}}|.$$

Фактическая точность Δ_{ij} может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Как правило, минусовый допуск значительно превышает плюсовой. Действующим стандартом ГОСТ 2590–88 предусмотрены три группы точности круглого проката с предельными отклонениями, приведенными в табл. 13.1.

ГОСТ 2590–88 предусматривает также предельную допустимую овальность круглого профиля. Овальность вычисляется как разность максимального и минимального из четырех диаметров в j -м сечении:

$$\theta_j = d_{j \max} - d_{j \min}.$$

Допуски на овальность равны половине полного допуска на размер

$$\theta = 0,5(|\Delta_+| + |\Delta_-|).$$

Например, для круглого профиля диаметром 5–9 мм обычной точности (гр. В) предельная овальность $\theta = 0,4$ мм.

Несимметричное построение поля допускаемых отклонений должно стимулировать прокатку с минусовыми допусками. Профили, прокатанные в минусовом поле допусков объективно выгодны как потребителям, так и производителям. У потребителя облегчается производимая им машина, меньше металла закладывается в строительные конструкции, меньше металла уходит в стружку и т. д. В прокатном производстве из исходной заготовки получается больше продукции в метраже. Заказчик также заинтересован покупать прокат в метрах. Однако учет, отгрузка и продажа готовой продукции осуществляются в тоннаже, так как весы имеются на всех участках цеха, а приборов для измерения партий проката в метрах не существует. Заказчика практически вынуждают покупать прокат по массе.

Таблица 13.1

Предельные отклонения на круглый прокат по ГОСТ 2590–88

Диаметр $d_{\text{ном}}$, мм	Группа точности проката		
	А	Б	В
5–9	+0,1...–0,2	+0,1...–0,5	+0,3...–0,5
10–19	+0,1...–0,2	+0,1...–0,5	+0,3...–0,5
20–25	+ 0,1...–0,4	+0,2...–0,5	+0,4...–0,5
26–28	+ 0,1...–0,4	+0,2...–0,7	+0,3...–0,7
29–30	+ 0,1...–0,5	+0,2...–0,7	+0,3...–0,7
32–48	+ 0,1...–0,5	+0,2...–0,7	+0,4...–0,7
50–58	+ 0,1...–0,7	+0,2...–1,0	+0,4...–1,0
60–78	+ 0,1...–0,9	+0,3...–1,1	+0,5...–1,1
80–97	+ 0,3...–1,1	+0,3...–1,3	+0,5...–1,3
100–115	–	+0,4...–1,7	+0,6...–1,7

В прокатном производстве выгодно использовать все поле допусков: начинать прокатку на новых валках в минусовом допуске, а по мере износа калибров постепенно переходить к плюсовому допуску. Прокатка всегда “на минус” требует дополнительных затрат на более частую смену валков, на ужесточение контрольных функций, и эти затраты пока никак не компенсируются, поскольку в ценах на прокат не предусмотрены надбавки за прокатку в минусовом поле допусков (раньше такие надбавки предусматривались при расчете цены проката). Все это сдерживает широкое распространение проката с минусовыми допусками. Немалую роль при этом играют сложившаяся практика, привычка, удобства, которые сломать очень трудно.

Следует обратить внимание на то, что общее поле допусков на прокат очень велико и на крупных кругах достигает 2 мм. Такие допуски отражают состояние и возможности современного оборудования, предназначенного для производства сортового проката. Но такие допуски совершенно не устраивают многих потребителей, например фирмы, использующие автоматические линии для изготовления каких-то изделий из круглого проката. Современные автоматические линии требуют прокат с допуском $\pm 0,1$ мм. Многие из них не могут работать на прокате с окалиной на поверхности. Требованиям таких заказчиков удовлетворяет так называемый калиброванный металл. Заготовкой для калиброванного металла (в основном круглого сечения) служит сортовой круглый прокат. Его сначала освобождают от окалины (разламыванием слоя окалины, обработкой щетками и травлением в кислоте), затем (в холодном состоянии) протягивают через волоку, получая требуемые точность и качество поверхности. Строго говоря, калибровка — это лишняя и дорогая технологическая операция, необходимая только потому, что прокатное производство не в состоянии обеспечить высокие требования современного машиностроения. В целях удешевления калиброванного проката необходимо на прокатном стане добиваться необходимой точности, т. е. получать калиброванный металл (его называют горячекалиброванным). Это одна из тенденций развития прокатного производства.

13.3. Факторы, определяющие точность проката, и пути увеличения точности

13.3.1. Конструкция клетей и износ калибров

Параметры чистового калибра и его износ в значительной мере определяют форму проката в поперечном сечении. От износа также зависит точность проката внутри партии. По мере износа калибра прокат переходит из области минусовых допусков в плюсовые. Количество проката, которое можно прокатать за всю кампанию до полного износа калибра, называют стойкостью калибра. В зависимости от материала валков, марки прокатываемого металла, требований к прокату и других факторов стойкость изменяется от 200 до 1000 т и более.

Рассмотрим конструкцию чистового 2-валкового круглого калибра (рис. 13.13). Вблизи разъема калибр имеет выпуски под углом ψ к вертикали, которые необходимы для предотвращения брака в виде лампаса при незначительном переполнении калибра и для облегчения переточки.

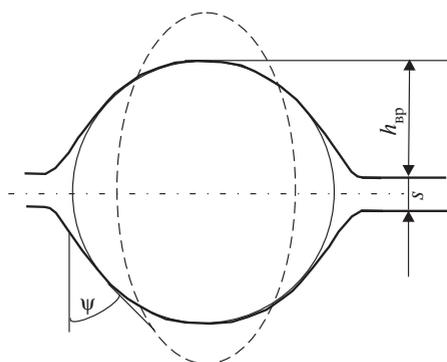


Рис. 13.13. Конструкция чистового круглого калибра

Большую точность, а также более равномерную деформацию и износ по периметру круга обеспечивают многовалковые калибры и соответствующие им схемы калибровки валков. Работы по изучению процесса прокатки в многовалковых калибрах ведутся в Челябинском политехническом и Магнитогорском горно-металлургическом университетах, ДонНИИЧермете, ВНИИМетмаше и на ряде российских заводов. Установлено, что в 3-валковом калибре деформация в направлении разреза меньше, чем

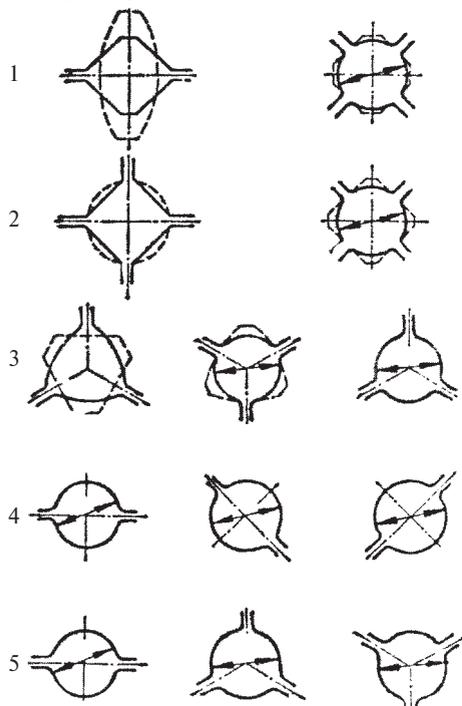


Рис. 13.14. Схемы прокатки в многовалковых калибрах

Таким образом, изначально предусмотрено неконтролируемое уширение металла вблизи разреза калибра и, соответственно, колебание размера проката по ширине. В 2-валковый чистовой калибр задается овал в вертикальном положении (на рис. 13.13 показано штрихами). При его деформации наибольшее течение металла относительно валков и наибольший износ калибра наблюдаются в направлении диагоналей, т. е. по диаметрам d_3 и d_4 (см. рис. 13.11). Неравномерный износ является вторым существенным недостатком 2-валковых калибров. Двухвалковая система овал—круг не самая лучшая для получения круглого проката повышенной точности.

в направлении разреза меньше, чем в 2-валковом, а в 4-валковом калибре при малых обжатиях деформация протекает практически без уширения. Поэтому точность прокатки в 4-валковом калибре выше, чем в 3-валковом, а в 3-валковом выше, чем в 2-валковом.

Следует отличать клетки с 4-валковыми (и многовалковыми) калибрами от универсальных 4-валковых клеток. В многовалковых калибрах все валки приводные, тогда как в универсальных клетях приводятся только горизонтальные валки. По функциональному назначению они также различны. Многовалковые калибры необходимы для повышения *точности* проката, обычно простой формы поперечного сечения. В универсальных клетях обеспечивают *форму* поперечного сечения сложного профиля.

Приведем опыт промышленной эксплуатации на сортовых станах чистовых групп клетей с применением многовалковых калибров (рис. 13.14). По схеме 1 в первой клетке стана 300 получают квад-

рат со скругленными углами, а окончательный профиль формируют во второй клетки в круглом 4-валковом калибре. Однако точный круг по схеме 1 прокатывать трудно, потому что по периметру круга неравномерны деформация и износ и нестабильны другие параметры прокатки.

Схема 2 реализована в двух 4-валковых калибрах. Условия деформации по граням квадрата здесь более стабильны, чем в схеме 1. На мелкосортном стане 250-1 ММК по данной схеме прокатывают круг диаметром 14 мм с колебаниями размеров в пределах $+0,08...-0,23$ мм. Но и в этой схеме деформация и износ по периметру чистового калибра неравномерны. К тому же деформацию круга сначала в квадрат, а затем снова в круг вряд ли следует считать рациональной.

Наиболее перспективными для точной прокатки оказались 3-валковые клетки повышенной жесткости фирмы “Кокс” (Германия — рис. 13.15). Разработано несколько схем прокатки с применением таких клеток. По схеме 3 (см. рис. 13.14) прокатка ведется в трех 3-валковых клетях, представляющих единый блок, по системе треугольник—круг—круг. Достоинством системы считают отсутствие кантовок между клетями, высокую степень деформации при прокатке треугольника в круге и, наоборот, малую и равномерную деформацию по периметру в чистовом калибре. Но неравномерность деформации и износа в первых двух калибрах в конечном счете сказывается на точности готового профиля.

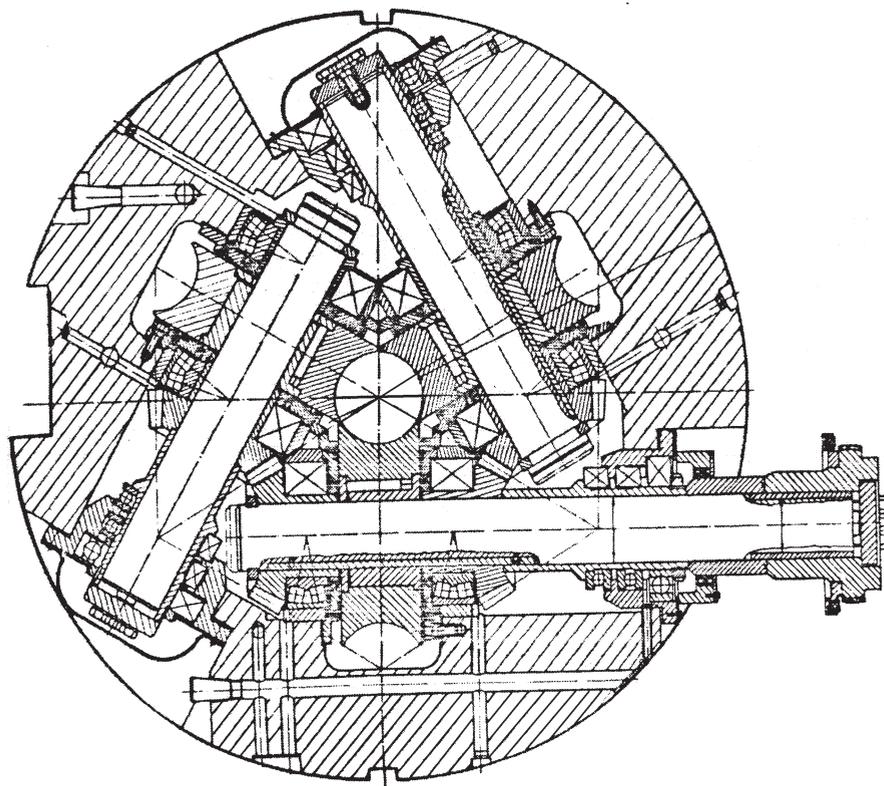


Рис. 13.15. Трехвалковая клеть повышенной жесткости

Этот недостаток устраняется в последующих двух схемах. Первая из них 4 вновь возвращается к прокатке в 2-валковых калибрах, но расположенных под углом 45° к горизонтали. Клетки с таким расположением широко применяются в трубном производстве. Они обеспечивают более высокую точность, чем клетки с обычным расположением. Но 3-валковые клетки в большей мере способствуют получению высокоточного проката. Поэтому схема 5 более предпочтительна. Трехвалковые блоки сначала из двух клеток были внедрены и успешно работали на стане 350-1 Макеевского и стане 450 Серовского металлургических заводов. Результаты работы этих станов показали, что на среднем сорте диаметром от 36 до 52 мм по данной схеме получается прокат с полем отклонений по четырем диаметрам по всей длине проката в пределах $+0,05...-0,25$ мм.

Однако промышленная эксплуатация схемы прокатки 5 выявила ряд ее недостатков. При больших колебаниях размеров исходной заготовки, неизбежных в реальных условиях, и широком диапазоне температурных условий прокатки требуемая точность проката может быть не обеспечена. Для гарантированного попадания в заданные допуски требуется третья 3-валковая клетка. Блок из трех 3-валковых клеток сначала был установлен после последней (№ 10) клетки стана 350 завода ОАО «Петросталь» (Кировский завод, Санкт-Петербург). Затем такие же 3-клетевые блоки были установлены на упомянутом стане серовского завода. По 3-валковой схеме прокатки (рис. 13.16) достигается

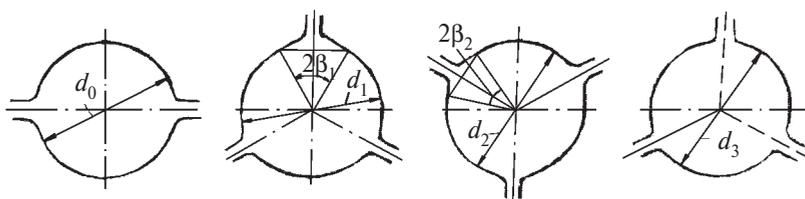


Рис. 13.16. Схема прокатки горячекалиброванного проката в 3-валковом блоке

увеличение суммарного обжатия в клетях блока. Колебания размеров проката, полученного после прокатки в чистой 2-валковой клетке стана 350, двукратно перекрываются обжатием, поэтому всегда обеспечивается стабильное получение проката по размерам. При этом уменьшается также износ чистовых калибров. Он составляет $0,22-0,30$ мм на 1000 т проката. После снятия окалины на иглофрезерной установке получается новый вид прокатной продукции — горячекалиброванная сталь, которая полностью соответствует требованиям на калиброванную сталь по 5-му классу точности по ГОСТ 7417-75, приведенным в табл. 13.2.

Таким образом, точность проката, полученного в 3-валковых блоках, значительно выше, чем при прокатке в 2-валковых калибрах, что дает возможность заменить дорогую холоднокалиброванную сталь горячекалиброванной. Последняя обладает дополнительными преимуществами: поверхность ее не наклепана, поэтому лучше обрабатывается резцом при токарных работах, свойства металла более равномерны по сечению.

Немецкая фирма «Кокс» в последнее время добилась крупных успехов в использовании 3-валковых клеток в составе новых современных высокоскорост-

**Допустимые отклонения по диаметрам и овальности (в скобках)
для калиброванной стали по ГОСТ 7417—75**

Диаметр круга (номинальный), мм	Класс точности	
	4	5
20–30	+0...–0,14(0,14)	+0...–0,28(0,28)
31–50	+0...–0,17(0,17)	+0...–0,34(0,34)
52–75	+0...–0,20(0,20)	+0...–0,40(0,34)

ных сортовых станов, построенных по модульному принципу. В рекламных роликах фирма гарантирует получение в таких клетях точность прокатки $\pm 0,1$ мм и даже меньше. Начиная с 1980-х гг. быстро расширяется использование типовых редуционно-калибровочных 3-валковых блоков клетей (RSB), которые устанавливаются в качестве чистовых и предчистовых групп на проволочных и комбинированных сортопроволочных станах. В настоящее время установлен 51 блок RSB на 40 фирмах общим объемом производства свыше 19 млн. т в год.

13.3.2. Колебания усилия прокатки

Если 2-валковый калибр (см. рис. 13.13) нагружать силой прокатки P , то высота калибра (диаметр d_1) будет увеличиваться за счет упругой деформации деталей клетки (рис. 13.17). Начальный участок кривой соответствует выбору зазоров и люфтов в валковых узлах. После их устранения изменение диаметра становится прямолинейным, его можно определять по формуле Головина—Симса

$$d_1 = s' + 2h_{\text{вр}} + \frac{P}{M_{\text{к}}}, \quad (13.2)$$

где s' — зазор между валками, который был бы при отсутствии люфтов и зазоров в узлах конструкции стана (s — фактический зазор между валками); $h_{\text{вр}}$ — глубина вреза ручья в валок; P — сила прокатки; $M_{\text{к}}$ — жесткость клетки.

Продифференцируем равенство, получим

$$\partial d_1 = \frac{\partial P}{M_{\text{к}}} \quad \text{или} \quad M_{\text{к}} = \frac{\partial P}{\partial d_1}.$$

Отсюда следует определение: жесткостью клетки называется сила, необходимая для увеличения высотного диаметра проката на 1 мм за счет упругой деформации клетки. Возможно иное определение: жесткостью клетки называется отношение приращения силы прокатки к приращению вертикального размера проката за счет упругих деформаций деталей клетки. Размерность жесткости — Н/мм. Жесткость клетки равна тангенсу угла наклона α кривой жесткости клетки.

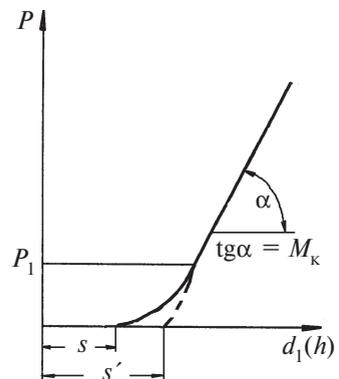


Рис. 13.17. Кривая жесткости клетки

Все факторы, влияющие на силу прокатки P , оказывают влияние на диаметр или толщину проката. Если в процессе прокатки происходит колебание силы, то это приведет к продольной разнотолщинности проката. На непрерывном стане это происходит главным образом за счет колебания натяжения между клетями. Как известно, с увеличением натяжения сила прокатки падает, причем заднее натяжение σ_0 более эффективно снижает ее, чем переднее σ_1 . Колебания натяжений всегда присутствуют при прокатке на непрерывном стане, поэтому неизбежны колебания высотного размера d_1 и продольная разнотолщинность проката.

Ширина проката также зависит от натяжения (уширение уменьшается с ростом натяжения). Колебания натяжений больше сказываются на горизонтальном размере d_2 , чем на вертикальном d_1 . Следовательно, при прокатке с переменным натяжением наряду с разнотолщинностью неизбежна разноширинность полосы.

13.3.3. Скорость прокатки

Скорость прокатки оказывает влияние на точность проката. Степень ее влияния в значительной мере зависит от механической характеристики привода клетки. Задача полосы в валки сопровождается динамическим падением частоты вращения n двигателя. Через 0,2–0,5 с число оборотов вновь повышается до прежнего уровня. Чем выше рабочая скорость вращения валков, тем больше проявляют себя описанные динамические эффекты. Рассогласование скоростей непрерывного стана в момент захвата ведет к изменению натяжения полосы и изменению высоты и ширины профиля (по разьему калибра). На стане 350 ЧерМК, например, при сравнительно невысоких скоростях прокатки (6–7 м/с) на передних концах длиной 0,5 м наблюдается утяжка горизонтального размера круглого профиля диаметром 45–65 мм до 0,75 мм, что превышает допуск по точности.

С повышением скорости прокатки к этому явлению добавляются вибрации валковой системы, сопровождающиеся периодическими изменениями размеров поперечного сечения по длине раската. К примеру, в начале эксплуатации проволочного стана 250 Западно-Сибирского металлургического комбината при скорости прокатки 34 м/с и выше вибрации валковой системы при прокатке катанки диаметром 6,3 мм приводили к периодическому колебанию размеров в пределах $\pm 0,5$ мм, что превышало допустимые значения по ГОСТу. Причиной вибрации обычно является неуравновешенность вращения шпинделей и валков стана, поэтому при более точном изготовлении деталей стана и совершенствовании конструкции клетей этот недостаток удастся существенно сгладить.

13.3.4. Распределение температуры по длине раската

Температура прокатки металла может изменяться по двум причинам. Первая причина — неравномерный нагрев заготовки в методической печи. Неравномерность прогрева может возникать за счет неправильного расположения горелок в печи или неправильного режима подачи топлива. Но на практике качество нагрева в основном зависит от конструкции печи. Если продвижение заготовки в печи осуществляется по водоохлаждаемым глассажным трубам, то

в месте контакта с трубами заготовка имеет пониженную температуру (на 20–60 °С), а при прокатке — бóльшую толщину, чем на более прогретых участках. На раскате появятся так называемые глассажные метки (утолщенные участки). При прокатке в следующем пропуске глассажные метки сохраняются, так как при прохождении через очаг деформации в этих местах обжатие и давление на валки выше, чем на остальной полосе. Это, по формуле Головина—Симса, ведет к дополнительной упругой деформации клетки. Известно, что уменьшить продольную разнотолщинность на глассажных метках можно путем расположения в печи глассажных труб в шахматном порядке. Наилучшее качество нагрева обеспечивается в методических печах с шагающими балками.

Вторая причина неравномерности температуры при прокатке — это разновременность прокатки полосы по длине. Если даже заготовка равномерно прогрета по длине, то температура разных участков металла в момент прокатки будет разной. Головная часть раската проходит через валки раньше, поэтому температура прокатки ее выше и толщина меньше, чем хвостовой части. Таким образом, толщина раската от головы до хвоста должна постепенно увеличиваться, образуя температурный клин. Важно подчеркнуть, что температурным клином называется не разность температур при прокатке полосы, а разность высот (для круга d_1), вызванная неравномерностью температуры прокатки.

На мелкосортных непрерывных станах разность температуры прокатки по длине составляет 20–70 °С, тогда как на линейных станах она может достигать 100–150 °С.

Необходимо отметить, что на сортовых станах последовательного типа, шахматных станах и др. часто меняется направление прокатки (то одним, то другим концом в клеть), поэтому температурный клин не проявляется. На мелкосортных станах допуски по точности проката по ГОСТу так велики, что температурный клин с запасом в них укладывается, и на большинстве станов, производящих прокат обычной точности, с ним никак не борются. Но при прокатке высокоточных профилей и горячекалиброванного профиля по 5-му классу точности или по ТУ температурный клин становится существенным. Заметим, что ГОСТ всегда будет отставать от ТУ и возможностей нового оборудования, поскольку он обязан ориентироваться на возможности существующего оборудования.

С нагревом металла связана также точность внутри партии проката. Необходимо стремиться к тому, чтобы все штанги одной партии металла были одинаковы по размерам и укладывались в одинаковое поле допусков, например в минусовое. На крупно- и среднесортных станах, как правило, печи имеют торцевое окно для выдачи нагретой заготовки. При движении толкателя на один шаг одна заготовка загружается в печь и одна нагретая выпадает в желоб приемного рольганга. Но бывают случаи, когда заготовки в томильной зоне печи привариваются друг к другу, и из печи выпадают две, а то и три заготовки одновременно. Соответственно температура прокатки этих заготовок будет различаться (до 150 °С), что отразится на средней высоте полос d_1 . Чтобы устранить такую разнотолщинность, необходимо в печи обеспечить некоторый зазор между заготовками, например, путем использования шагающих балок. На мелкосортных станах (см. рис. 13.3) вытаскиватель заготовки не связан с работой толкателя и обеспечивает вытаскивание только одной заготовки из печи.

13.3.5. Жесткость клетки

Из формулы Головина—Симса (13.2) следует, что с увеличением жесткости клетки M_k колебания силы прокатки меньше отражаются на толщине проката d_1 . Жесткость клеток мелкосортных и проволочных станов составляет 300—600 МН/мм, среднесортных — 500—900 МН/мм, крупносортных — до 1500 МН/мм. На средне- и мелкосортных станах жесткость недостаточна, чтобы прокатывать профили повышенной точности.

Точность вертикальных размеров проката позволила существенно увеличить предварительно напряженные 2-валковые клетки (ПНК). Рассмотрим одну из конструкций ПНК, применяемую на ЧерМК (рис. 13.18). В этих клетях верхняя и нижняя части разрезной станины 1, представляющие собой подушки валков 2, до прокатки стягиваются с помощью специальных болтов 5 с усилием P_1 (см. рис. 13.17), при котором гарантированно ликвидируются зазоры и люфты в соедине-

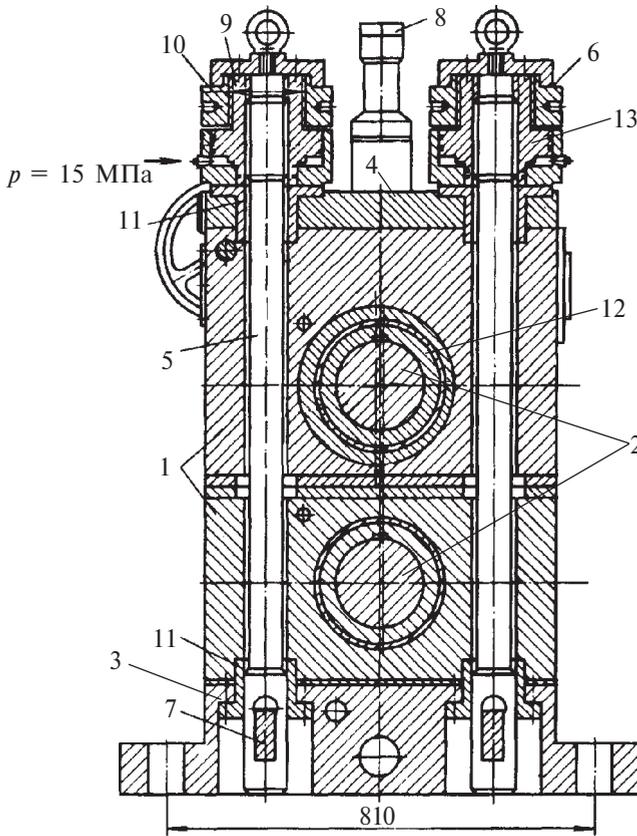


Рис. 13.18. Предварительно напряженная клеть ПНК-300/280:

1 — подушки; 2 — валки; 3 — основание; 4 — траверса; 5 — стяжной болт; 6 — гидрогайка; 7 — чека; 8 — грузозахватные устройства; 9 — гайка-поршень; 10 — гайка; 11 — полая втулка-штифт; 12 — эксцентриковая втулка; 13 — червячное колесо

ниях деталей подушек. Подушки предварительно сжимаются гидравлическими гайками 6. Зазор между валками регулируется эксцентриковыми втулками 12. Жесткость ПНК практически полностью определяется упругими характеристиками металла в местах сочленения узлов стягиваемых деталей, хотя еще остаются люфты в подшипниках валков и других контактируемых деталях. Жесткость ПНК достигает 1500–2000 МН/мм, поэтому можно прокатывать катанку с допуском $\pm 0,1$ мм, а более крупные профили — с точностью $\pm 0,2$ мм. Эксплуатация ПНК на стане 350 ЧерМК показала, что при прокатке круглых профилей вероятность попадания проката в поле допуска повышенной точности по ГОСТ 2590–71 составляет 92 %. В направлении вертикального диаметра, т. е. в направлении поджатия подушек валков, точность можно стабилизировать на уровне допуска $\pm 0,1$ мм. Но в горизонтальном направлении точность проката не улучшается. Причем установка двух или трех скантованных на 90° клетей практически не улучшает точность круглого проката, так как в процессе прокатки штанга постоянно вращается. Применение подряд нескольких ПНК эффективно при прокатке квадратных, полосовых или фланцевых профилей.

В общую высотную упругую деформацию клетки значительную долю вносит изгиб валков. Он зависит от длины валков и при обычных отношениях длины к диаметру $L/D = 2-3$ может составлять до 40–60 % общей деформации. Эта часть деформации не устраняется в ПНК. Чтобы ее уменьшить, необходимо сокращать длину валков или устанавливать дополнительные опорные валки.

Применение 3-валковых клетей фирмы “Кокс” дает возможность производить горячекалиброванный круглый прокат не только за счет применения рациональной схемы прокатки, описанной ранее, но и за счет высокой жесткости клетей. При хорошем исполнении в 3-валковой клетке практически полностью отсутствуют люфты. Сама станина представляет собой жесткую толстостенную трубу, упругая деформация которой минимальна.

13.4. Система автоматизированного управления толщиной проката

Одно из перспективных направлений увеличения точности сортового проката связано с разработкой автоматизированных систем стабилизации параметров прокатки в процессе деформации. Система автоматизированного регулирования толщины (САРТ) в процессе прокатки автоматически изменяет зазор между валками S , так чтобы при изменениях усилия прокатки P толщина полосы (для круглого проката размер d_1) оставалась постоянной. Система должна содержать измеритель силы прокатки. По ее колебаниям вычисляется и автоматически осуществляется необходимая корректировка зазора между клетями.

Такая система была внедрена на непрерывном стане 300-2 ЧелМК для производства рессорной стали. Основной недостаток ее состоит в том, что изменение давления фиксируется в одной клетке, а коррекцию зазора приходится выполнять уже в следующей клетке.

Запаздывание устраняется в системах, где исходным датчиком является измеритель температуры проката. Измерив температуру на входе в клетку, по соответствующим формулам система вычисляет ожидаемую силу прокатки, затем требуемый зазор. Он автоматически устанавливается до подхода металла

к клетки. Для повышения надежности система должна иметь обратную связь: на выходе должны быть измерители четырех диаметров проката, показания которых в блоке сравнения сравниваются с расчетными значениями. По результатам осуществляется адаптивная корректировка модели, по которой производятся расчеты.

В листовом производстве подобные системы широко применяются, но при производстве сорта они внедряются с трудом. Внедрение сдерживается отсутствием надежных средств регистрации размеров проката в процессе прокатки. Кроме того, система, использующая в качестве датчика температуру проката, не может обрабатывать разнотолщинность проката, возникающую не из-за температуры, а, например, из-за разнотолщинности исходной заготовки, влияния натяжения и т. п. Необходимо учесть также, что САРТ дорога для сортовых станов. Ее использование оправдывается только при производстве однотипной продукции в большом объеме. Для сортопрокатного производства, наоборот, характерна тенденция к переходу к малотоннажным партиям проката и разнообразию его сортамента, где САРТ невыгодна.

13.5. Технические средства измерения размеров сортового проката в процессе прокатки

Выше неоднократно отмечалось, что отсутствие на станах надежной системы измерения проката в процессе его прохождения через клетки сдерживает повышение его точности. В технологической практике накоплен значительный опыт разработки и внедрения таких систем измерения. Обзор отечественной и зарубежной литературы показал значительное разнообразие конструктивных и приборных решений, методов и средств измерения размеров сортового проката. Наиболее совершенными и перспективными являются лазерные измерители, которые отличаются высокой точностью как на холодном, так и на горячем металле, малой погрешностью измерения в большом диапазоне скоростей прокатки, длительностью срока службы.

Особенно активно разрабатывают средства автоматического измерения проволоки и сорта зарубежные фирмы, такие как Davy United, BETA (Великобритания), Vredo Richter и Институт д-ра Ферстера (Германия), Zugo (США) и др. На европейских прокатных станах распространен английский измеритель ORBIS, имеющий несколько модификаций и позволяющий производить измерения

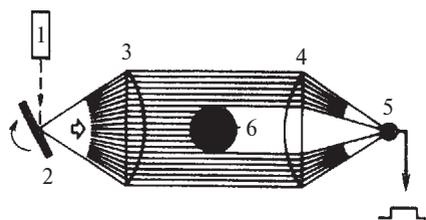


Рис. 13.19. Схема измерения диаметра сортового проката в измерителе ORBIS

с точностью $\pm 0,04$ мм. В модификации OR2 (рис. 13.19) в измерительной головке, вращающейся со скоростью 100 об/мин, с помощью зеркала 2 и линзы 3 формируется параллельный световой лазерный луч шириной 100 мм. Через каждый оборот видеосигнал подается на прокат 6 и воспринимающие фотодиодные линейки 4, сигнал от которых обрабатывается в электронном блоке измерителя 5. Данные представляются на цифровом табло и на экране дисплея.

Из отечественных приборов следует отметить измерители размеров сортового металла ТАИР-1–5 и ТАИР-2–6. Последний из них позволяет измерять размеры проката диаметром 35–65 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью $\pm 0,1$ мм на скоростях прокатки не выше 15 м/с при температуре до 1150 °С. Имеется возможность настраивать прибор на разные диапазоны измерений. Такие приборы используются в основном пока на станках трубной промышленности. На мелкосортном проволочном стане 150 завода “Серп и молот” установлен измеритель ORBIS. Имеются попытки установить такой же измеритель на стане 350 ЧерМК.

Таким образом, средства измерения и контроля размеров проката существуют, хотя их технический уровень, дороговизна и сложность эксплуатации не позволяют говорить о массовом применении в сортовом производстве. Сортопрокатное производство еще не готово к широкому внедрению таких измерителей: технологические условия прокатки на большинстве станов недостаточно стабильны, ГОСТ 2590–88 не стимулирует прокатку высокоточных профилей.

Большое значение имеет существующая организация производства. По традиции сортовая продукция рассматривается как некий полуфабрикат, из которого в дальнейшем, в случае надобности, точный прокат может быть получен множеством способов, например волочением (холодным калиброванием) или обточкой, шлифовкой и т. п. За рубежом и в России существуют мини-заводы, которые скупают неточный сортовой металл у металлургических заводов и производят точный прокат под конкретного потребителя в нужном ассортименте. При этом в число сервисных операций может входить также снятие окалины с поверхности металла, резка на мерные длины, подторцовка кромок, снятие фасок, сортировка и т. д. Такая организация производства выгодна как машиностроительным заводам, имеющим всегда возможность получить, пусть немного дороже, требуемый металл необходимой кондиции, так и металлургическим заводам, которые в таком случае не обязаны выполнять разнообразные требования конкретных заказчиков по точности и качеству проката.

Некоторые металлургические заводы пошли по пути производства точного проката непосредственно в прокатном цехе. В линии прокатного стана устанавливают различное оборудование, которое позволяет из неточного получать точный прокат. Например, широко применяются немецкие линии Kieserling, на которых прокат после горячей прокатки обдирается в холодном состоянии наждачными кругами или резцами на определенную глубину. Получается идеально круглый прут с допусками $\pm 0,1$ мм и со свободной от окалины поверхностью. Это дорогая операция, но, может быть, не дороже внедрения автоматизированных систем и калибрующих блоков.

В целом же следует считать, что внедрение автоматических измерителей и автоматизированных систем управления точностью проката в сортопрокатное производство эффективно. Оно позволяет:

- снизить трудозатраты и устранить ручной труд при отборе проб;
- обеспечить объективный автоматизированный контроль проката в процессе прокатки;

- наладить систему статистической оценки размеров и точности проката с расчетом и выдачей потребителю объективных размеров и показателей разнотолщинности;

накапливать статистический материал по точности и анализировать его; обеспечить объективную оценку мероприятий, направленных на увеличение точности;

организовать грамотную систему отбраковки проката по точности;

построить оперативную систему информации персонала о ходе технологического процесса по параметрам точности;

построить систему сбора и обработки информации на уровне требований международной системы качества ИСО 9000, выполнение которых является обязательным при выходе с продукцией на мировой рынок.

Как видно, такая культура производства значительно выше традиционной, поэтому объективно сортопрокатное производство в этом направлении будет развиваться, несмотря на то что стоимость проката будет расти. Трубное и особенно листопрокатное производство в этом направлении продвинулось значительно дальше, чем сортопрокатное.

Пока основными потребителями сортового металла являются российские предприятия, и нет потребности выходить на мировой рынок. По этой причине, видимо, нет стимула к активному внедрению статистических методов измерения и контроля размеров продукции, а также сложных автоматизированных измерительных приборов и систем.

13.6. Точность при прокатке на непрерывных станах

На непрерывном стане полоса находится сразу во многих клетях, поэтому необходимо поддерживать постоянство секундного объема металла:

$$F_i V_i = \text{const.}$$

Произведение $F_i V_i$ называется константой стана. При современном состоянии средств управления главными приводами константу точно выдержать невозможно по разным причинам: влияет износ калибров, неизбежны отклонения от средних значений по размерам заготовки, температуре металла, скорости прокатки, режимам натяжения и т. д. Все это приводит к тому, что прокатка полосы на непрерывном стане осуществляется в одном из трех возможных режимов: с подпором, с петлей или с натяжением. Каждый из режимов имеет свои преимущества и недостатки. Режимом прокатки определяются технология прокатки, состав оборудования, технико-экономические показатели, а также средства управления непрерывным станом. В связи с этим на стане заранее определяют, какой из режимов будет использован при прокатке, и при другом режиме этот стан уже работать не может.

Прокатка с петлей или подпором возникает тогда, когда скорость каждой последующей клетки меньше, чем требуется по условию постоянства объема. Прокатка с подпором возможна только на крупных станах или в черновых клетях средне- и мелкосортных станов, когда раскат имеет большую площадь поперечного сечения. По мере уменьшения сечения подпор приводит к образованию петли.

Подпор вреден по многим причинам. Поскольку каждая последующая клеть вращается медленнее, чем необходимо по константе, то предыдущая клеть

через полосу заставляет ее вращаться с требуемой скоростью. При этом предыдущая клеть работает с удвоенным моментом, а нагрузка на двигатель последующей клетки падает практически до 0. Кроме того, работать с подпором, как и с петлей, практически не удобно. Когда в валки задается вторая заготовка вслед за первой, то просвет между заготовками после каждой клетки сокращается. Чтобы в какой-то клетке в одном калибре не встретились две заготовки, необходимо первоначальный просвет между ними делать достаточно большим. При этом теряется производительность стана. Без автоматического прибора, задающего ритм выдачи заготовок из печи, прокатка становится невозможной.

В черновой группе клетей предпочитают работать с небольшим натяжением полосы между клетями. В этом случае неопасна и удобна задача в первую клетку заготовок встык одна за другой. Расстояние между ними в последующих клетях будет только увеличиваться. Производительность стана максимальна, легко налаживается стабильная, ритмичная работа. Привода всех клетей работают в нормальном режиме. При возможном внезапном нарушении константы стана оператор вручную легко корректирует скорости стана, предотвращая появление подпора и набегание последующей полосы на предыдущую.

В чистовой группе клетей возможны режимы прокатки с натяжением и петлей. Выбор режима теснейшим образом связан со способом управления процессом и оборудованием стана. При прокатке с натяжением значение натяжения не постоянно по длине полосы. При прохождении переднего конца заготовки через клетки натяжение с передней стороны отсутствует, затем в середине полосы переднее и заднее натяжения стабилизируются, а задний конец вновь прокатывается без натяжения. Непостоянство натяжения оказывает влияние на размеры профиля: средняя часть полосы имеет меньшую высоту и ширину, чем концевые участки. Чем больше натяжение, тем больше разница в размерах концов и середины. Это самый существенный недостаток прокатки с натяжением. Протяженность концевых участков зависит от расстояния между клетями и обжатий в них.

Например, на мелкосортном стане 250 (см. рис. 13.3) рассогласование скоростей соседних клетей на 2 % приводит к разнице площадей поперечного сечения в середине и на концах круглого профиля на 1,5 %. При прокатке круга диаметром 16–25 мм допустимое рассогласование скоростей составляет 1,0–2,5 %. При рассогласовании скоростей на 2,5 % размеры полосы на концах будут находиться на пределе плюсовых, а в средней части на пределе минусовых допусков. На стане 250 средняя часть составляет 90–96 % всей длины, а остальные 4–10 % приходятся на утолщенные концы, которые необходимо продавать другому потребителю.

Кроме того, при захвате валками очередной заготовки возникают динамические нагрузки на привод клетки. В переходном процессе происходит мгновенное уменьшение, а затем резкое увеличение скорости главного привода. Затем в течение 0,5–1,0 с процесс успокаивается по затухающей синусоиде. Таким же образом меняется межклетевое натяжение, а через него по обратной синусоиде меняется сила прокатки. По этой причине часть полосы получает дополнительную продольную разнотолщинность (см. формулу Головина—Симса (13.2)). А если прокатка ведется в несколько ниток, то динамические нагрузки при захвате одной заготовки отразятся на размерах другой прокатываемой заготовки.

Чтобы поддерживать необходимое рассогласование скоростей в заданных пределах, на стане необходима система автоматического регулирования натяжения (САРН). Для ее работы используют датчики, с помощью которых вырабатывается сигнал о величине натяжения. Их размещают между клетями на роликах, которые в момент начала прокатки должны всплывать из-под настила и создавать определенный перегиб натянутой полосы. По усилию, действующему на ролик, можно вычислить силу натяжения. После прокатки полосы ролик вновь убирается под настил, чтобы не мешать следующей полосе. Как видно, режим работы регулятора натяжения сложен и не очень надежен. По мере совершенствования САРН надежность его работы увеличивается. Также сокращается поле допусков на прокат, уменьшается длина концевых участков.

Более надежны САРН, в которых в качестве первичного сигнала используется нагрузка на привод клетей. Здесь перегибные ролики отсутствуют. При изменении натяжения между клетями нагрузка на привод перераспределяется, что служит основанием для корректировки скоростей стана. Но изменение нагрузки на привод может быть вызвано не только изменением натяжения, поэтому такая система регулирования натяжения также имеет свои недостатки.

Важным преимуществом прокатки с натяжением является возможность длительного рассогласования скоростей смежных клетей. При изменении технологических условий прокатки натяжение между клетями может измениться. Это приводит к тому, что соотношение между зонами опережения и отставания в очаге деформации клетки также изменится. Если, например, увеличится переднее натяжение, то увеличится зона опережения и уменьшится зона отставания. Силы трения в зоне опережения, направленные против хода прокатки, возрастут, а противоположно направленные силы трения в зоне отставания уменьшатся. Их равнодействующая увеличится в направлении против хода прокатки и уравновесит возрастание силы переднего натяжения. Очаг деформации вновь окажется в состоянии равновесия, процесс прокатки стабилизируется автоматически. Таким образом, прокатка с натяжением способна к саморегулированию, автоматически поддерживая в равновесии систему полоса—валок.

Возможности саморегулирования процесса прокатки с натяжением ограничены. При переднем натяжении нейтральное сечение в очаге деформации смещается в сторону входа металла в валки, зона опережения растет. В предельном случае она займет всю длину дуги захвата и двигатель клетки будет работать в генераторном режиме, а подвод всей энергии для деформации будет осуществляться через полосу от следующей клетки. В другом предельном случае заднее натяжение достигает значений, когда зона отставания простирается на весь очаг деформации, и происходит пробуксовка полосы относительно валков.

При прокатке с петлей отсутствует силовое воздействие клетей на полосу, поэтому исключается одна из причин продольной разнотолщинности. Отклонение размеров профиля от номинала может быть доведено до $\pm 0,2$ мм. При этом можно прокатывать полосу в минусовом допуске по всей длине. Это позволяет использовать такой прокат на метизных заводах для производства крепежных изделий на станках-автоматах, а также при волочении для производства калиброванного проката и проволоки.

Однако процесс прокатки с петлей проходит очень неустойчиво. Малейшие изменения условий прокатки приводит к быстрому увеличению или уменьшению петли. Главный недостаток состоит в том, что при прохождении через клети двух соседних заготовок расстояние между ними сокращается и возникает опасность набегания одной полосы на другую. Необходимо обеспечить достаточную паузу между заготовками, чтобы этого не произошло. Кроме того, при прохождении заднего конца полосы через клетку требуется дополнительное время для того, чтобы петля целиком прошла через клетку. И чем больше петля, тем больше пауза между раскатами. При ручном управлении устанавливают максимальную паузу, значительно теряя в производительности. При наличии надежных средств автоматического регулирования петли с высоким быстродействием системы величины петли и паузы между заготовками могут быть значительно сокращены. Однако по надежности работы петлерегуляторы уступают регуляторам натяжения. Получаемая выгода от увеличения точности проката не окупается из-за низкой производительности и невысокой надежности прокатки.

Таким образом, рациональными признаны следующие режимы прокатки. При ручном управлении станом в черновой и чистовой группах клетей прокатку ведут с натяжением, прокат занимает все поле допусков на обычный прокат по группе В ГОСТ 2590–88. При автоматическом управлении в черновой группе прокатывают в режиме натяжения полосы, а в чистовой — с петлей при строгом регулировании петли в узких пределах. Прокат выпускается по категории повышенной точности.

На непрерывных станах на точность проката оказывает влияние число прокатываемых ниток. На проволочных станах в черновых клетях ведут прокатку в четыре нитки, на мелкосортных — в две. Многониточность позволяет увеличить производительность стана, но отрицательно отражается на точности проката. Когда в клети находится одновременно n заготовок, то по формуле Головина—Симса (13.2) упругая деформация клети должна соответствовать силе прокатки nP . Кроме того, изгиб валков будет определяться распределением n сил по длине бочки валка. Но когда заготовки поступают в клети с некоторым разрывом, возможны случаи прокатки $(n - 1)$ и меньшего количества заготовок. При этом упругие деформации клети уменьшаются, сила прокатки снижается и высота всех прокатываемых полос также уменьшается. Кроме того, динамические нагрузки, возникающие при захвате одной заготовки, отражаются на точности остальных прокатываемых полос. Возникающая при этом продольная разнотолщинность будет повторяться во всех последующих клетях, так как на утолщенных участках обжатие и сила прокатки будут выше, чем на остальной полосе. Разнотолщинность до конца прокатки не исправляется и сохраняется на конечном профиле, несмотря на то что прокатка в чистовой группе клетей проводится в одну нитку.

Следует заметить, что наихудшие условия возникают при прокатке в две нитки. В этом случае нагрузка изменяется от P до $2P$, т. е. в два раза. Если число ниток увеличить, например, до четырех, то с большой вероятностью скачок усилия будет только в пределах $3P$ – $4P$. В процентном соотношении продольная разнотолщинность будет меньше.

Чтобы устранить разнотолщинность, вызываемую многониточностью, увеличить производительность стана, а также исключить динамические нагрузки

при захвате полосы валками, строят станы бесконечной прокатки. Один из таких станов, построенный на Западно-Сибирском металлургическом комбинате (рис. 13.20), при скорости прокатки 20 м/с производит круглые, квадратные и угловые профили № 2—4. Заготовка 80×80, выдаваемая из печи, с помощью трайбаппарата транспортируется к стыковочной машине. Перед сваркой с торцов заготовки сбивается окалина. Сварка осуществляется за счет частичного оплавления металла на торцах заготовок и сжатия их под большим давлением. Образующийся при этом наплыв (грат) снимается гратоснимателем. После сварки процесс прокатки становится “бесконечным”. Так как сварочная машина стационарна, то после сварки установлен отапливаемый петлевой колодец с определенным запасом металла, который расходуется на стане в тот момент, когда осуществляется сварка. Секционная тоннельная индукционная печь служит для компенсации потерь тепла перед прокаткой.

В черновой и промежуточной клетях прокатка ведется в две нитки с натяжением, в чистовой — в одну нитку с петлей. Отличительной особенностью стана является наличие в чистовой группе комбинированных рабочих клеток, т. е. таких клеток, которые могут иметь вертикальное или горизонтальное расположение валков в зависимости от схемы прокатки профиля. Готовая продукция выпускается либо в прутках, либо в бунтах. Прутки после охлаждения на реечном холодильнике охлаждаются и правятся и затем нарезаются на мерные длины. Бунтовой прокат после смотки охлаждается сначала на пластинчатом, затем на крюковом конвейерах и поступает на склад готовой продукции.

Как видно, технология прокатки на станах бесконечной прокатки сложна и осуществима только тогда, когда процесс прокатки стационарен, когда прокатывается один профиразмер, ничто не ломается и не перенастраивается. Бесконечная прокатка позволяет решить одни проблемы, но создает множество других, особенно организационных. При любых остановках стана прихо-

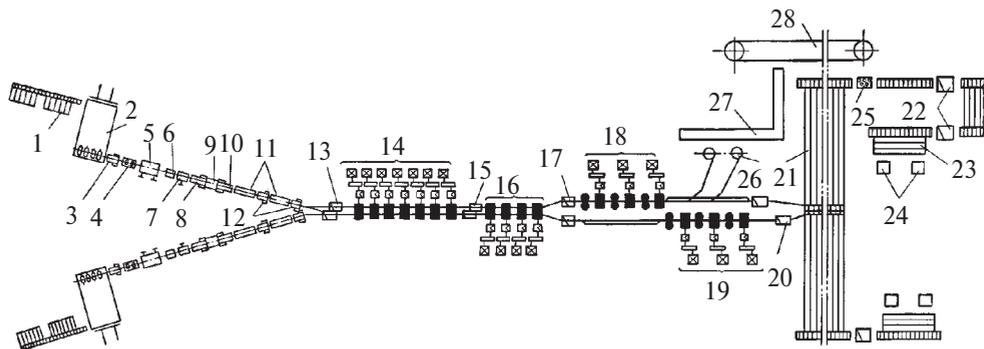


Рис. 13.20. Мелкосортный двухниточный стан 250 бесконечной прокатки:

1 — загрузочные решетки; 2 — нагревательная печь; 3, 8, 10, 12 — трайбаппараты для транспортировки металла; 4 — окалиноломатель; 5 — сварочная машина; 6 — гратосниматель; 7 — корректирующее устройство; 9 — петлевой колодец; 11 — индукционная печь; 13 — делительные ножницы; 14 — черновая группа клеток; 15, 17 — аварийные ножницы; 16 — промежуточная группа клеток; 18, 19 — чистовые группы клеток; 20 — летучие ножницы; 21 — реечный холодильник; 22 — ножницы холодной резки; 23 — карманы; 24 — пакетовязательные машины; 25 — роликотправильная машина; 26 — моталки; 27 — пластинчатый конвейер; 28 — крюковой конвейер

дится освобождать клетки от металла, разрезая его на мелкие части, которые затем отправляются в шихту. Достоинства стана полностью нивелируются. Качество сварки также оказалось невысоким, а место сварки на готовом прокате проконтролировать не удается. В связи с этим рассматриваемый прокатный стан 250 в настоящее время работает как обычный стан на поштучной заготовке без участия сварочной машины.

За 1966–1972 гг. на металлургических предприятиях страны введено в эксплуатацию пять мелкосортных и четыре проволочных бесконечных станов. На мелкосортном стане 350-2 МакМК сварка встык заготовки 100×100 мм осуществляется на ходу, на стане 250 ЗСМК сваривают заготовку 80×80 мм на стационарной установке с использованием петлевого колодца. Исследования показали, что эффективность бесконечной прокатки повышается с уменьшением сечения заготовки, а при использовании заготовки выше 120×120 мм эффективнее поштучная прокатка. Поэтому на новых станах (250-6 Криворожстали при заготовке 150×150 мм и скорости до 25 м/с и на Белорецком МК, использующем заготовку 200×200 мм, прокатывающем на скорости до 50 м/с) использован поштучный вариант прокатки.

В последние годы за рубежом вновь возвращаются к идее бесконечной прокатки. Разработано несколько установок для стыковой сварки круглых заготовок (система EBROS) для Финляндии, Китая и других стран.

Итальянская компания Danieli Morgardshammar возродила бесконечную прокатку со сваркой встык квадратных заготовок после выхода их из печи. При этом был полностью заменен сварочный узел, сконструирована новая система центровки заготовок перед сваркой, улучшено качество реза заготовки перед сваркой и разработан ряд других усовершенствований. Показано, что все имеющиеся на существующих станах бесконечной прокатки недостатки устраняются за счет конструктивных решений. С 2000 г. три бесконечных стана конструкции этой фирмы работали на предприятиях Китая, Кореи и США и строились еще четыре стана.

Решая проблему бесконечной прокатки, фирма Danieli (Италия) разработала также новый литейно-прокатный комплекс (ЛПА) для прокатки сортового металла. Первый такой комплекс (названный в России лунным станом от слов Luna Endless Casting and Rolling) на производство 500 тыс. т сортового проката по кругу 15–100 мм из заготовки 200×160 мм был построен в Италии в 2000 г. После НЛМЗ в линии установлена проходная туннельная печь и далее непрерывный прокатный стан и либо редуционно-калибровочный стан — для специальных сталей, либо проволочная группа — для катанки из углеродистых сталей. Особенностью стана является сверхвысокая скорость литья (до 6,5 м/мин), минимальные простои при перевалках, которые осуществляются в автоматическом режиме за 5 мин, широкое использование различных термических операций в линии стана (отжиг, закалка, замедленное охлаждение, контролируемая прокатка), высокий уровень автоматизации управления. Стан обладает высокой гибкостью, и малотоннажные заказы для него выгодны (по традиционной технологии заказы менее 30–40 т невыгодны).

При значительных достижениях в области автоматического управления приводами за счет совершенствования конструкции основных узлов стана стало возможным переходить на однопиточную прокатку. На новых однопиточ-

ных проволочных станах скорости прокатки увеличены до 100–120 м/с и выше, поэтому почти ту же производительность, что и на четырехниточном стане (до 300–400 тыс. т/год), достигают за счет высокой надежности работы автоматики при сверхвысоких скоростях прокатки в одну нитку.

Фирмы-изготовители рекламируют новое оборудование с новой компоновкой. Рекомендуется температура конца прокатки 750 °С, что достигнуть при высоких скоростях трудно. Обычно она в чистовой группе клетей возрастает и находится в районе 1050 °С. На современных непрерывных проволочных и мелкосортно-проволочных станах скорости прокатки достигают 90–100 м/с, новые станы проектируются на скорости 120–150 м/с, имеются намерения увеличить скорости до 160–180 м/с. При таких скоростях очень велики силы инерции и межклетевые динамические силы, которые нарушают равновесие очага деформации, и стабильность прокатки снижается.

На новых строящихся мелко-, среднесортных и проволочных станах значительные успехи достигнуты по точности проката. Сужения поля допусков добились за счет:

уменьшения частных обжатий в последних проходах до 4–16 %;

применения компактных блоков клетей высокой жесткости в 2-, 3- и 4-валковом исполнении, допускающих настройку под нагрузку;

применения устройств для быстрой перевалки.

Широко применяются предчистовые и чистовые блоки из четырех-восьми 3-валковых клетей фирмы Kocks, которыми оснащено уже более 40 станков. Блоки позволяют прокатывать круглый прокат с допуском $\pm 0,1$ мм. На автоматическую настройку валков уходит не более 1 мин, перевалка (замена) блока занимает 5 мин.

Одним из резервов повышения точности и качества проката в последнее время становится математическое моделирование технологии прокатки на стане. Так, в Институте обработки давлением технического университета Фрайбергской горной академии (Германия) разработана комплексная математическая модель прокатки прутков и катанки в широком диапазоне технологических параметров и по различным системам калибровки. Аналогичные модели разрабатываются в Горном университете в Леобене (Австрия). Здесь на основе метода конечных элементов созданы модели регулирования размеров подката для получения катанки с допусками, укладываемыми в заданное поле. Математические модели создаются для процессов нагрева, горячей прокатки и охлаждения, что позволяет выбирать в ходе технологического процесса оптимальные параметры, обеспечивающие получение требуемых свойств и качества проката.

13.7. Прокатка на непрерывных проволочных станах

Все проблемы многониточной непрерывной прокатки, связанные как с точностью проката, так и со структурой и свойствами металла, более остро стоят при прокатке на современных проволочных станах. Катанка имеет минимальный диаметр, который можно получить на стане горячей прокатки. Чем он меньше, тем меньше переходов требуется при дальнейшей ее переработ-

ке — холодном волочении проволоки. В настоящее время на непрерывных станах производят катанку диаметром 5,0 мм и выше. Минимальный диаметр зависит от конструкции стана, жесткости клетки, количества клеток и температурных условий прокатки. Максимальный диаметр катанки 12 мм. По точности проката требования к катанке выше, чем к обычному сортовому металлу. Необходимо укладываться в жесткие допуски, которые на современных станах составляют $\pm 0,2$ мм и меньше, иначе волочение катанки протекает нестабильно.

Особенно сложны требования к процессу прокатки катанки по температуре. Напомним, что для доэфектоидных углеродистых сталей с содержанием углерода от 0,1 до 0,7 % металл прокатывается полностью в области аустенита. Прокатка начинается при температурах на 50–100 °С ниже линии солидуса и заканчивается при температурах выше линии A_{c3} (по диаграмме железо—углерод — см. рис. 9.6). Причем чем выше температура аустенита, тем однороднее его структура, необходимая для формирования однородной структуры перлита при охлаждении катанки. Однако при этом растет величина зерна аустенита и перлита. На непрерывных проволочных станах температура конца прокатки лежит обычно в интервале 1000–1060 °С.

Смотка катанки в бунт должна быть осуществлена после полного распада аустенита, т. е. при температурах ниже A_{c1} , ниже 700 °С. Иначе неравномерное остывание витков бунта приведет к разной структуре металла. Для катанки разброс свойств по длине не должен превышать 5–10 %, иначе волочение становится невозможным. Установлено, что для последующего волочения среднеуглеродистых сталей по сочетанию прочностных и пластических свойств наилучшей является структура сорбита, т. е. структура, в которой равномерно распределены мелкие зерна феррита и зерна с тонким глобулярным или мелкопластинчатым перлитом.

В 1962 г. в США фирмой “Морган” был запатентован на высокоскоростном проволочном стане способ достижения сорбита, который назван стилмор-процессом (в литературе можно встретить также написание “стелмор”). Сущность его состоит в том, что от температуры конца прокатки до 750–800 °С металл охлаждается быстро в трубах с охлаждающей водой (скорость охлаждения — сотни градусов в секунду), затем с помощью виткообразователя проволока собирается в витки, которые укладываются с перекрытием на движущийся цепной транспортер, где катанка охлаждается в вентиляционных камерах воздухом со скоростью 12–20 град/с до температуры 350 °С. Дальше витки собирают в бунт, который затем опрессовывается, обвязывается и направляется на крюковой конвейер для охлаждения.

Такая двухступенчатая технология охлаждения катанки позволяет получить структуру сорбита закалки, который имеет мелкодисперсные пластинчатые зерна перлита. Она обеспечивает равномерные и высокие пластические и прочностные свойства металла по длине, что необходимо для последующего волочения проволоки. Кроме того, на стадии быстрого охлаждения сокращается в несколько раз толщина слоя окалина, а состав окалина такой, что сравнительно легко удаляется с поверхности перед волочением путем травления в кислоте.

Однако чем выше скорость прокатки на стане, тем длиннее участок охлаждения металла по режиму “стилмор”, и на некоторых станах длина его

доходит до 90 м. Второй недостаток состоит в том, что система охлаждения катанки на этапе воздушного охлаждения не может обеспечить равномерное остывание всех участков витков, поэтому свойства по длине неравномерны.

Стилмор-процесс непрерывно совершенствовался, появилось много его разновидностей. Появились установки, которые позволяют, во-первых, обеспечивать равномерное распределение температуры по образующей витков, во-вторых, регулировать скорость охлаждения металла на участке воздушного охлаждения. На этом участке устанавливаются теплоизоляционные крышки, которые позволяют уменьшать или увеличивать скорость охлаждения, что важно для прокатки разных марок стали. Известны установки, на которых вторая стадия охлаждения осуществляется в баках с горячей водой, содержащей поверхностно-активные добавки, которые увеличивают стабильность паровой рубашки вокруг катанки и тем самым замедляют процесс ее остывания. Все эти меры направлены на то, чтобы получить структуру сорбита, т. е. мелкого феррита с глобулярным перлитом, в котором частицы цементита имеют форму мелких глобулей, что повышает пластичность готового металла при его высокой прочности.

В 1968 г. фирма “Шлеманн” (ФРГ) предложила одностадийную технологию охлаждения катанки. В трубах с водой металл охлаждается до 650 °С и затем витками, не перекрывающими друг друга, раскладывается на пластинчатом транспортере. Последующее воздушное охлаждение не применяется, поэтому длина хвостовой части стана сокращается. Необходимая скорость охлаждения катанки достигается за счет более свободного размещения витков на пластинчатом конвейере. Такая технология внедрена на проволочном стане 250 Западно-Сибирского металлургического комбината. При одностадийном процессе не допускается образование мартенсита в поверхностных слоях, распад аустенита происходит при температурах 550–660 °С.

Рассмотрим работу непрерывного четырехниточного стана 150 ЧерМК (рис. 13.21), который работает по двухступенчатой технологии “стилмор” с самыми последними усовершенствованиями процесса. Первичное охлаждение после прокатки осуществляется в трубах с водой до 700 °С, при этом температура катанки по сечению неравномерна. Затем с помощью виткообразователя формируются и равномерно укладываются на пластинчатый транспортер витки катанки, в которой сначала происходит выравнивание температуры по сечению при охлаждении воздухом со скоростью 10–20 град/с и затем распад аустенита.

В процессе быстрого охлаждения в трубах скорости охлаждения поверхности и сердцевины катанки различаются (рис. 13.22, кривые 3 и 4 соответственно). При температуре 600–650 °С на пластинчатом транспортере происходит выравнивание температур по сечению, а при температуре 500–600 °С, при которой на термокинетической диаграмме (ТКД) распада аустенита наблюдается самый короткий промежуток времени начала и конца распада, достигается полное превращение аустенита.

Скорость охлаждения катанки определяет разницу в температуре поверхностного и внутреннего слоев. Чем она выше, тем больше степень переохлаждения аустенита во внутренних слоях, тем выше дисперсность структуры образовавшегося перлита и тем выше свойства сорбита, предназначенного для последующего волочения.

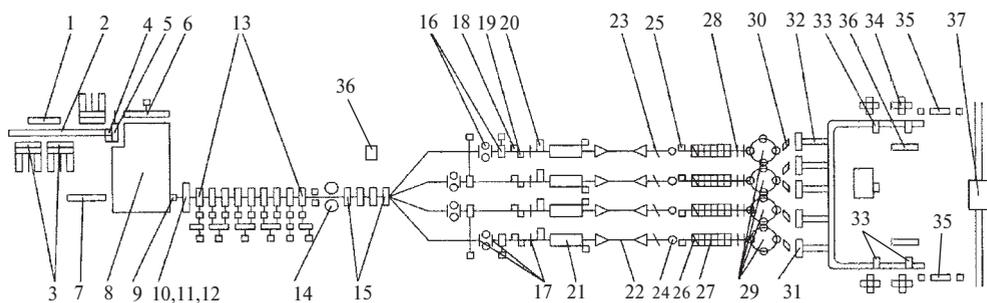


Рис.13.21. Непрерывный четырехниточный проволочный стан 150
ОАО “Северсталь”:

1 — сбрасыватель бракованной заготовки; 2 — подводящий рольганг; 3 — загрузочная решетка; 4 — весы; 5 — втаскиватель заготовки; 6 — толкатель; 7 — выталкиватель заготовки; 8 — методическая печь; 9 — аварийный вытаскиватель; 10 — распределительное устройство; 11 — задающее в клеть устройство; 12 — обрывные ножницы (аварийные); 13 — черновая группа клетей; 14 — аварийные ножницы; 15 — первая промежуточная группа клетей; 16 — вторая промежуточная группа клетей; 17 — петлерегулятор; 18 — крошительные ножницы (резка при застревании раската в блоке); 19 — летучие ножницы (резка переднего конца); 20 — обрывные ножницы (резка при аварии в блоках); 21 — 8-клетевой чистовой блок; 22 — установка для охлаждения водой; 23 — ножницы для обрезки концов; 24 — трайбаппарат; 25 — скрапные ножницы для резки отрезанных концов; 26 — виткообразователь; 27 — сетчатый пластинчатый транспортер; 28 — накопитель витков (моталка); 29 — круг поворотный; 30 — переключдающее устройство; 31 — установка для укладки витков; 32 — транспортер шаговый; 33 — устройство передачи мотков; 34 — накопитель мотков; 35 — пакетирующий мотков; 36 — бракомоталка; 37 — передаточная тележка

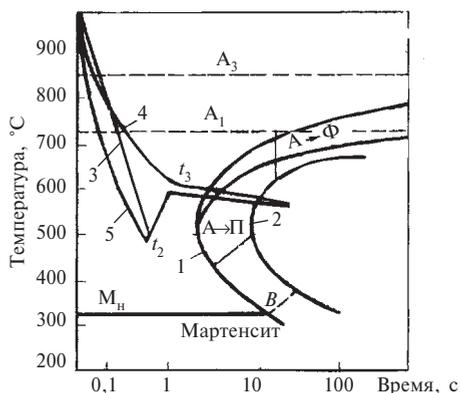


Рис. 13.22. Диаграмма изотермического распада аустенита и кривые охлаждения катанки на стане 150 и при ускоренном охлаждении:

A — аустенит, Ф — феррит, П — перлит, B — бейнит; 1, 2 — кривые начала и конца распада аустенита, 3, 4 — кривые охлаждения соответственно поверхности и центра катанки; 5 — кривая охлаждения поверхности при ускоренном охлаждении

Стан 150 предназначен для прокатки катанки диаметром от 5,5 до 12 мм обычной и повышенной точности по ГОСТ 2590–88 из заготовки 100×100 длиной от 10 до 11,8 м из углеродистых, низколегированных и легированных марок стали. После реконструкции стана масса выпускаемого бунта увеличена до 2,5 т.

После нагрева заготовка с помощью распределительного устройства задается в одну из четырех линий прокатки черновых клетей. В промежуточной линии прокатка ведется в две, а в чистовой — в одну нитку. Чистовая группа клетей состоит из восьми пар шайб диаметром 170 мм, изготовленных из твердого сплава. Твердосплавные валки (шайбы, надетые на стальную ось) имеют износ значительно меньше обычных валков. Это позволяет жестко стабилизировать все параметры прокатки в чистовой группе. Все валки объединены в блок с приводом от одного двигателя с жестким распределением скоростей по клетям в соответствии с константой. Прокатка ведется без натяжения с небольшим петлеобразованием. Кроме того, строго стабилизирована температура прокатки по клетям. Четкое выдерживание температуры конца прокатки позволяет также стабилизировать систему охлаждения катанки строго по изложенной выше технологии. Катанка, получаемая на стане, отличается повышенной точностью, стабильностью свойств и структуры (сорбита) как в пределах одного бунта, так и между бунтами. Колебания механических свойств по длине катанки составляют $\pm 3\%$. Количество окалины сокращено до 2–6 кг/т.

Получение в структуре высокоуглеродистой катанки сорбитообразного перлита позволяет исключить дорогостоящую операцию патентирования в волочильных цехах. Образование сорбита связано с превращением переохлажденного аустенита по диффузионному механизму с образованием двух фаз — феррита и глобулярных частиц цементита в перлите. Характер протекания этого процесса зависит от структуры аустенита перед превращением и режимом охлаждения после превращения. Чем мельче аустенит и больше степень его переохлаждения, тем меньше размер перлитных колоний и меньше межпластинчатое расстояние перлита Δ и тем выше пластичность металла.

В волочильных цехах наиболее благоприятную структуру катанки (проволоки) для волочения получают путем патентирования. Проволоку сначала разогревают до состояния аустенита, а затем быстро охлаждают в трубах, расположенных в расплаве селитры (при 550–600 °С). При патентировании межпластинчатое расстояние перлита $\Delta = 0,08–0,10$ мкм, структура металла — сорбит — обеспечивает наибольшие пластические свойства металла. Пластичность трооститных структур, которые встречаются при существующих режимах охлаждения, ниже. На стане 150, как и при патентировании, следует переохлаждать аустенит до 600 °С, что примерно на 50 °С ниже, чем достигается сейчас. На виткообразователе необходимы дополнительные секции водяного охлаждения при увеличении мощности потока воздушного охлаждения.

Таким образом, проблема получения равномерной структуры сорбита по всей длине катанки принципиально решена. Однако на многих проволочных станах в России (и в других странах), которые были построены в 1960-х гг., нет возможности осуществить предложенные двухступенчатую и даже одноступенчатую схемы охлаждения катанки. Длина участка охлаждения катанки на этих станах составляет примерно 10 м, ее недостаточно. Реконструкция по удлине-

нию и полной перестройке хвостовой части стана требует больших затрат. В России были проведены глубокие исследования возможности получения структуры сорбита на действующих станах. И эти работы увенчались успехом, показав, что на действующих станах можно получать требуемую структуру металла и высокие прочностные и пластические свойства металла. Разработана новая одноступенчатая технология, которая условно называется ускоренным охлаждением, хотя термин “ускоренное охлаждение” часто применяют также для стилмор-процесса и его разновидностей.

Было установлено, что на упомянутых станах основные марки стали должны подвергаться более резкому, чем в стилмор-процессе, ускоренному охлаждению. Это не только улучшает свойства прокатываемого металла, но и сокращает потери металла в окалину. Основные углеродистые марки стали следует разбить на две группы. Стали с содержанием углерода от 0,35 до 0,80 %, в число которых входит большая доля канатных марок стали с содержанием углерода 0,56–0,71 % (Ст5–Ст7), необходимо от температуры конца прокатки (1060–1080 °С) охладить с огромной скоростью (до 1500 °С/с) до температур 550–650 °С. Температура смотки катанки на моталку составляет 500–600 °С. Такой режим охлаждения реализуется на установке для одноступенчатого ускоренного охлаждения (рис. 13.23). Центральные слои катанки охлаждаются примерно по кривой 4, а поверхностные — по кривой 5 (см. рис. 13.22). В центральных слоях катанки образуется сорбит с тонкопластинчатой формой перлита, который называется сорбитом закалки. Он содержит тонкие прослойки избыточного феррита по границам перлитных зерен, которые имеют тонкую пластинчатую структуру с очень малым межпластинчатым расстоянием.

На поверхности же на глубине от 0,1 до 2,0 мм в зависимости от марки стали образуется мартенсит. Затем за счет внутреннего тепла поверхностные слои повышают свою температуру, и мартенсит распадается на сорбит отпуска, в котором перлит имеет мелкодисперсную структуру в форме глобулей, равномерно распределенных в объеме поверхностного слоя. На некоторых установках для распада мартенсита применяют дополнительный подвод тепла, обдувая катанку воздухом, нагретым до температуры 350–400 °С.

Таким образом, катанка, полученная по технологии ускоренного охлаждения, имеет внутренний слой сорбита закалки и наружный — сорбита отпуска.

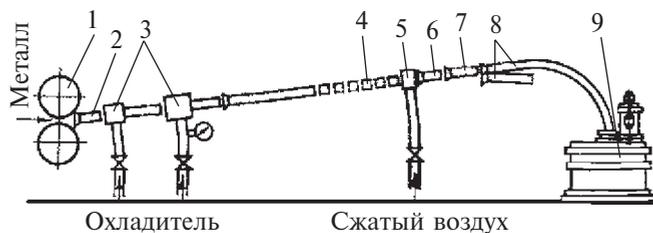


Рис. 13.23. Схема установки для ускоренного охлаждения катанки:

- 1 — последняя клеть стана; 2, 6 — проводки; 3 — охлаждающее устройство; 4 — кольцевые клапаны для отсекающей воды; 5 — воздушные отсекающие форсунки; 7 — стрелка; 8 — проводка к моталкам; 9 — моталка

ка. Между ними иногда появляется прослойка бейнита, толщина которой уменьшается со снижением температуры охлаждения. Механические свойства (прочность и пластичность) сорбита закалки выше, чем у сорбита отпуска. Полученная структура обеспечивает низкую обрывность проволоки при волочении. Для канатной, кордной и других высокопрочных видов проволоки такая структура желательна. Но сорбит отпуска мягче, поэтому способствует меньшему износу волоки при волочении, и его наличие в тонком поверхностном слое только улучшает качество этого вида проволоки.

Свойства катанки для волочения канатной стали, полученной по режимам ускоренного охлаждения, практически не уступают тем, которые достигаются при технологии “стилмор”, а по ряду показателей превышают их. Кроме того, ускоренное охлаждение позволяет снизить толщину слоя окалины и значительно сократить потери металла в окалину. И главное, по такой технологии охлаждения может хватить тех 8–10 м длины хвостовой части раскатного поля, которые имеются на некоторых станах.

Исследования последних лет показывают, что для высокоуглеродистых сталей с содержанием углерода от 0,6 до 1,0 %, предназначенных для производства канатной и кордной проволоки, необходимо применять режимы контролируемой прокатки. Контролируемой прокаткой в общем случае называется такой режим обработки проката, в котором соответствующим образом строго дозированы все параметры прокатки: температура и скорость нагрева под прокатку, температура и степень деформации в чистовой группе клетей и режим охлаждения после прокатки. Установлено, что снижение температуры и повышение степени деформации в чистовой группе (в аустенитной области) приводят к измельчению зерна аустенита и способствуют его распаду, т. е. уменьшают время начала и увеличивают скорость распада аустенита (ВТМО). Как следствие, при дальнейшем его распаде дополнительно измельчаются колонии перлита, повышаются прочностные характеристики при высокой пластичности металла.

На проволочных станах 300 № 3 ММК и 150 БМК (Белорецк) прошли промышленное испытание установки межклетевого охлаждения и режимы контролируемой прокатки в чистовой группе клетей. Металл с температурой 820–880 °С поступает в чистовые клетки, в которых по соответствующему расчетному режиму осуществляется одновременное воздействие на структуру деформации и режим охлаждения. Между клетями происходит низкотемпературная термомеханическая обработка металла (НТМО), что позволило получить дополнительное измельчение перлита и повышение прочности катанки.

Контролируемая прокатка при производстве катанки на высокоскоростных станах немного отличается от таковой на листовых станах. Получение мелкодисперсной структуры, повышение предела текучести и прочности, ударной вязкости и других механических свойств происходит при очень высокой скорости деформации и очень малых выдержках между клетями, когда рекристаллизация протекает не полностью, а для некоторых сталей совсем не проходит. Поэтому на проволочных станах рекристаллизация и процесс измельчения зерна аустенита проходят при более высоких температурах.

Для низкоуглеродистых сталей (менее 0,22 % С) ускоренное охлаждение также полезно, хотя дает меньший эффект, чем для сталей первой группы.

При обычном охлаждении на сталях с низким содержанием углерода окалины примерно в 1,5 раза больше, чем на высокоуглеродистых. Поэтому ее резкое сокращение при ускоренном охлаждении дает заметный эффект. Структура металла после ускоренного охлаждения на низкоуглеродистых сталях представляет собой мелкозернистый феррит с равномерным распределением малых колоний перлита. От этих сталей при волочении не требуются высокие прочностные характеристики, поэтому по технологии ускоренного охлаждения их следует быстро охлаждать до 700–750 °С. При охлаждении до более низких температур (до 615–630 °С) на поверхности металла появляется мартенсит, что приводит к резкому увеличению прочности катанки, что нежелательно. Кроме того, катанка, охлажденная до низких температур, имеет более высокую степень наклепываемости при волочении, чем охлажденная до 700–750 °С. Это приводит к тому, что при волочении достигается меньшая суммарная деформация, больше изнашиваются волокна, расходуется больше энергии.

Проведенные исследования показали, что для низкоуглеродистых сталей более высокий результат по снижению потерь металла в окалину и по улучшению деформируемости при волочении может быть достигнут при контролируемой, т. е. разной скорости охлаждения в указанном температурном интервале. Однако требуется разработка оборудования для реализации сложных режимов охлаждения.

Значительные успехи в области термомеханической обработки катанки с прокатного нагрева достигнуты японскими фирмами. В частности, проволочные станы фирмы Nipon Steel оснащены оборудованием для проведения непрерывных процессов:

регулируемого охлаждения катанки в витках, исключающего необходимость патентирования перед волочением;

прямого патентирования в свинцовой ванне;

регулируемого замедленного охлаждения.

На заводах этой фирмы освоена прокатка бейнитных сталей для горячей штамповки с прочностью $\sigma_{\text{в}} = 1300 \text{ Н/мм}^2$ и арматурной закаленной стали для напряженного железобетона с $\sigma_{\text{в}} = 2300 \text{ Н/мм}^2$. На заводе в Кимицу установлено оборудование для патентирования катанки с прокатного нагрева путем контролируемого охлаждения в свинцовой ванне. Для среднеуглеродистой стали получены различные структуры металла: бейнит, бейнит + перлит, перлит. Катанка с бейнитной структурой, имеющей строгую ориентировку пластинок цемента в направлении оси, обеспечивает затем волочение проволоки с 5,000 до 0,635 мм без промежуточного отжига.

13.8. Термообработка сортового проката

На примере катанки можно убедиться в том, что за счет термической обработки значительно увеличиваются прочностные и пластические характеристики металла. Организация термообработки металла непосредственно в потоке прокатного стана дает возможность выпускать высокопрочные профили, которые обеспечивают значительную экономию металла в строительстве и машиностроении и обеспечивают большой народнохозяйственный эффект. Тем не менее большая доля сортового проката выпускается на действующих заводах

в “сыром” виде, т. е. с такой структурой и механическими свойствами, которые получаются при естественном охлаждении металла после прокатки на холодильнике. Организация термической обработки сортового металла с прокатного нагрева является одним из перспективных направлений развития прокатного производства.

На современных высокоскоростных сортовых станах температура конца прокатки составляет 1050–1100 °С. При этих температурах достаточно развита собирательная рекристаллизация, поэтому окончательная структура металла состоит из крупных зерен, обладающих низкими прочностными свойствами. С уменьшением температуры конца прокатки балл зерна увеличивается (размер зерна уменьшается), количество феррита в структуре углеродистых сталей (типа Ст40) увеличивается, что ведет к повышению пластичности практически без снижения прочности стали.

Термическая обработка сортового металла с отдельного нагрева на металлургических заводах применяется редко, потому что это дорого. На мини-заводах ее проводят, если заказчик согласен оплатить дополнительные затраты на термообработку, получив прокат с более высокими прочностными и пластическими характеристиками. Гораздо выгоднее проводить термообработку проката в прокатном цехе, используя тепло прокатного нагрева. Для этого необходимо в потоке стана устанавливать термические печи.

В качестве примера установки термических печей в технологическом потоке рассмотрим схему (рис. 13.24) расположения оборудования стана 350 ОАО “Кировский завод” (Санкт-Петербург, ЗАО «Металлургический завод “Петросталь”»). Нагретая в печи с шагающим подом квадратная заготовка со стороной 100 и 120 мм прокатывается в первой клетке 530 в один или три пропуска в реверсивном режиме. В остальных клетках производится по одному пропуску. Передача раската мелкого сечения с первой линии на вторую и со второй на третью производится с помощью обводного аппарата. Более крупный раскат передается на вторую линию по шлепперу, а на третью — по косому рольгангу. После 10-й клетки на летучих ножницах мелкий прокат можно разрезать пополам на длины, которые размещаются на холодильнике, а после охлаждения эти профили разрезаются на мерные длины 2–6 м на ножницах холодной резки. Крупные профили разрезаются на мерные длины на пилах горячей резки перед холодильником.

После холодильника прокат может быть подвергнут термообработке по различным режимам в печах, установленных в линии прокатного стана. Для простых марок стали обычно применяется охлаждение на холодильнике с естественной скоростью, т. е. термообработка отсутствует. Более сложные марки пропускают через печи, осуществляя нагрев и замедленное или режимное охлаждение с получением соответствующих структуры и механических свойств. Печи позволяют провести нормализацию, т. е. выдержку при температурах начала рекристаллизации металла и охлаждение на воздухе, что обеспечивает равномерную мелкозернистую структуру металла. Предусмотрен режим прокатки “из печи в печь”, когда в одной печи происходит нагрев металла по определенному режиму, и соответственно во второй печи производится контролируемое охлаждение. По технологической инструкции предусмотрено около 10 различных режимов охлаждения и термообработки проката. Наконец,

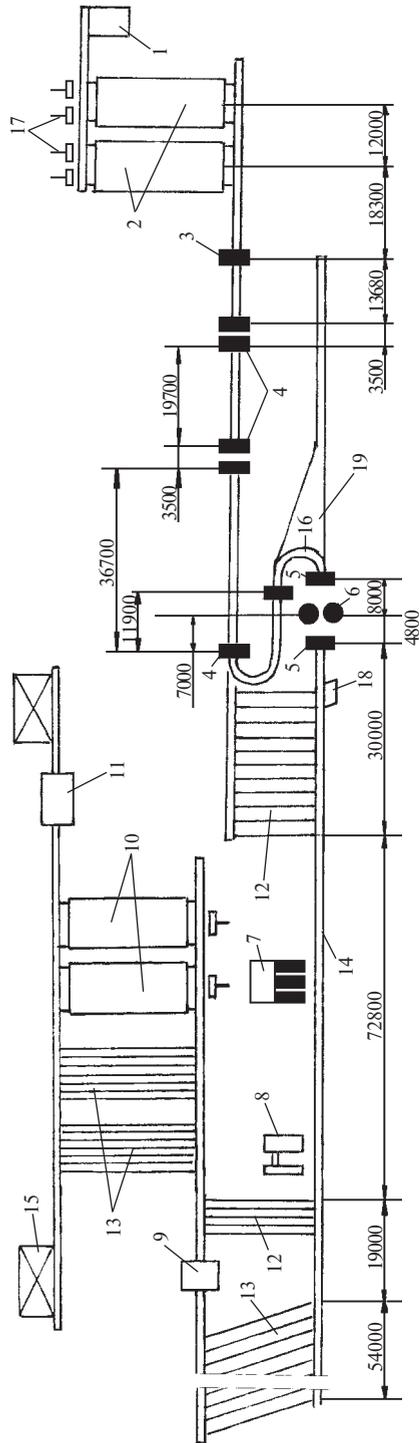


Рис. 13.24. Схема расположения оборудования стана 350 ЗАО "Петросталь":

1 — загрузочное устройство; 2 — печи с шагающим подом; 3 — реверсивная клеть 530; 4 — горизонтальные клетки 480; 5 — горизонтальные клетки 370; 6 — вертикальная клеть 370; 7 — 3-валковый 3-клетевой калибрующий блок; 8 — пилы горячей резки; 9 — ножницы холодной резки; 10 — термические печи с шагающим подом; 11 — правильная машина; 12 — шлепперы; 13 — холодильник; 14 — карманы; 15 — обводный аппарат; 16 — толкатели; 17 — летучие ножницы; 18 — крестовый ролик; 19 — ролик.

термические печи могут выполнять функции обычного рольганга для транспортировки металла.

Следует напомнить, что представленный стан замечателен также тем, что в его составе содержится 3-валковый калибрующий блок, о котором упоминалось ранее, для производства горячекалиброванного проката. Блок можно убирать с линии проката в случае ненадобности и производить прокат обычной точности. На схеме не показана иглофрезерная установка, находящаяся вне основного потока проката. На этой установке с помощью жестких металлических щеток — иглофрез — с поверхности круглого проката снимается окалина. Принцип действия установки такой же, что и на бесцентровом шлифовальном станке: три фрезы, вращающиеся в одну сторону, создают вращение находящейся между ними круглой штанги. За счет некоторого перекоса осей иглофрез создается осевая сила, затягивающая штангу в очаг иглофрезерования. Жесткие щетки способны не только счищать окалину, но и затрагивать тонкий слой основного металла, поэтому поверхность прутка после иглофрезерования имеет блестящий вид, хотя качество ее значительно хуже полученной при сплошной обдирке резцовыми головками или шлифовальными кругами. Горячекалиброванный металл с освобожденной от окалины поверхностью по качеству приближается к холоднокалиброванному и по ряду показателей превышает его.

В России имеется много сортовых цехов, не имеющих термического оборудования. Сравнительно мало сортопрокатных цехов, снабженных термическими печами, расположенными в основном потоке прокатного стана. Гораздо чаще применяют установки для ускоренного охлаждения проката. Можно выделить два типа установок ускоренного охлаждения для проведения термообработки: спрейерного или водяного типа. Многие непрерывные мелкосортные станы оборудованы установкой охлаждения водяного типа (см. рис. 13.23). С помощью ускоренного охлаждения достигается увеличение прочности сталей типа 35ГС, 25Г2С, Ст5сп и др. на 10–20 МПа, снижение размеров зерна до 6–7 баллов, получение равномерной перлитно-ферритной структуры. При этом, как отмечалось, с увеличением степени переохлаждения аустенита и скорости его охлаждения уменьшаются размер пластин цементита в перлите и расстояния между ними в перлитных зернах, что ведет к увеличению механических характеристик стали.

Для сортовых профилей важной характеристикой качества является глубина обезуглероженного слоя на поверхности. Она зависит от многих параметров разливки металла, нагрева его в печах, от режимов прокатки. Однако на глубину ее можно повлиять в процессе охлаждения металла после прокатки. При ускоренном охлаждении глубина обезуглероженного слоя снижается. Уменьшается также слой вторичной окалины, возникающей при охлаждении. Но особенно важно, что в составе окалины уменьшается доля нерастворимого в серной кислоте окисла Fe_3O_4 (магнетита), поэтому легче стравливается окалина в кислотных ваннах.

Требования к свойствам сортового проката весьма разнообразны. Выбор вида термической обработки зависит от профилеразмера, марки стали, требований и пр. Видимо, невозможно охватить все многообразие средств и технологических режимов, применяемых для термической обработки сортового проката. Рассмотрим только некоторые из них.

13.8.1. Термоупрочнение арматурной стали

Арматурная сталь выпускается в виде прутков диаметром от 6 до 80 мм длиной 6–12 м. По ГОСТ 5781–75 и 10884–71 арматурную сталь разделяют на семь классов: А — поставка в горячекатаном состоянии без термообработки, А_Т — то же в термообработанном состоянии, А-I — круглая гладкая сталь, остальные марки А-II–А-VII соответствуют арматуре в виде периодического профиля. Для ненапрягаемых конструкций применяются углеродистые и низколегированные арматурные стали, из которых производится арматура класса А-I, А-II, А-III и А_Т-III. Классы А-IV, А-V, А_Т-IV, А_Т-V, А_Т-VI и А_Т-VII предназначены для напрягаемых конструкций и изготавливаются из сталей марок 20ГС, 25ГС, 35ГС, 08Г2С и др. Основная концепция при изготовлении арматурной стали заключается в том, чтобы за счет экономного легирования и термообработки увеличить прочность стали в два-три раза по сравнению со сталью класса А. В табл. 13.3 приведены основные требования к арматурной стали, выпускаемой в виде стержней.

Следует заметить, что часть арматурной стали термически обрабатывается не в прокатном цехе, а у потребителя, т. е. на заводах железобетонных изделий. В этом случае прутки термически обрабатываются на установке электротермического упрочнения (ЭТУ), состоящей из нагревательного, закалочного и отпускного устройства. Электротермическое упрочнение позволяет, например, арматуру класса А-II из стали Ст5 перевести в класс А_Т-IV, а из прутков из стали 35ГС класса А-III получить арматурную сталь классов А_Т-V и А_Т-VI. Нагрев прутков осуществляется электроконтактным способом для Ст5 до температур 920–950 °С, для стали 35ГС — до 880–920 °С. После закалки в воду прутки подвергаются отпуску при температурах соответственно 350–400 °С (Ст5) и 360–450 °С (35ГС).

Таблица 13.3

Механические свойства арматурных стержней (не менее)

Класс арматуры		Марки стали		σ ₀₂ , МПа	σ _в , МПа		δ, %	
Горячекатаная	Термоупрочненная	Горячекатаная	Термоупрочненная		Горячекатаная	Термоупрочненная	Горячекатаная	Термоупрочненная
А-I	–	Ст3, Ст3Гпс	–	240	380	–	25	–
А-II	–	Ст5, 18Г2С	–	300	500	–	19	–
А-III	А _Т -III	35ГС, 25Г2С	Ст5пс, Ст5сп	400	600	600	14	14
А-IV	А _Т -IV	20ХГ2С	20ГС, 08Г2С	600	900	900	6	8
А-V	А _Т -V	23Х2Г2	20ГС, 35ГС, 20ГС2	800	1050	1000	7	7
–	А _Т -VI	–	20ГС, 35ГС, 20ГС2	1000	–	1200	–	6
–	А _Т -VI	–	–	1200	–	1400	–	5

Существует несколько разновидностей процессов термоупрочнения арматурной стали с отдельного нагрева. Практически все они отличаются только способами нагрева металла под закалку. Имеются установки печного, индукционного и других видов нагрева. Но всем установкам отдельного нагрева присущи общие недостатки, связанные с низкой производительностью, высокой стоимостью операций, высокими энергетическими и трудовыми затратами. По экономическим показателям термоупрочнение с отдельного нагрева не идет ни в какое сравнение с термоупрочнением с прокатного нагрева.

Основная доля высокопрочной арматурной стали ($\sigma_b > 900$ МПа), используемой в предварительно напряженных железобетонных конструкциях, производится по одной из двух технологий. По первой технологии осуществляют термическое упрочнение металла с прокатного нагрева с применением прерывистого охлаждения с самоотпуском, по второй — проводят горячую прокатку низколегированного металла с повышенным содержанием хрома и марганца с последующей его термообработкой в виде режимного охлаждения.

Впервые термическое упрочнение арматурной стали с прокатного нагрева было осуществлено на среднесортном стане 350-2 Макеевского металлургического комбината. На непрерывных станах, особенно мелкосортных, оно получило широкое распространение благодаря простоте и компактности охлаждающего устройства. Каждая линия двухниточного мелкосортного стана 250 (см. рис. 13.3) оборудована камерой предварительного охлаждения проката, в которую подается водовоздушная смесь под давлением до 22 МН/м². За ней установлены 14 секций труб с чередующимся прямо- и противоточным движением водовоздушной смеси. За счет высокой скорости охлаждения по всему сечению арматуры обеспечивается устойчивая структура мартенсита. При охлаждении сталей Ст5 и 35ГС от температуры конца прокатки 1040–1080 °С до температуры закалки 250–400 °С только на малых диаметрах (до 14 мм) мартенсит занимает все сечение проката. Прутки такого диаметра по данной технологии имеют класс A_T-IV-A_T-VI . На более крупных прутках в средних слоях может быть структура бейнита, сорбита или даже перлита с избыточным ферритом. Для прутков диаметром 18–20 мм, чтобы достигнуть того же класса, прокат после последней клетки стана охлаждается сначала в камере предварительного охлаждения до 800–850 °С, а затем в секции водовоздушного охлаждения. Для более крупных диаметров (20–22 мм) трудности связаны не только с недостаточной прокаливаемостью сердцевины, но и с неравномерностью механических свойств по длине. Для повышения свойств арматуры в таких сечениях необходимо применять микролегирование стали элементами V, Ti и B при интенсификации процесса охлаждения металла. Сталь 09Г2С с добавкой 0,005 % В в прутках диаметром 20–22 мм обеспечивает требования класса A_T-VI .

Обычно применяемые для термоупрочнения стали марок 08Г2С, 09Г2С, 17ГС, 17Г1С, а также ранее упомянутые марки имеют тот недостаток, что при сварке в месте сварного шва теряют свою прочность на 15–17 %. Для особо ответственных конструкций разработаны новые марки стали, неразупрочняющиеся при сварке, такие как 10ХГС2 (класс A_T-IV), 20ХГС2, 23Х2Г2Т (класс A_T-V) и др.

Важным резервом упрочнения арматурной стали с прокатного нагрева является использование эффекта ВТМО. Как отмечалось, деформация аустенита при низких температурах с последующей упрочняющей термической обработ-

кой обеспечивает наивысшие прочностные свойства стали при высокой ее пластичности. На высокоскоростном прокатном стане трудности те же, что и на проволочных станах: необходимо обеспечить достаточно низкую температуру и высокую степень деформации в чистовых клетях, охлаждение проката по заданному режиму в чистовых клетях и его интенсивное охлаждение после прокатки. На современных станах оборудования для осуществления таких режимов нет. В России оно находится в стадии разработки. На новых зарубежных мелкосортных и проволочных станах такие возможности уже предусмотрены.

13.8.2. Термическая обработка фасонных профилей проката

Мы будем рассматривать только группу строительных фасонных профилей — уголки, швеллеры, балки тавровые и двутавровые и др. Подавляющее большинство таких профилей поставляется заказчику в “сыром” виде. Замена обычных горячекатаных профилей на термообработанные позволяет экономить в строительных конструкциях до 20 % металла.

К настоящему времени разработано несколько технологических процессов термического упрочнения фасонных профилей. Они отличаются в основном способами их охлаждения после прокатки. Распространены такие виды охлаждения: форсуночное, спрейерное, в турбулентном потоке воды и в закалочном баке. Чаще всего применяют спрейерные установки, распыляющие водо-воздушную смесь, и системы с турбулентными потоками воды в трубах.

Спрейерные установки интересны тем, что позволяют в процессе термообработки частично выправлять сложные фасонные профили по кривизне. Например, на Коммунарском металлургическом заводе (Украина) на крупносортом стане 600 отработана технология спрейерного термического упрочнения швеллеров № 16–20 с регулируемым уровнем коробления в пределах 20–90 мм на длине 6–7 м. Поскольку все фасонные профили после термоупрочнения подвергаются правке на правильных машинах, то более полного исправления кривизны на спрейере не добиваются. Закалка в спрейерной установке резко повышает прочностные и снижает пластические свойства металла. Низколегированные стали после закалки повышают предел текучести до 800–1000 МПа, низкоуглеродистые стали обыкновенного качества — до 700–1100 МПа при соответствующем снижении относительного удлинения до $\delta = 5–10$ %. Все стали при этом имеют структуру мартенсита. Для увеличения пластических свойств обычно после закалки профили подвергают отпуску при температурах от 450 до 650 °С в зависимости от марки стали и типа профиля. Как известно, закалка с таким отпуском называется термоулучшением металла, получается однородная структура глобулярного сорбита по всему сечению профиля. Так, улучшение швеллера № 20 из Ст3 гарантирует следующие свойства: $\sigma_T > 400$ МПа, $\delta = 18$ %, ударная вязкость при -70 °С не менее 0,9 МДж/м². Отпуск закаленной стали 09Г2 при температурах 500–550 °С обеспечивает предел текучести $\sigma_T = 560–650$ МПа при относительном удлинении не менее $\delta = 17$ % и ударной вязкости при температуре -70 °С не ниже 1,1–1,2 МДж/м². При термоупрочнении снижается уровень критической температуры хрупкости до $-70…-90$ °С, а также повышается усталостная прочность стали, уменьшается чувствительность к концентраторам напряжений типа надрезов. Все это свидетельствует

о высокой эффективности улучшения стали применительно к строительным фасонным профилям.

Спрейерные установки обладают лишь одним недостатком: из-за малых проходных отверстий спрейерные головки быстро засоряются и требуют постоянного ухода. Установки для термоупрочнения в турбулентном водяном потоке лишены этого недостатка. Они наиболее просты по конструкции, занимают меньшую длину и позволяют проводить процесс охлаждения при закалке с большой интенсивностью. Достигаются равномерные по длине и для многих марок стали предельные механические характеристики. Работы ИЧМ, Днепропетровского металлургического института, а также опыт Нижне-Тагильского металлургического комбината доказывают высокую эффективность и надежность этого способа закалки. Например, для швеллера № 30 из СтЗкп достигается предельный уровень свойств: $\sigma_T = 990\text{--}1000$ МПа, $\sigma_B = 1100$ МПа, $\delta = 6\text{--}7\%$, $\psi = 17\%$. После отпуска при 650°C свойства становятся наиболее благоприятными для использования в строительных конструкциях: $\sigma_T = 420$ МПа, $\sigma_B = 570$ МПа, $\delta = 28\%$, $\psi = 73\%$. При улучшении двутавровой балки № 55 из стали 09Г2Д получены свойства: $\sigma_T = 560$ МПа, $\delta = 23\%$, $\psi = 73\%$. Такие свойства оптимальны в вагоностроении.

Исследования и опыт завода “Азовсталь” показывают, что оптимальный комплекс механических свойств после термоупрочнения может быть достигнут также за счет улучшения химического состава стали. Было показано, что на фасонных строительных профилях из сталей со следующим химическим составом: 0,15–0,20 % С, 1,0–1,6 % Мп, 0,4–0,7 % Si — можно ожидать такие механические свойства: $\sigma_T = 1000\text{--}1200$ МПа, $\delta = 10\text{--}12\%$, $a_{+20} = 0,7\text{--}1,0$ МДж/м².

13.8.3. Термообработка сортового металла для холодной высадки

Для изделий, изготовляемых методом холодной высадки, применяется качественная углеродистая и легированная сортовая и калиброванная сталь. Химический состав, их механические и технологические свойства регламентируются ГОСТ 10702–78. Для таких сталей характерен высокий и жесткий уровень требований:

полное отсутствие на поверхности даже мелких трещин, плен, инородных включений, загрязнений и пр.;

минимальное количество в объеме неметаллических включений и их высокая дисперсность;

однородная и мелкозернистая структура металла с баллом зерна не ниже 5.

Первые два требования обеспечиваются при выплавке и прокатке, а третье — при термообработке металла. Основные характеристики по чистоте металла закладываются в сталеплавильном производстве. Главной предпосылкой является соблюдение узких пределов содержания как основных элементов (С, Мп, Si, S, P), так и примесей. При производстве стали для высадки и вытяжки на многих заводах обязательной технологической операцией является внепечная обработка аргоном металла в ковше. Интенсивное перемешивание расплава аргоном ведет к увеличению контакта металла со шлаком и к значительному удалению из него серы, неметаллических включений и газов (O₂, H₂ и N₂). При этом уменьшается химическая неоднородность стали. При разливке стали вокруг струи создается защитная атмосфера из нейтральных газов, предотвра-

шающая окисление и газонасыщение металла. Отливка слитков ведется сифонным способом.

Цель термической обработки стали для холодной высадки заключается не в повышении прочностных свойств, а в получении мелкого зерна с мелкодисперсным перлитом. Эта операция должна проводиться в технологическом потоке прокатного стана.

Термообработку стали, предназначенной для холодной высадки, осуществляют по технологии ускоренного охлаждения, подобной той, которая применяется для термообработки катанки или арматурной стали, т. е. сначала охлаждают металл с высокой скоростью, а затем с замедлением. Однако интенсивное охлаждение прекращают при более высоких температурах, чем для катанки или арматуры, чтобы обеспечить высокую пластичность при сравнительно невысоких прочностных характеристиках.

В потоке мелкосортового стана для сталей под холодную высадку очень перспективны режимы контролируемой прокатки, задача которой сводится к интенсивному измельчению зерна. Используют весь набор механизмов, способствующих решению этой задачи:

- уменьшение величины зерна исходного аустенита путем снижения температуры нагрева под прокатку;

- замедление процессов рекристаллизации за счет снижения температуры деформации;

- выделение частиц карбонитридов ванадия и ниобия при температурах деформации; для этого низколегированные стали типа 09Г2С, 10ХСНД и др. микролегируют указанными элементами в сотых и тысячных долях процента;

- снижение температуры $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения за счет интенсивной деформации при низких температурах и легирования стали элементами, повышающими устойчивость аустенита, например марганцем;

- повышение скорости охлаждения в процессе $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения и в области межкритических температур после деформации.

Снижение температуры конца прокатки и увеличение степени деформации при пониженных температурах наряду с измельчением зерна приводят к повышению объемной доли структурно-свободного феррита. Это также способствует повышению пластических характеристик стали.

Промышленные эксперименты по контролируемой прокатке сталей для холодной высадки проводились на среднесортном стане 350 ЧерМК. Они показали, что после такой прокатки многие стали обеспечивают высокую пластичность и оптимальный предел текучести, необходимые для холодновысадочных операций. Однако широкого внедрения контролируемая прокатка не получила, так как при прокатке при низких температурах нагрузки на оборудование резко возрастают.

13.9. Дефекты сортового проката и методы их обнаружения

После прокатки и термообработки сортовой металл подвергается различным отделочным операциям. Условно их можно разбить на две группы. К первой группе относятся операции обнаружения и удаления поверхностных дефектов, а также операции снятия окалины с поверхности, нанесения защитных

и антикоррозионных покрытий. Вторую группу составляют операции, связанные с формированием и улучшением геометрических параметров проката: правка, резка на мерные длины, формирование фасок и т. п.

Изучая производство заготовки, мы рассматривали наиболее часто встречающиеся виды дефектов на прокатываемом металле, а также методы обнаружения и устранения поверхностных дефектов. На готовом прокате дефекты принципиально те же, что и на заготовке. Следует иметь в виду, что каждый дефект, не обнаруженный на заготовке, на поверхности сортового проката обязательно сохраняется и усугубляется. Дефекты удлиняются пропорционально вытяжке металла. В поперечном направлении они, как правило, раскрываются, так как при прокатке по многим технологическим схемам на кромках раската действуют растягивающие напряжения. Отсюда следует, что зачистку металла от поверхностных дефектов необходимо проводить после прокатки на блюминге и заготовочном стане. По литературным данным стоимость зачистки готового сортового металла в три раза дороже, чем на слитке, и в два раза дороже, чем на заготовке. На всех заводах стремятся обеспечить высокое качество исходного металла и переносят зачистные операции на ранние стадии обработки металла.

Дефекты готового проката могут быть разделены на три основные группы: видимые, невидимые и размерные. К видимым дефектам относятся как обнаруживаемые невооруженным глазом, так и те, которые выявляются с помощью соответствующих приборов. Примеры — вмятины, трещины, рванины, крупные внутренние полости. При анализе производства заготовки мы рассматривали основные методы обнаружения видимых (поверхностных и внутренних) дефектов. Для сортопрокатной продукции они принципиально те же. К невидимым дефектам относятся такие, которые могут быть обнаружены только в условиях лаборатории, например мелкие закаты, волосовины, флокены и др. Размерные дефекты обнаруживаются путем простого обмера проката с помощью мерительного инструмента или шаблонов. Для простых профилей (круг, квадрат, полоса, шестигранник) шаблон представляет собой двойную скобу, первая из которых соответствует минусовому, а вторая — плюсовому допуску на размер по ГОСТу. Можно оценить соответствие размеров ГОСТу, а также овальность, местные искажения и т. п. Для сложных профилей (например, для швеллера) шаблоном является вырезанный из тонкого листа контур части профиля. Наложив шаблон на прокат, можно на просвет оценить степень точности выполнения профиля. Глаз человека на просвет улавливает зазор в 0,1 мм.

Контроль качества готовой продукции практически на всех сортопрокатных заводах осуществляется осмотром и обмером проб, отбираемых в процессе прокатки от прокатываемых полос. В период настройки стана пробы отбирают от каждой полосы, при установившемся процессе периодичность отбора проб составляет от 5 до 15 мин работы стана. На проволочных станах пробы отбирают отделением нескольких витков от бунта. При настройке витки отбирают от средней части бунта, а при установившемся процессе прокатки — от его заднего конца. На мелкосортных и более крупных станах пробы отбирают от заднего конца прутка.

Дефекты всех трех упомянутых групп выявляются на пробах. Выше отмечалось, что для контроля размеров проката существующая выборочная система

отбора проб не совсем представительна. Велика вероятность пропустить бракованную продукцию. Необходим 100 %-ный объективный контроль качества всех раскатов по всей длине. Необходимо на каждом стане на участке адьюстажа иметь установку неразрушающего контроля качества металла как по дефектам, так и по размерам. Это очень дорого, поэтому, к сожалению, только на единичных российских и зарубежных станах они имеются. Принцип их работы аналогичен тем, что описаны при контроле качества заготовки. Например, для контроля круглого проката распространены вихревой и магнитный методы.

На рис. 13.25 приведена схема вихретокового преобразователя (датчика) для обнаружения поверхностных дефектов на круглом прокате. Как видно, магнитные силовые линии, проходя через дефект, изменяют траекторию магнитной силовой линии, что фиксируется соответствующим устройством.

На заводе Sumitomo Automatic Magnetic на таком принципе работают приборы, выпускаемые фирмой Institute Dr. Förster (Германия). Некоторые из таких приборов установлены на заводах России, например на Череповецком сталепрокатном заводе для контроля калиброванного металла. Одной из первых установок данного типа является японская установка САМ.

Несколько иначе работает дефектоскоп Rotoflux (Германия — рис. 13.26). Благодаря наведению переменного магнитного поля повышенной частоты (несколько килогерц) и большой напряженности при вращающемся магнитопроводе удалось значительно повысить чувствительность установки. Наблюдается почти линейная зависимость между амплитудой сигнала и его глубиной, что увеличивает точность определения глубины залегания дефекта. Кроме того, на данной установке не наблюдается остаточной намагниченности проката после контроля, как на предыдущей. Конструктивно два зонда и два магнитопровода 3 для намагничивания прутка 4 закреплены на подвижных и регулируемых рычагах 1 и 2, причем сканирующие зонды располагаются внутри каждого магнитопровода. На каждом рычаге размещено шесть сканирующих зондов, что позволяет получить узкую спиральную дорожку и обнаруживать дефекты, встречающиеся по этой дорожке. При скорости проката до 90 м/мин обеспечивается 100 %-ное выявление дефек-

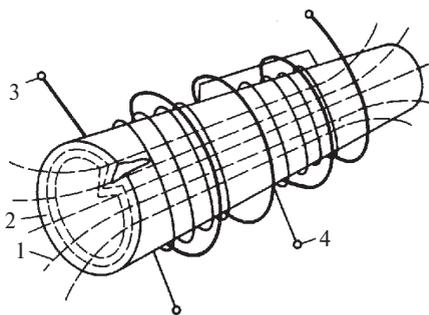


Рис. 13.25. Схема вихретокового преобразователя для контроля круглого проката: 1 — магнитные силовые линии; 2 — траектории вихревых токов; 3 — первичная обмотка; 4 — вторичная обмотка

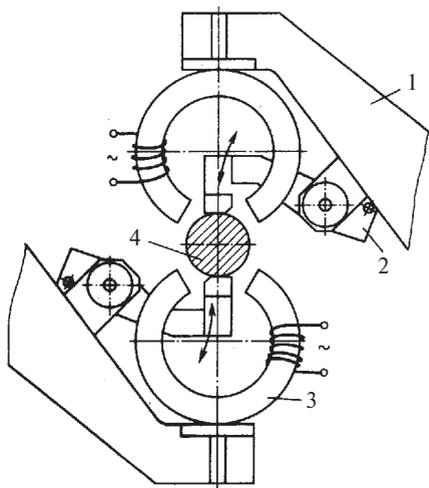


Рис. 13.26. Принципиальная схема дефектоскопа Rotoflux

тов длиной более 17 мм. В процессе контроля сигналы от зондов индуцируются на мониторе и регистрируются самописцем. Выявленные дефекты маркируются краской, выбрасываемой из пистолета. Это позволяет быстро их находить и устранять. Дефектоскопом Rotoflux контролируют прутки диаметром 25–105 мм.

Более совершенная модификация дефектоскопа, называемая Circoflux, имеет три серии для разных диапазонов диаметров контролируемых кругов: 12–80, 20–80 и 75–260 мм. Дефектоскоп способен выявлять дефекты от 0,2 до 5,0 мм.

Среди отечественных дефектоскопов также заслуживают внимания несколько конструкций. Дефектоскоп “Сорт” на прутках диаметром 30–120 мм позволяет выявлять дефекты на глубине не менее 0,3 мм. Однако промышленного распространения он не получил. Для крупных кругов 80–180 мм применяется автоматизированный феррозондовый дефектоскоп “Зонд-1”. Он также способен определять дефекты глубиной выше 0,3 мм. В установке применено локальное намагничивание контролируемого участка проката посредством вращающегося электромагнита, создающего переменное магнитное поле частотой 400 Гц. Преобразователи поля — датчики Холла — обеспечивают сигнал, который после обработки и усиления передается на управляющий блок. Этот блок управляет 16 дефектоотметчиками, расположенными вокруг проката. Место дефекта маркируется краской.

Имеется еще несколько разновидностей дефектоскопов отечественных разработок. Среди них представляет интерес портативный переносной прибор ДМП-10Н, предназначенный для ручного и оперативного выявления и оценки величины таких поверхностных дефектов, как трещины, закаты, волосовины и др. Прибор работает по черновой горячекатаной поверхности с вторичной окалиной. Здесь также производится локальное намагничивание поверхности проката и считывание поля рассеяния с помощью датчиков Холла. Электромагнит и датчики конструктивно выполнены в виде единого щупа. Наличие дефекта контролируется загоранием контрольной лампы, а глубину дефекта указывает соответствующая стрелка индикатора. Конечно, прибор ДМП-10Н может быть использован стационарно в установках, контролирующих дефекты на круглом и плоском прокате.

При существующей системе отбора проб значительное количество дефектов выявляется в лаборатории. Каждый сортопрокатный цех имеет такую лабораторию, имеется также центральная заводская лаборатория. В этих лабораториях производят металлографическое исследование металла, определяют на микрошлифах внутренние дефекты, контролируют микроструктуру металла. В лаборатории производятся также сдаточные механические испытания металла, на основании которых выписывается паспорт выпускаемого проката. По результатам лабораторных испытаний прокат отгружается заказчику.

13.10. Удаление поверхностных дефектов и окалины

После обнаружения дефекта необходимо его зачистить. Часто для сортового проката применяют сплошную зачистку металла. При этом, помимо удаления поверхностных дефектов, решают две задачи: удаление окалины и повы-

шение точности поперечного сечения проката. В сортопрокатном производстве применяют следующие методы зачистки металла: абразивные, лезвийные, иглофрезерные и электрические. Наиболее универсальным и широко применяемым является абразивный метод. Для плоского проката крупного сечения и заготовки разработано несколько конструкций обдирочно-шлифовальных машин, основой которых является наждачный круг. Круглый прокат на таких станках зачищают “змейкой”, т. е. по винтовой линии узкой полосой, проходящей по всей длине штанги. В местах “светления” проката невооруженным глазом хорошо видны поверхностные дефекты, особенно вытянутые вдоль оси прутка, такие как волосовины, трещины, закаты.

Для сплошной зачистки круглого проката применяются бесцентрово-шлифовальные станки. Имеется несколько типовых станков, предназначенных для разного диапазона обрабатываемых прутков — от 0,15 до 250 мм. Эффективность процесса бесцентрового шлифования и качество получаемого прутка определяются характеристикой абразивного инструмента и режимами работы станка. Большое влияние на точность и качество поверхности шлифованного прутка оказывает точность и кривизна исходного прутка. Горячекатаный круглый металл с большой кривизной и разбросом по размерам и овальности не обеспечивает высоких классов точности шлифованного металла. На горяче- и холоднокалиброванном металле точность и качество поверхности шлифованного металла достигает наивысших значений. Полученный при этом круглый прокат отвечает требованиям ГОСТ 14955–69 «Сталь круглая со специальной отделкой — “серебрянка”» с различными группами шероховатости поверхности (от А до Д) и классами точности (от 2 до 4). По качеству поверхности и точности “серебрянка” из углеродистых и нержавеющей марок стали по многим показателям превосходит калиброванный металл. По мере совершенствования бесцентрово-шлифовальных станков качество такого вида проката постепенно улучшается.

Для плоского проката, а также для фасонных профилей все чаще применяют станки с абразивными “бесконечными” лентами (рис. 13.27), склеенными из шлифовальной шкурки на тканевой основе. Этот способ зачистки особенно важен для жаропрочных и высоколегированных марок стали. Он

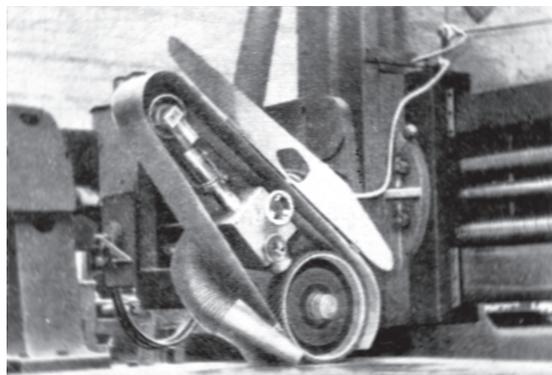


Рис. 13.27. Ленточно-шлифовальный станок

обеспечивает возможность сплошной и выборочной зачистки проката. Шлифовальная лента по сравнению с кругами обеспечивает более высокое качество обработки поверхности, возможность обработки сложных поверхностей, большую стабильность процесса без ударов и рывков, возможность более эффективного применения смазочно-охлаждающих жидкостей.

Ленточно-шлифовальные станки в силу их преимущества перед абразивными находят большое применение не только при обработке холоднотянутых и горячекатаных прутков, но и при зачистке листов, труб и другой металлургической продукции.

К лезвийным способам зачистки металла относятся различные способы резания (точение, фрезерование) и пневматической вырубке дефектных мест. Эти способы применяются для выборочной и сплошной зачистки заготовки. Точение применяют также для сплошной зачистки готового сортового проката. Все лезвийные методы отличаются сравнительно низкой производительностью, высокой трудоемкостью и дороговизной, поэтому применяются для тех марок стали, на которых шлифование может привести к поверхностным трещинам из-за разогрева поверхности металла. Для обработки готового сортового проката заслуживает внимания установка бесцентрово-токарного точения проката типа Kiserling (Германия). Рассмотрим конструкцию резцовой головки такого станка (рис. 13.28). Круглая штанга самоцентрируется между четырьмя резцами, производящими сьем металла. Обработка может производиться как из пруткового, так и из бунтового проката. Известны установки, на которых после обдирки прутки подвергают волочению или обработке на правильно-полировальных машинах, что позволяет значительно повысить точность и качество поверхности металла. Примеры сталей, подвергаемых точению с последующей полировкой на линии Kiserling: углеродистые У7–У12, инструментальные легированные 9ХС, ХВ2, 9Х18 и др., нержавеющие 10Х18Н10Т, 1Х17Н2 и др., быстрорежущие Р9, Р18, Р6М3 и др., жаростойкие ЭП303, ЭИ481 и др.

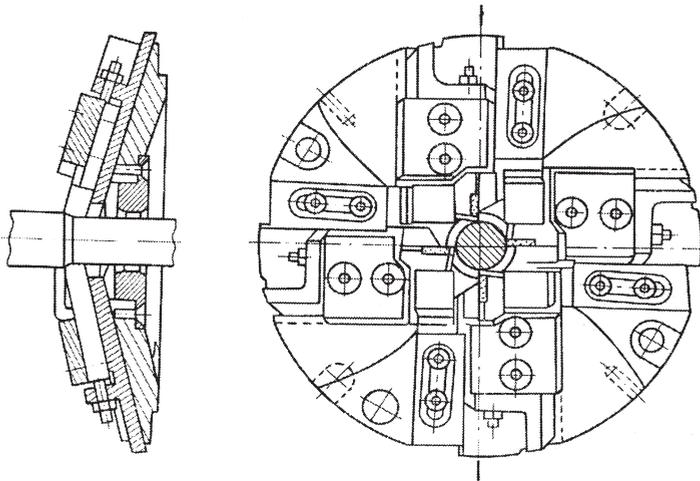


Рис. 13.28. Конструкция резцовой головки для бесцентрово-токарного станка

Быстрыми темпами развиваются весьма перспективные электрические методы обработки металла. Установки такого типа менее габаритны, чем при обработке резанием или шлифованием. Сущность этих процессов заключается в том, что электроконтактным, электродуговым или плазменным способом поверхностный слой вращающегося прутка расплавляется на определенную глубину, и расплавленный металл удаляется воздушной струей или иным способом. Работу ведут в защитной или восстановительной атмосфере. Преимуществом электрических методов является проплавление металла на определенную глубину. При этом поверхностные и подповерхностные раковины, пузыри и трещины завариваются. Дефекты, находящиеся непосредственно на поверхности, удаляются.

Очистка металла от окалины как отдельная операция в сортопрокатных цехах применяется редко, основная доля сортового металла отгружается заказчику с поверхностной окалиной. При операциях сплошной зачистки, описанных выше, снятие окалины осуществляется автоматически.

Для некоторых заказчиков требуется удаление окалины без необходимости съема основного металла. При очистке металла от окалины применяют дробеметный способ очистки, иглофрезерование и химическое травление. Дробеметный способ основан на использовании кинетической энергии дробинки, выбрасываемых на поверхность проката со скоростью 50–80 м/с. В результате происходит разрушение и удаление окалины. Однако этот способ не очень производительен. Металл при обработке получает некоторый поверхностный наклеп, который во многих случаях нежелателен, поскольку при дальнейших операциях резания стойкость инструмента снижается. Кроме того, лопатки дробеметной установки имеют низкую стойкость, несмотря на применение дорогих легированных марок сталей и не менее дорогих упрочняющих наплавов. В связи с этим широкого распространения метод не получил.

Одним из прогрессивных способов удаления окалины является разработанный в СССР способ иглофрезерования. Мы уже отмечали эффективность его применения на среднесортном стане 350 ЗАО «Петросталь» (ОАО «Кировский завод», Санкт-Петербург). Иглофреза представляет собой жесткую круглую металлическую щетку, набранную из плотно уложенных высокопрочных проволок. Каждая проволока, заземленная одним концом на ступице иглофрезы сварным швом, является полужестким микрорезцом. Иглофреза способна работать в режиме как очистки, так и резания металла. В отличие от дробеметного способа здесь очистка металла протекает бесшумно, без выделения пыли и с высоким качеством очищенной поверхности. Недостатком способа является высокая стоимость иглофрез, тем не менее многие страны уже наладили их массовое производство. Иглофрезерование проката, не только сортового, но и листового, интенсивно развивается в ФРГ, США, Японии и других странах.

Наиболее распространенным способом удаления окалины остается химическое травление ее в кислотах. Травлением удаляют окалину полностью, тогда как при дробеметном способе или иглофрезеровании до 5 % окалины на поверхности сохраняется. Для мелкого проката в бунтах перед травлением применяют механическое удаление окалины: пропускают его через две пары роликов, в которых металл испытывает изгиб в двух плоскостях с небольшим

растяжением. Происходит разламывание окалины, и пара жестких щеток счищает до 95 % окалины. Остальную окалину стравливают в кислотах.

В настоящее время наиболее применимо травление в серной кислоте концентрацией 20–25 % при температуре раствора 60–90 °С. Однако многие заводы стремятся перейти на серноокислотное травление. При этом сокращается цикл травления, улучшается качество поверхности металла, уменьшается в целом стоимость этой операции.

В последние годы в производстве высоколегированного сортового проката внедрен восстановительный способ удаления окалины. Используется гидрид натрия, растворенный в каустической соде. Гидрид натрия восстанавливает окислы железа до чистого металла. Побочные продукты восстановления при последующей промывке удаляются. Опыты, проведенные на Серовском металлургическом заводе и заводе “Серп и молот” (Москва) показали, что при восстановительном травлении по сравнению с кислотным сокращается время травления, улучшается качество поверхности металла, потери металла сокращаются в два-три раза, исключается выделение вредных паров из кислотных ванн. Однако высокая стоимость реактивов ограничивает распространение этого способа травления.

В целом следует отметить, что все “мокрые” способы снятия окалины (кислотный и восстановительный) экологически вредны, ухудшают условия труда, способствуют коррозии всего оборудования цеха, поэтому во всем мире ведутся работы по замене их другими способами.

13.11. Правка сортового проката

Среди отделочных операций второй группы мы рассмотрим только правку проката. Правка является одной из самых ответственных операций, определяющих качество сортового металла. Нормальная работа современных автоматизированных линий в машиностроении возможна лишь на полосах с минимальной кривизной. Упомянутые выше операции абразивной и резцовой обработки также возможны только на строго прямолинейном прокате. Существующими ГОСТами оговаривается допустимая кривизна на длине 1 м. На прокат обыкновенного качества допуск составляет 5–6 мм/м. Прокат повышенной точности по кривизне имеет допуск 2 мм/м. На наиболее ответственный прокат, например железнодорожные рельсы, требования по местной и концевой кривизне ужесточены до 0,5 мм/м. Такие же допуски предусмотрены ТУ на специальные виды проката, поставляемого для автоматических линий.

Искривление полосы в прокатном цехе может происходить в результате: механического воздействия на полосу в горячем состоянии; температурных напряжений, возникающих в процессе остывания; неблагоприятных условий транспортировки или складирования готового проката.

Искривление возможно не только по длине, но и в поперечном сечении проката. Например, элементы швеллера (полки и стенка) могут располагаться не под прямым углом, стенка швеллера может быть непрямолинейной и т. п.

Главной причиной искривления фасонных профилей являются температурные напряжения, возникающие в результате неравномерного остывания

элементов поперечного сечения профиля. Чем сложнее профиль, тем больше неравномерность его остывания.

Например, при охлаждении на холодильнике железнодорожных рельсов головка остывает значительно медленнее, чем шейка и подошва. Возникающие при этом температурные напряжения вызывают искривление полосы. В начальный момент остывания рельс изгибается на подошву (длина профиля у подошвы меньше, чем у головки — рис. 13.29, положение 1). Когда подошва достигнет температур 600–680 °С, в результате фазовых превращений происходит разогрев подошвы, и рельс изгибается в сторону головки (положение 2). Когда фазовые превращения начнутся в головке, полоса вновь будет изгибаться на подошву (положение 3). Так будет продолжаться до полного остывания подошвы. Далее будет остывать только головка рельса, поэтому на заключительной стадии процесса полоса снова изогнется в сторону головки (положение 4).

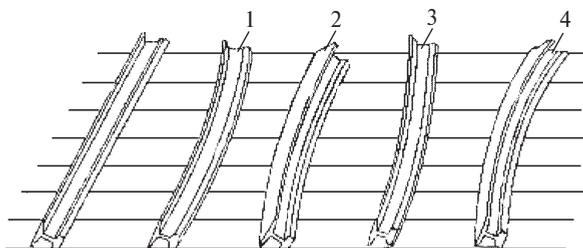


Рис. 13.29. Стадии искривления железнодорожного рельса на холодильнике

При правке профиля в холодном состоянии в нем возникают остаточные напряжения, которые отрицательно влияют на качество и долговечность. В связи с этим необходимо предусмотреть меры, компенсирующие изгиб полосы при остывании. На американских заводах предпочитают перед охлаждением на горячем прокате создать необходимый прогиб полосы (рельса), с тем чтобы после остывания форма его приближалась к прямолинейной. Такой путь требует дополнительной операции, поэтому дорог. На некоторых российских и зарубежных заводах в процессе охлаждения применяют регулируемое охлаждение, в результате которого профиль после охлаждения получает минимальное искривление. В УкрНИИмете разработали способ охлаждения рельсов на теплоизолированном холодильнике в положении “стоя на подошве”, который позволил снизить до минимума температурные напряжения.

Аналогичные исследования были проведены при охлаждении двутавровой балки. Показано, что при ее охлаждении в положении лежа остаточные напряжения значительно выше, чем в положении стоя (рис. 13.30). На теплоизолированном холодильнике можно добиться минимального искривления профиля.

На простых профилях температурные напряжения в меньшей мере ответственны за искривление профиля, хотя при неравномерном остывании углов и середины квадратных и полосовых профилей возникают значительные остаточные напряжения. Основной причиной изгиба является транспортировка полосы на холодильнике. На цепном холодильнике полоса перемещается с помощью пальцев, укрепленных на бесконечной цепной ленте. Понятно,

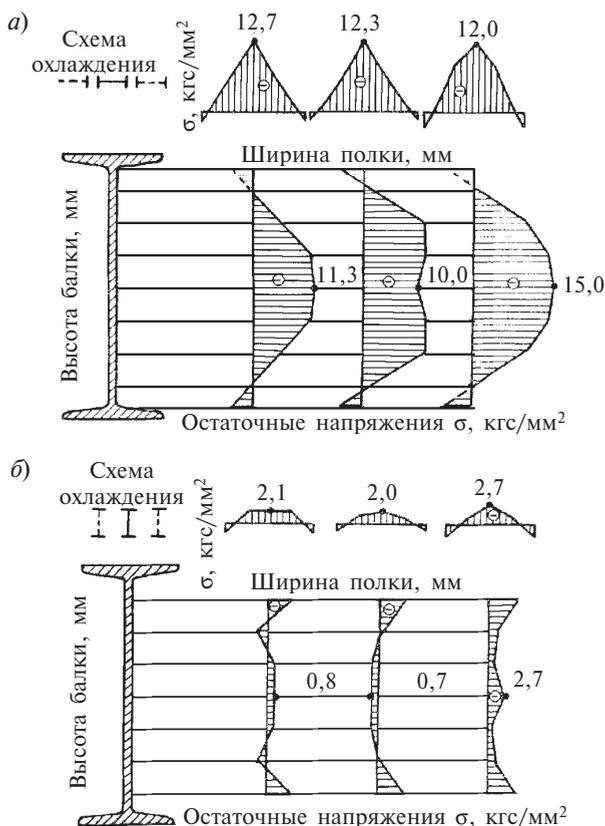


Рис. 13.30. Эпюры продольных остаточных напряжений в двутавровой балке:

a — остывание в положении лежа;
b — остывание в положении стоя

что остальные участки полосы могут отставать от тех, которые контактируют с пальцами, и полоса к концу остывания принимает некоторую синусоидальную форму. На мелких профилях применяют реечные или пластинчатые холодильники, предотвращающие искривление полосы при транспортировке по холодильнику.

Чтобы выправить в холодном состоянии искривленную по длине полосу, необходимо создать в ней напряжения, немного превышающие предел текучести материала, и малые пластические деформации. Наиболее распространенным является знакопеременный пластический изгиб на роликотправильных машинах (РПМ — рис. 13.31). Ролики такой машины располагаются в шахматном порядке.

Амплитуда изгиба полосы постепенно уменьшается, поэтому из последних роликов выходит выправленная полоса. Минимальное число роликов для правки равно пяти, но на практике применяют РПМ с большим числом роликов.

Существует несколько разновидностей РПМ. Одноплоскостные машины имеют один ряд роликов и выправляют полосу только в одной (вертикальной) плоскости. Такие машины наиболее распространены. Для правки проката од-

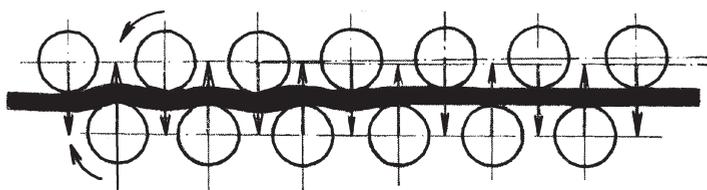


Рис. 13.31. Схема правки металла на роликоправильных машинах

новременно в двух плоскостях, что особенно важно для сложных профилей типа рельсов и балок, применяют двухплоскостные правильные машины. Они представляют собой по существу две машины, установленные в ряд. Одна из них имеет горизонтально, а вторая — вертикально расположенные ролики. Правка проката в нескольких плоскостях достигается также при использовании принципа стесненного кручения (рис. 13.32). Полоса проходит через несколько пар обычных правильных роликов и несколько пар роликов, имеющих дополнительные регулировки. Вторая группа роликов может поворачиваться на угол α относительно вертикальной оси, создавая необходимый момент для

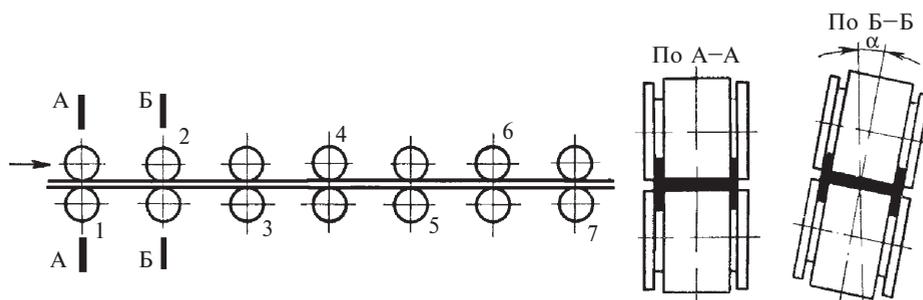


Рис. 13.32. Правка металла стесненным кручением:
1-7 — номера клеток

правки профиля по поперечному сечению. Эти же ролики можно смещать относительно линии правки вправо-влево и вверх-вниз, что позволяет осуществлять качественную правку сложных профилей типа балок и швеллеров.

Для более качественной правки разработаны машины с переменным (уменьшающимся к концу правки) или изменяющимся шагом роликов. Такие машины позволяют править широкий сортамент профилей, включая сложные.

Для круглого проката широкое распространение получили правильные машины с геликоидальными роликами (рис. 13.33). Образующая роликов расточена по гиперболе так, что при перекосе роликов на угол α заходящая в них полоса по всей длине роликов находится в контакте с ними. Перекос роликов обеспечивает разложение окружной скорости роликов ω на осевую и радиальную составляющие. Радиальная составляющая обеспечи-

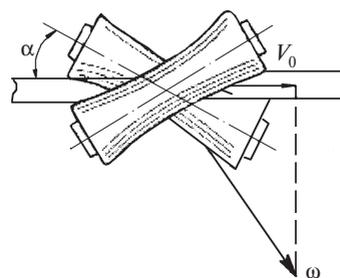


Рис. 13.33. Правка металла в геликоидальных роликах

вает вращение заготовки в роликах, а осевая — продвижение проката в направлении правки. Наиболее распространены машины с двумя роликами (см. рис. 13.33), однако существуют машины с большим количеством роликов.

Для правки сложных профилей, особенно когда не требуется высокая производительность правки, но качество правки должно быть повышенным, применяют правильно-растяжные машины (рис. 13.34). Они позволяют с помощью неподвижной 5 и подвижной 1 головок растягивать, доводя до предела текучести, и раскручивать в сечении прокат любой сложности из любой марки материала. Возможна правка профиля с его подогревом (в теплом состоянии) непосредственно на самой машине (путем пропускания электрического тока). Правильно-растяжные машины практически применяются тогда, когда правка на РПМ не обеспечивает требуемого качества правки из-за сложности профиля или высоких требований к его точности.

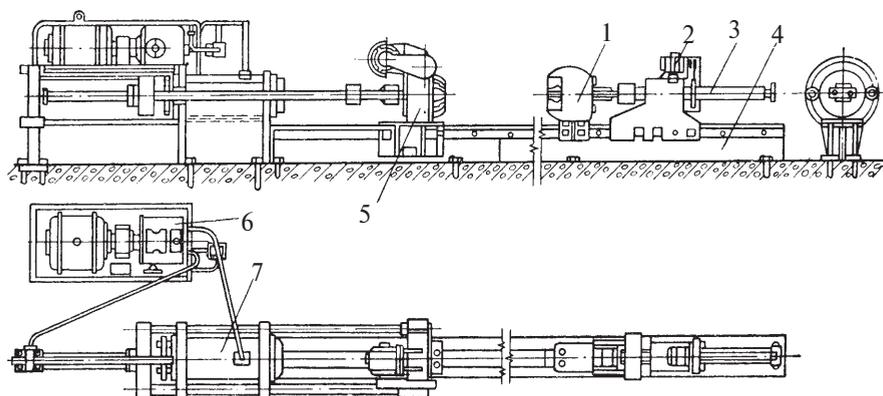


Рис. 13.34. Правильно-растяжная машина:

1 — вращающаяся головка; 2 — электродвигатель для установки головки; 3 — неподвижный винт с гайкой; 4 — станина; 5 — рабочая головка; 6 — насосная установка; 7 — гидроцилиндр для осевого перемещения рабочей головки

Другие операции отделки и адъюстажной обработки проката (операции второй и третьей группы) мы рассматривать не будем, хотя важность и ответственность этих операций в формировании качества готового проката очень велика. Однако на первый план здесь выходят конструктивные и организационные моменты, а технологические вопросы, как правило, тривиальны.

Необходимо отметить, что в мировой практике четко наметилась тенденция перенесения многих отделочных операций проката на заводы-склады. Такие предприятия покупают практически весь неотделанный прокат у металлургических предприятий и полностью освобождают их от контактов с потребителем. Потребитель покупает металл на заводе-складе, где имеется оборудование для снятия поверхностной окалины, правки, обдирки и шлифовки поверхности, волочения, обработки фасок, сортировки, дефектоскопии металла и других отделочных и контрольных операций. Такая организация металлоторговли выгодна как металлургическим и машиностроительным предприятиям, так и потребителям.

ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ СОРТОВОГО ПРОКАТА

Качество сортового проката как по точности, так и по дефектам поверхности в значительной мере определяется схемой деформации металла и калибровкой профиля. В свою очередь, схема деформации связана с конструкцией стана и другого оборудования цеха. Мы не будем давать рецептурных рекомендаций по расчету калибровки профилей и калибровки валков, так как это можно найти в существующих учебных пособиях, например в [6]. По данному пособию студент, скорее всего, не сможет до конца выполнить курсовое задание по расчету калибровки валков стана. Но он должен научиться анализировать технологические возможности стана, выбирать схему деформации металла, рассчитывать основные параметры деформации и получать характеристические размеры полосы. Пособие позволит понять, как те или иные режимы прокатки отражаются на точности и качестве готовой продукции.

14.1. Схемы прокатки простых профилей

Простые профили проката — круг, квадрат и шестигранник — прокатываются по общей схеме (рис. 14.1). Применяются три разные группы калибров, в каждой из которых решаются свои задачи. Несколько первых пропусков выполняются по системе ящичных калибров. Эти калибры позволяют легче, чем другие, освободить поверхность раската от печной окалины. В ящичных калибрах обжатие осуществляется в основном по двум сторонам заготовки, а две другие, находящиеся под воздействием небольшого бокового обжатия со стороны стенок калибра, свободно освобождаются от окалины. При использовании других систем калибров, например ромб—квадрат или овал—квадрат, когда обжатие осуществляется сразу по четырем сторонам, опасность вдавливания печной окалины в поверхность металла значительно выше.

Ящичные калибры в первых клетях стана необходимы также для стабилизации размеров заготовки. Заготовка, прокатанная на НЗС или другом заготовочном стане, имеет большие допуски, а часть заготовки с поверхности выборочно или полностью зачищена, поэтому поперечное сечение исходной заготовки имеет большой разброс по размерам. В ящичных калибрах формируются ее точные размеры, которые обеспечивают стабильную прокатку в следующих калибрах.

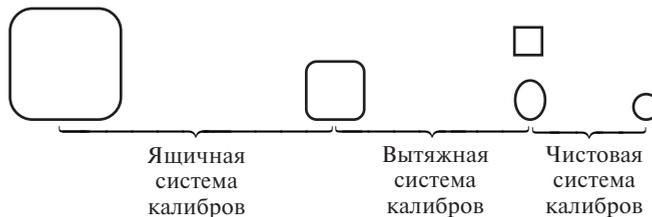


Рис. 14.1. Общая схема прокатки простых профилей

По сравнению с калибрами системы ромб—квадрат, предназначенной также для получения квадрата (кстати, более точного по геометрии), ящичные калибры имеют меньший врез в валки, не имеют концентраторов напряжений по дну калибра. Поэтому при прокатке больших квадратов (со стороной выше 150 мм) на крупносортовых и заготовочных станах применяются только ящичные калибры, обеспечивающие более высокую прочность валков.

Наконец, ящичная система калибров в первых пропусках, когда заготовка массивна, а температура металла высока, обладает достаточно высокой вытяжной способностью.

В вытяжной системе калибров, следующей за ящичной, стремятся за наименьшее количество пропусков при высоком качестве проката получить подкат требуемых размеров и формы сечения, который обеспечивает качественную прокатку в чистовой системе калибров. Основные системы вытяжных калибров: овал—квадрат, ромб—квадрат, овал — ребровой овал и их разновидности. Каждая из них имеет свои достоинства, недостатки и область применения на прокатных станах (см. разд. 6.5). Многие решают особенности конструкции конкретного стана и опыт калибровщика, разрабатывавшего схему деформации и калибровку валков стана.

При прокатке в чистовой системе калибров решается главная задача — получение готового профиля с требуемой точностью и без дефектов по поверхности. Обычно для простых профилей чистовыми являются два последних калибра.

Рассмотрим несколько реально действующих калибровок, в частности схему калибровки круглых профилей (рис. 14.2) на 10-клетевом среднесортном стане, расположение оборудования которого приведено подробно на рис. 13.24. Стан производит круглые профили от 30 до 87 мм по диаметру. На расстоянии 70 м от 10-й клетки стан имеет 3-клетевый калибрующий блок, и за счет горячекалиброванных профилей сортамент стана значительно расширен. При реверсивном режиме прокатки в первой клетке 530 можно варьировать размерами исходной заготовки. Третью клетку выполнили в виде гладкой бочки. Поскольку эта клетка находится в непрерывной группе со второй, то в ней можно обеспечить достаточно высокое обжатие без потери устойчивости и с надежным захватом. Выгода же от того, что не требуется затрат на нарезку калибра, очевидна.

Чистовая система состоит из предчистового овала, расположенного в вертикальной клетке, и горизонтального чистового круга. Первые четыре клетки выполнены по системе ящичных калибров, калибры клеток № 5—8 относятся к вытяжной системе и выполнены по системе овал — ребровой овал или овал—круг, что при небольшой вытяжке позволяет получать широкий набор круглых профилей из 6, 8 или 10 клеток. Становится возможным реализовать в полной мере идею универсализации калибровки, позволяющую при минимальном числе калибров на валках прокатать максимально возможное число профилеразмеров проката.

Гораздо больше проблем в выборе калибров вытяжной системы приходится решать на мелкосортных и проволочных непрерывных станах. Основная задача здесь состоит в том, чтобы обеспечить высокую устойчивость и стабильность процесса прокатки при высокой вытяжной способности применяемых калибров. Необходимо также сохранить универсальность калибровки.

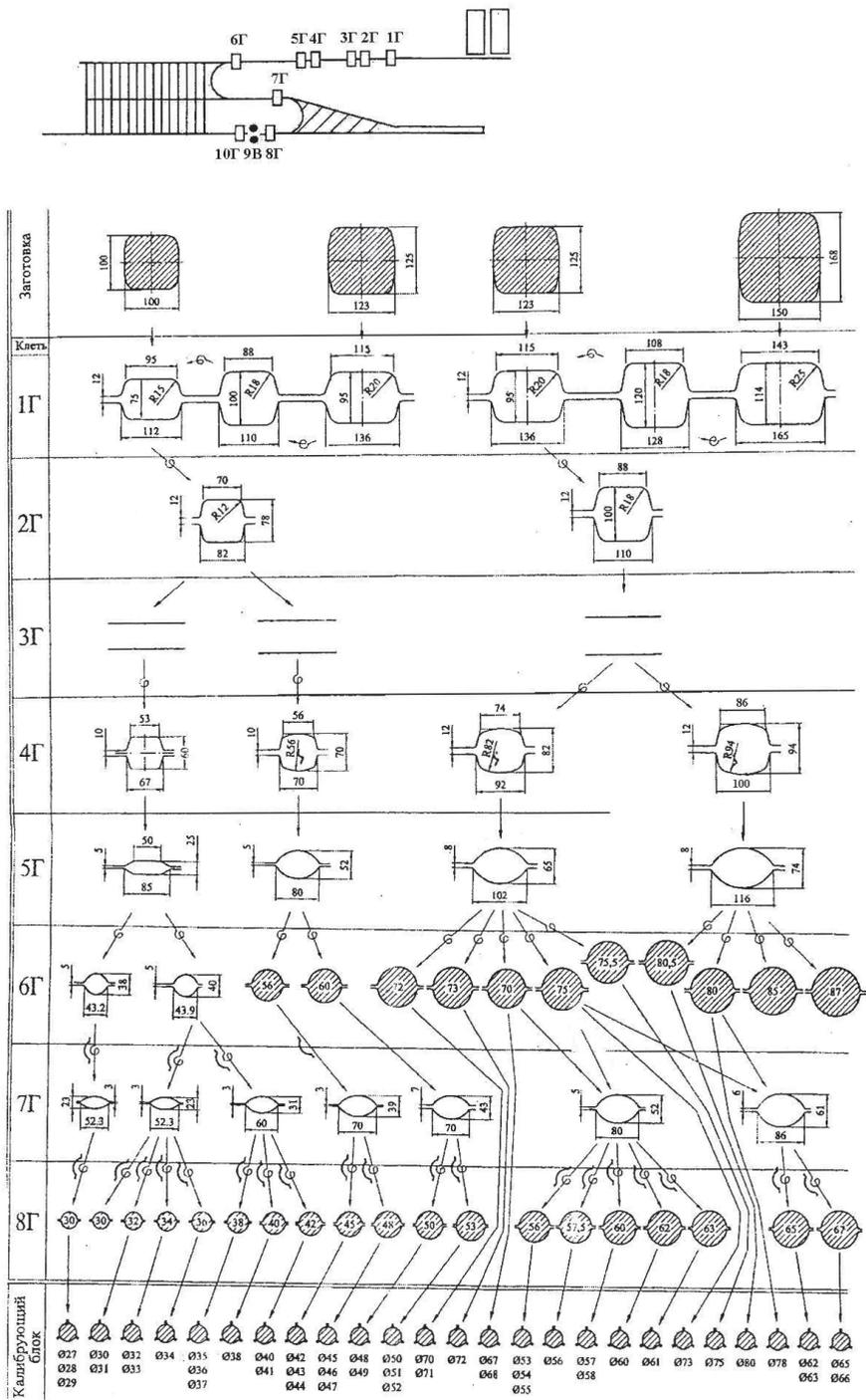


Рис. 14.2. Схема прокатки круглых профилей на среднесортном стане 350

Рассмотрим опыт освоения прокатки круглых и квадратных профилей на типовом мелкосортном стане 250 № 1 Криворожского металлургического комбината (рис. 14.3 и 14.4). Схема расположения оборудования стана представлена на рис. 13.3. Исходная заготовка — квадрат 80×80 мм, полученный на НЗС.

Прокатка квадратных профилей (см. рис. 14.4) протекает с использованием традиционной калибровки по системе ромб—квадрат, поэтому нет смысла ее анализировать. Калибровка же круглых профилей (см. рис. 14.3) более интересна. В черновых клетях 1—3 врезаны ящичные калибры. В вытяжных калибрах 4—11 первоначально была применена система овал—квадрат. Эта система обес-

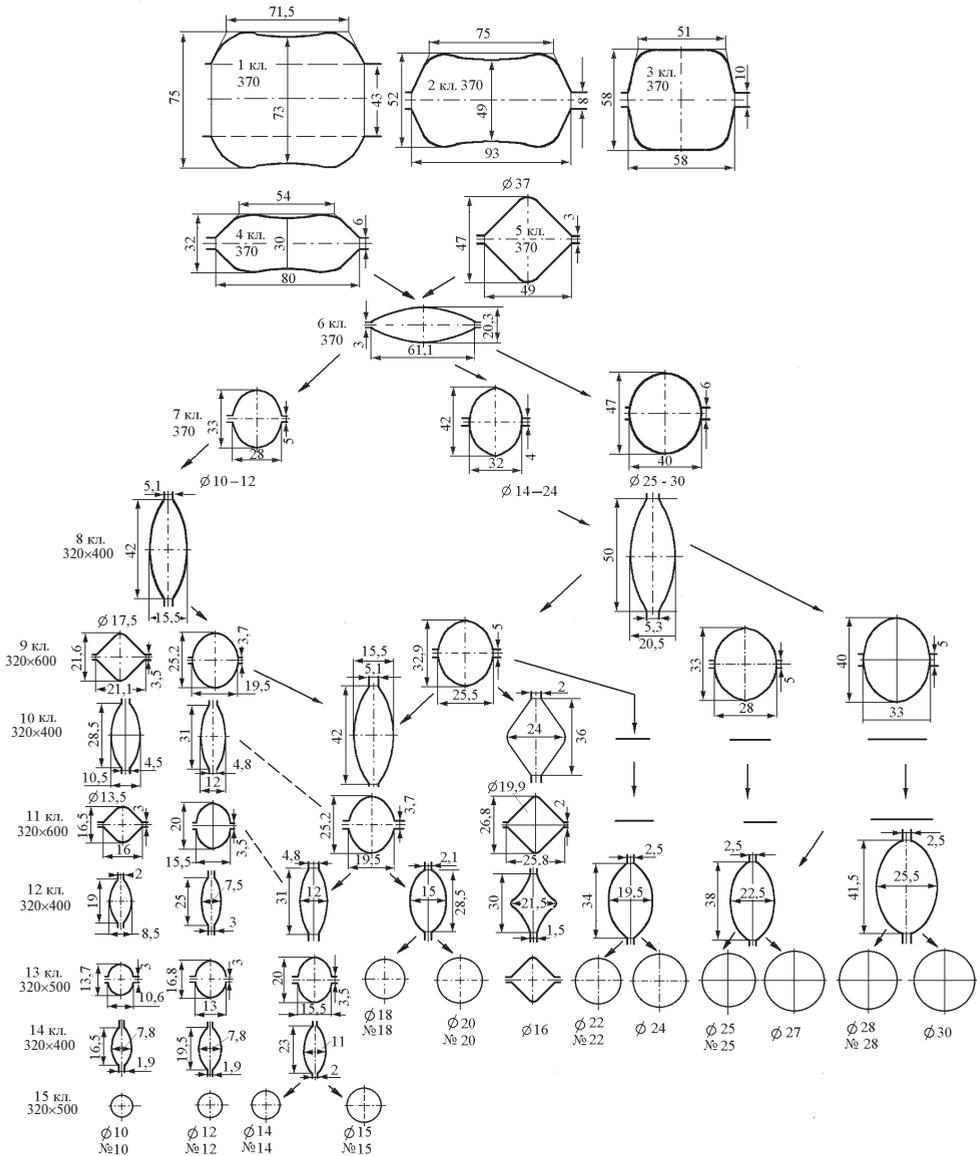


Рис. 14.3. Калибровка валков мелкосортного стана 250

печивает высокую вытяжную способность, позволяет прокатать сравнительно мелкие круги (от 10 до 14 мм по диаметру), причем при прокатке кругов выше 14 мм получается сравнительно низкий расход энергии на 1 т проката. Однако опыт показал, что по этой системе прокатка с натяжением проходит крайне неустойчиво. Вследствие натяжения квадратные калибры заполняются не полностью. Прокатка квадратной полосы с незаполненными углами в овальном калибре сопровождается скручиванием полосы между клетями, и нет способов удержать такую полосу в требуемом положении. Скручивание квадрата в овальном калибре вызывает искажение формы овала и нередко служит причиной застревания раската в валках. Эти недостатки особенно ощутимы при значительном натяжении полосы между клетями. Снижение натяжения уменьшает их, но полностью не устраняет. К тому же при низких натяжениях появляется опасность получить прокатку с петлей, на что стан не настроен. Это приводит, как правило, к аварии.

Таким образом, система овал—квадрат не обеспечила условий для нормальной устойчивой работы стана, поэтому была заменена системой овал —

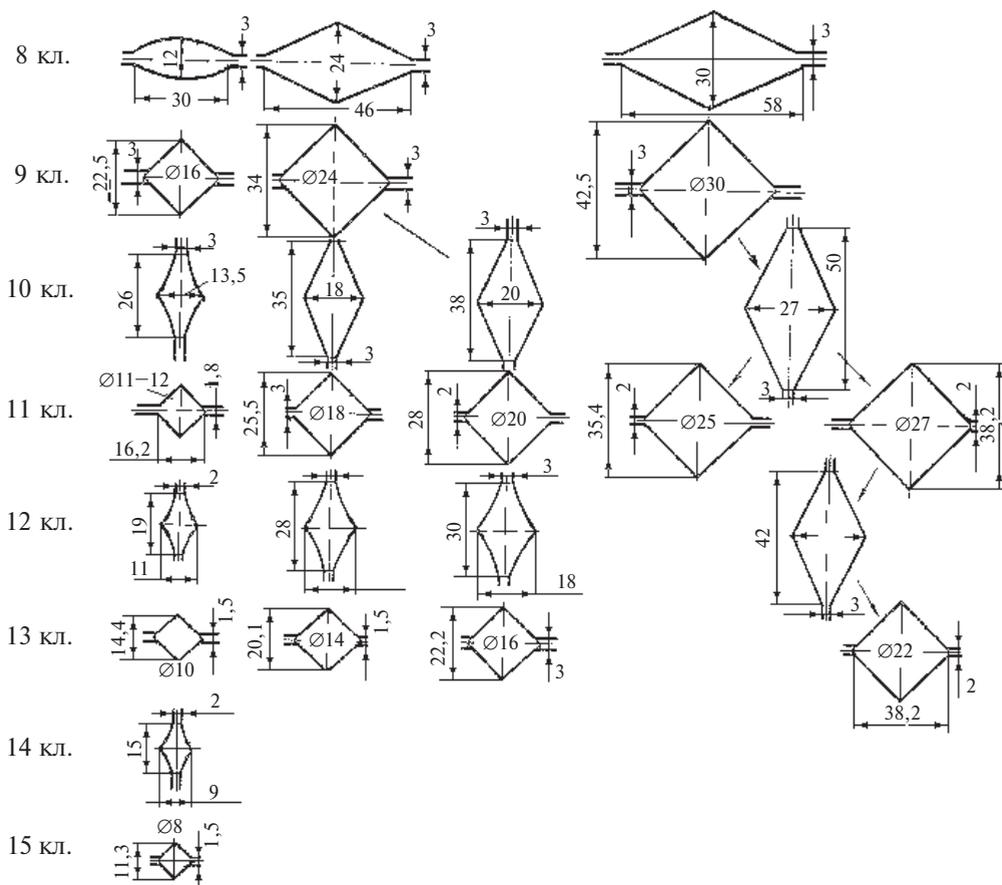


Рис. 14.4. Калибровка чистой группы клетей для прокатки квадратных профилей

ребровой овал. Прокатка во всех калибрах стала устойчивой. Даже при значительных колебаниях натяжения между клетями исчезли случаи петлеобразования в межклетевом промежутке. Наблюдается определенная неустойчивость при прокатке мелкой овальной полосы в ребровом овале. Однако при применении более тесных проводок недостаток устраняется. Несмотря на то что сама по себе система калибров овал — ребровой овал менее производительна, чем система овал—квадрат, при новой калибровке производительность стана повысилась за счет более стабильной прокатки, уменьшения переналадок, повышения стойкости калибров и других причин. Калибровка овал — ребровой овал в настоящее время успешно применяется на многих мелкосортных и проволочных станах.

Однако при хорошей системе регулирования натяжения, при соответствующей квалификации персонала применение системы овал—квадрат обеспечивает более высокую вытяжную способность. Это дает возможность применить более крупную исходную заготовку (квадрат 100×100 мм вместо 80×80 мм), что позволяет на проволочном стане существенно повысить производительность и расширить сортамент проката. Из этих соображений на рассматриваемом стане 250 цепочку для прокатки минимального круга диаметром 10 мм сохранили по системе овал—квадрат. Неустойчивость режима прокатки этого профиля смогли устранить за счет тщательной настройки стана и высокого уровня квалификации обслуживающего персонала.

На приведенных примерах видно, что калибровка валков определяет полностью как технологию прокатки, так и экономические показатели и организацию работы сортового стана.

14.2. Расчет калибровки простых профилей

Расчет калибровки профилей включает в себя расчет формы и размеров полос по всем пропускам и расчет размеров калибров, которые нарезаются на валках для реализации намеченных переходов. Нас будет интересовать первая часть процесса, и под термином “расчет калибровки” мы будем понимать расчет режима обжатия полосы и ее размеров и формы по проходам.

Расчет калибровки простых профилей обычно ведут против хода прокатки от чистового профиля к исходной заготовке. Последовательность этапов расчета проследим на примере 10-клетевого среднесортного стана 350 Кировского завода (см. рис. 13.24 и 14.2). Пусть задано рассчитать калибровку для прокатки на этом стане круглого профиля диаметром 30 мм из квадратной заготовки 100×100 мм. Допуск на указанный прокат обычной точности по ГОСТ 2590—88 составляет +0,3... –0,7 мм.

Распределение клеток стана под ящичную, вытяжную и чистовую системы

Этот важный этап расчета калибровки профилей в некоторых учебниках пропускается, в результате чего студенческие расчетные калибровки часто не согласуются с конкретным станом, не учитывают его особенностей.

Будем руководствоваться следующими правилами:

чистовая система для прокатки круглых, квадратных и шестигранных профилей состоит, как правило, из двух калибров;

количество вытяжных калибров всегда четно;

для ящичных калибров достаточно двух-четырех клетей.

Для стана 350 выберем четыре ящичных (клетки 1–4), четыре вытяжных (клетки 5–8) и два чистовых калибра (клетки 9 и 10). В качестве вытяжной для прокатки круглого (или шестигрannого) профиля назначаем систему калибров овал — ребровой овал. Распределение калибров по клетям (рис. 14.5) примерно соответствует заводскому (см. рис. 14.2).

Расчет чистовой системы калибров

В нашем примере чистовая система включает в себя чистовой круг и предчистовой овал. Чистовой калибр строится по номинальным размерам чистового круга (30 мм) с учетом теплового расширения при горячей прокатке и минусового допуска. Нарезанный на валках калибр должен обеспечивать прокатку профиля по минусовому допуску, чтобы в процессе износа калибра постепенно двигаться в сторону плюсовых допусков. Расчетный (горячий) диаметр круглого проката, выходящего из чистового калибра:

$$d_r = d_n (1 + \beta t) - \Delta,$$

где Δ — минусовый допуск; β — коэффициент температурного расширения прокатываемого металла.

При температуре прокатки $t = 1000\text{--}1150$ °С множитель $(1 + \beta t) = 1,012\text{--}1,013$.

Итак, получаем

$$d_{10} = 30 \cdot 1,013 - 0,7 = 29,7 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения $F_{10} = \pi d_{10}^2 / 4 = 3,14 \cdot 29,7^2 / 4 = 692,4 \text{ мм}^2$.

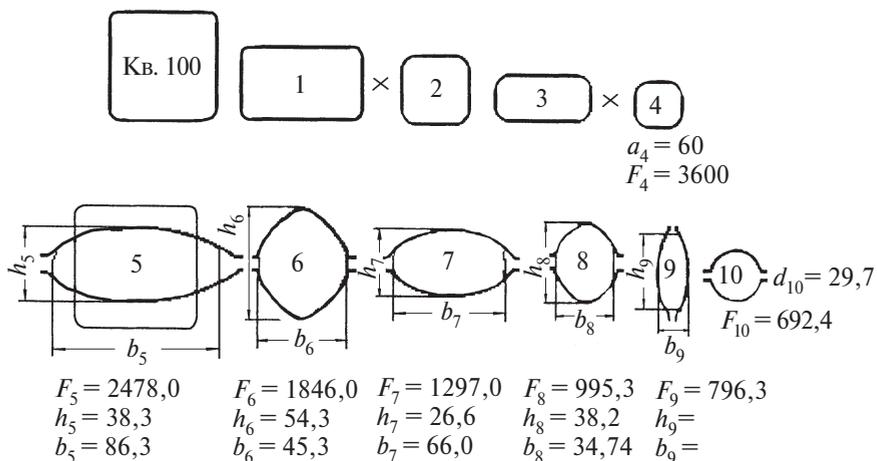


Рис. 14.5. Распределение калибров по клетям стана 350 и расчетные размеры полос по калибрам

Для расчета предчистового калибра назначаем вытяжки при прокатке в чистовом и предчистовом калибрах (с номерами 10 и 9). Обычно используют рекомендации, основанные на работе действующих калибровок: $\lambda_{\text{чист}} = 1,12-1,18$ и $\lambda_{\text{предч}} = 1,22-1,28$.

Выбираем $\lambda_{10} = 1,15$ и $\lambda_9 = 1,25$. Площади поперечных сечений:

$$F_9 = F_{10}\lambda_{10} = 692,4 \cdot 1,15 = 796,3 \text{ мм}^2,$$

$$F_8 = F_9\lambda_9 = 796,3 \cdot 1,25 = 995,3 \text{ мм}^2 = F_B.$$

Зная площадь поперечного сечения полосы F_B , выходящей из последнего вытяжного калибра, легко найти ее размеры. Если это квадрат, то его сторона $a_B = \sqrt{F_B}$. В нашем примере форма полосы F_B — ребровой овал. Для ребрового овала отношение осей колеблется в пределах 1,0–1,25. Выберем $h_8/b_8 = 1,1$ (в приведенной ранее заводской калибровке в восьмом калибре отношение осей ребрового овала равно 1,0).

Решаем систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$F_8 = 0,75 b_8 h_8 = 995,3;$$

$$h_8/b_8 = 1,1.$$

Получаем и заносим на чертеж (см. рис. 14.5) размеры: $b_8 = 34,74$ мм, $h_8 = 38,2$ мм.

Размеры предчистового овала h_9 и b_9 будем находить позже по методике расчета вытяжных калибров.

Выбор промежуточного квадрата между вытяжной и ящичной системами

В нашем примере промежуточным является квадрат из четвертой клетки со стороной a_4 . От его размеров зависит суммарная вытяжка в ящичной $\lambda_{\text{я}}$ и суммарная вытяжка $\lambda_{\text{в}}$ в вытяжной системе. Суммарные вытяжки $\lambda_{\text{я}} = \lambda_{1-4}$ и $\lambda_{\text{в}} = \lambda_{5-8}$.

Если допустить, что во всех калибрах вытяжки одинаковы, то средняя вытяжка будет такой:

$$\lambda_{\text{ср}} = \sqrt[n]{\lambda_{\Sigma}},$$

где $n = n_{\text{я}} + n_{\text{в}}$ — общее число пропусков; $\lambda_{\Sigma} = F_0/F_B$ — суммарная вытяжка в обеих системах.

Тогда площадь поперечного сечения промежуточного квадрата $F_{\text{я}} = (\lambda_{\text{ср}})^{n_{\text{я}}}$. В нашем примере $n_{\text{я}} = n_{\text{в}} = 4$, $n = 8$, $\lambda_{\Sigma} = 10000/995,3 = 10,05$. Значение $\lambda_{\text{ср}}$ мы вычислять не будем, воспользуемся тем, что $n_{\text{я}} = n_{\text{в}}$. Отсюда $\lambda_{1-4} = \lambda_{5-8} = \sqrt[4]{\lambda_{\Sigma}} = 3,17$, площадь поперечного сечения $F_4 = 10000/3,17 = 3154,6 \text{ мм}^2$, и сторона квадрата $a_{\text{я}} = \sqrt{3154,6} = 56,2$ мм.

Итак, при равенстве вытяжек в ящичной и вытяжной системах требуется квадрат $a_4 = 56$ мм. Можно его увеличить, тем самым ослабив вытяжки в ящичных и усилив их в вытяжных калибрах. Можно, конечно, поступить обратным образом. Но следует выполнить два ограничения.

С одной стороны, в ящичных калибрах обжатия не должны превышать максимально допустимых значений по углу захвата, поэтому проверяем, как на блюминге:

$$\sum \Delta h_{\text{я}} = k(h_0 - h_{\text{я}}) + k(b_0 - b_{\text{я}});$$

коэффициент уширения $k = 1,3-1,4$;

$$\Delta h_{\text{max}} = D(1 - \cos[\alpha]).$$

Должно быть $\sum \Delta h_{\text{я}} / \Delta h_{\text{max}} \leq n_{\text{я}}$, т. е. числа выделенных клеток должно хватить для прокатки в калибрах ящичной системы, если в каждой из них обжатия не будут превышать максимальных значений.

С другой стороны, необходимо проверить возможности вытяжной системы по ее вытяжной способности. Следует воспользоваться графиками вытяжной способности систем калибров, приведенными в [6] и на рис. 6.35, или усредненными рекомендациями, данными в учебниках по калибровке валков для выбранной системы калибров. Во всех случаях вытяжка в паре вытяжных калибров сравнивается с некоторой предельно допустимой.

В нашем случае назначим $a_{\text{я}} = 60$ мм (близко к расчетному 56,2 мм) и проверим возможность получения такого квадрата в ящичной системе. Возможности вытяжной системы сейчас проверять не будем. Если в ходе расчета вытяжной системы выяснится, что вытяжки превышают вытяжную способность, то вернемся к этому пункту расчета и все пересчитаем для другого квадрата $a_{\text{я}}$. Итак,

$$\sum \Delta h_{\text{я}} = 1,3(100 - 60) + 1,3(100 - 60) = 104 \text{ мм};$$

$$\Delta h_{\text{max}} = 480(1 - \cos 22^\circ) = 35 \text{ мм}; 104/35 = 3 < n_{\text{я}}.$$

Возможна прокатка заданного квадрата в четыре пропусков. Заметим, что квадрат 56 мм ничем не хуже заданного. При этом загрузка ящичных калибров возрастет, а опасность перегрузки вытяжной системы уменьшится.

Расчет ящичных калибров

В ящичной системе за $n_{\text{я}} = 4$ необходимо прокатать квадрат $a_{\text{я}}$. Расчет режимов обжатия полностью осуществляем по методике, рассмотренной для блюминга:

при известном суммарном обжатии $\sum \Delta h_{\text{я}}$ определяем среднее обжатие $\Delta h_{\text{ср}}$; вблизи среднего значения назначаем обжатия в каждом проходе Δh_i по возрастающему или убывающему графику; на сортовых станах обычно принимают убывающий график, хотя при обосновании возможен и график с возрастающим обжатием;

назначаем порядок кантовок;

заполняем таблицу обжатий, получая один из возможных режимов обжатий;

рассчитываем силы прокатки и моменты на валу двигателя по пропускам;

проверяем полученный режим обжатия по ограничениям по максимальному углу захвата, допустимому усилию и максимальному моменту; последняя проверка для реверсивного стана производится как на блюминге, а для неререверсивного — как на НЗС. Если все ограничения пройдены, то режим обжатия утверждается.

Расчет вытяжной системы калибров

Расчет вытяжной системы также следует проводить поэтапно.

Распределение парных вытяжек. Вытяжная система содержит $k = n_{\text{в}}/2$ пар калибров. В каждой из них содержатся неравноосный и равноосный (или почти равноосный) калибры, которые только в паре характеризуют вытяжную способность этих калибров и всей системы в целом. Вытяжку в j -й паре обозначим λ_j .

Парные вытяжки λ_j выбирают произвольно, руководствуясь следующими правилами:

произведение парных вытяжек по всем парам равно суммарной вытяжке $\lambda_{\text{в}}$ по вытяжной системе:

$$\lambda_{\text{в}} = \prod_{j=1}^k \lambda_j;$$

по ходу прокатки парные вытяжки убывают, так как это способствует получению более точных размеров проката для последующей чистовой системы; ни в одной паре вытяжки не должны превышать предельного значения.

Можно предложить несколько критериев, по которым выбор парных вытяжек оптимизируется. Снижение парных вытяжек по ходу прокатки соответствует максимуму качества металла. Можно выбрать критерием равенство по всем парам запаса вытяжной способности. Напомним, что запасом вытяжной способности в j -й паре называется коэффициент

$$Z_j = 1 - \frac{\lambda_j}{\lambda_{j \max}},$$

где $\lambda_{j \max}$ — максимально возможная вытяжка в данной паре калибров.

По этому критерию необходимо минимизировать разность $Z_{j \max} - Z_{j \min}$.

Возможны традиционные критерии оптимизации. Максимум производительности потребует, вероятно, распределения парных вытяжек по возрастающему графику, минимум расхода энергии не так однозначно связан с законом распределения вытяжек.

После выбора парных вытяжек легко рассчитываются все четные (равноосные) калибры вытяжной системы.

Возвратимся к нашему примеру.

Вытяжная система содержит две пары калибров с вытяжками λ_{4-6} и λ_{6-8} . Суммарная вытяжка $\lambda_{\text{в}} = F_4/F_8 = 3600/995,3 = 3,62$.

Назначаем парные вытяжки по убывающему графику:

$$\lambda_{4-6} = 1,95 \quad \text{и} \quad \lambda_{6-8} = 1,85.$$

Эти вытяжки не превышают максимально возможных для системы овал—ребровой овал, лежащих в пределах 2,1–2,3. Для проверки: произведение вытяжек дает число 3,62.

Площадь поперечного сечения полосы, выходящей из шестого калибра:

$$F_6 = F_4/\lambda_{4-6} = F_8\lambda_{6-8}; \quad F_6 = 3600/1,95 = 1846 \text{ мм}^2.$$

Назначаем отношение осей ребрового овала в пределах 1,00–1,25 (например, 1,20) и получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$1846 = 0,75h_6b_6;$$

$$h_6/b_6 = 1,2.$$

Решая ее, находим размеры равноосной полосы: $h_6 = 54,3$; $b_6 = 45,3$.

*Определение площадей поперечного сечения
неравноосных полос*

Система вытяжных калибров распалась на отдельные пары, в каждой из них имеется неравноосная (с номером $j1$) и равноосная (с номером $j2$) полосы (рис. 14.6). Внутри каждой пары неизвестными являются только размеры неравноосной полосы — F_{j1} , b_{j1} и h_{j1} .

В каждой паре известна парная вытяжка $\lambda_j = \lambda_{1j} \lambda_{2j}$, где λ_{1j} и λ_{2j} — вытяжки в первом и втором калибре пары. С другой стороны, частные вытяжки связаны соотношением

$$e = \frac{\lambda_{2j} - 1}{\lambda_{1j} - 1}.$$

Рекомендации по определению коэффициента e приведены в разд. 6.6.

Решая два уравнения, находим неизвестные λ_{1j} и λ_{2j} . Отсюда площади поперечного сечения неравноосных полос таковы:

$$F_{1j} = F_{0j} / \lambda_{1j} = F_{2j} \lambda_{2j},$$

где F_{0j} и F_{2j} — площади сечения предшествующей и последующей полос по отношению к рассматриваемому неравноосному сечению.

Вернемся к примеру.

В соответствии с рекомендациями, приведенными в разд. 6.6, отношения осей овальных калибров в системе овал — ребровой овал лежит в пределах $b_{об}/h_{об} = b_1/h_1 = 2,0-2,5$. При этом коэффициент e имеет значения в интервале $0,7-0,8$. Принимаем $e = 0,75$ и получаем для первой пары калибров систему двух уравнений

$$0,75 = (\lambda_6 - 1)/(\lambda_5 - 1);$$

$$\lambda_{4-6} = 1,95 = \lambda_5 \lambda_6.$$

Отсюда $\lambda_5 = 1,452$; $\lambda_6 = 1,342$. Аналогично система

$$0,75 = (\lambda_8 - 1)/(\lambda_7 - 1);$$

$$\lambda_{6-8} = 1,85 = \lambda_7 \lambda_8$$

дает $\lambda_7 = 1,423$; $\lambda_8 = 1,303$.

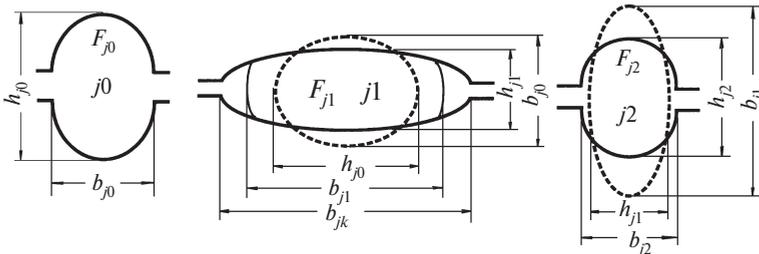


Рис. 14.6. Деформация в j -й паре калибров

Площади неравноосных полос таковы:

$$F_5 = F_4/\lambda_5 = 3600/1,452 = 2478 \text{ мм}^2; \quad F_7 = F_6/\lambda_7 = 1846/1,423 = 1297 \text{ мм}^2.$$

Нахождение размеров неравноосных полос

Существует несколько методик нахождения размеров неравноосных полос. Наиболее точные результаты обеспечивает методика, данная в [6]. Однако она требует наличия соответствующих программ. Рассмотрим две другие, более простые методики.

Первая из них (методика А.П. Чекмарева) основана на том, что на всех действующих станах с примерно одинаковыми диаметрами валков при прокатке низко- и среднеуглеродистых марок стали уширение металла в равноосном калибре определяется вытяжкой в паре калибров λ_j и шириной или стороной квадрата равноосной полосы (у нас шириной ребрового овала). Воспользуемся графиком (рис. 14.7), который построен на основании обработки данных по уширению металла при прокатке на многих действующих среднесортных станах с диаметром валков 350 мм.

По методике Чекмарева рассчитаем размеры овала в пятом калибре. При $\lambda_{4-6} = 1,95$ и $b_6 = 45,3$ по графику получаем $\Delta b_6 = 7$ мм. Отсюда $h_5 = b_6 - \Delta b_6 = 45,3 - 7,0 = 38,3$ мм, и из площади $F_5 = 0,75b_5h_5$ получаем

$$b_5 = F_5/(0,75 h_5) = 2478/(0,75 \cdot 38,3) = 86,3 \text{ мм}.$$

Отношение осей овала $b_5/h_5 = 86,3/38,3 = 2,2$ находится в пределах оптимальных значений.

Методика А.П. Чекмарева неприемлема в том случае, когда расчет производится для нетипового стана, для легированных марок стали, сплава на нежелезной основе и т. п. Недостаток этой методики состоит также в том, что

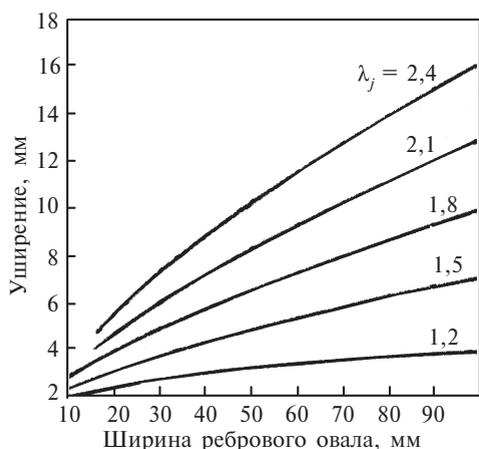


Рис. 14.7. Уширение овальной полосы в ребровом овальном калибре при прокатке в валках диаметром 350 мм

проверка деформации металла не осуществляется как в неравноосном, так и в равноосном калибрах. Такая проверка необходима, так как уширение меняется при прокатке разных марок стали (даже в пределах углеродистых), при разбросе температурных и иных условий прокатки даже на однотипных станах.

Вторая методика, которую назовем итерационной, лишена этих недостатков. В основе ее лежит утверждение, что существует только единственная неравноосная полоса (с номером $j1$) с размерами b_{1j} и h_{1j} , при которой достаточно хорошо заполняются калибры при прокатке исходной полосы в неравноосном калибре (с номером $j1$) и при прокатке неравноосной полосы в следующем равноосном калибре (с номером $j2$).

Представим расчет по итерационной методике в виде блок-схемы.

1. Задаем e (используем рекомендации, данные в разд. 6.6).

2. Задаем отношение осей неравноосной полосы b_{1j}/h_{1j} ; нам известна площадь $F_{1j} = \gamma b_{1j} h_{1j}$, где γ — коэффициент, зависящий от формы полосы; для овальной полосы $\gamma = 0,66-0,75$ (выше мы применяли значение 0,75), $\gamma = 0,5$ для ромбической полосы и т. п.; таким образом, имеем отношение осей и их произведение, откуда находим b_{1j} и h_{1j} .

3. Вычисляем уширение в неравноосном калибре; формулы для расчета уширения Δb_{j1} приведены в разд. 6.4 (для системы овал — ребровой овал — см. рис. 6.18); можно рекомендовать более точные формулы, приведенные в [6]; расчетная ширина неравноосной полосы

$$b_{j1\text{расч}} = h_{j0} + \Delta b_{j1};$$

если $|b_{j1\text{расч}} - b_{j1}| > \varepsilon$, где ε — заданная величина точности, то необходимо перейти к п. 2, иначе — к следующему пункту.

4. Вычисляем уширение равноосного сечения; по формулам разд. 6.4, соответствующим рис. 6.18 или приведенным в [6], находим уширение Δb_{j2} и расчетную ширину равноосной полосы:

$$b_{j2\text{расч}} = h_{j1} + \Delta b_{j2};$$

если $|b_{j2\text{расч}} - b_{j2}| > \varepsilon$, то необходимо перейти к п. 1, иначе — расчет неравноосной полосы закончен.

Заметим, что по одной из этих методик необходимо рассчитать также пропущенный ранее неравноосный профиль из чистовой системы.

В нашем примере по итерационной методике рассчитаем вторую пару вытяжных калибров (клетки 7 и 8).

1. Задаем $e = 0,75$.

2. Отношение осей овала $b_7/h_7 = 2,5$; решая совместно с уравнением $F_7 = 0,75b_7h_7 = 1297$, получаем $h_7 = 26,3$, $b_7 = 65,7$ мм.

3. Уширение рассчитываем по формуле

$$\Delta b = (0,4-0,5) \sqrt{\Delta h \cdot R_k} \frac{\Delta h}{h_{1\text{ср}}}$$

(см. разд. 6.4, рис. 6.18,б). Расчет по ней построен на размерах приведенной полосы, поэтому:

$$b_{6\text{пр}} = F_6/h_6 = 1846/54,3 = 34,0 \text{ мм}; h_{7\text{пр}} = F_7/b_7 = 1297/65,7 = 19,7 \text{ мм};$$

$$h_{1\text{ср}} = 0,5(b_{6\text{пр}} + h_{7\text{пр}}) = 0,5(34,0 + 19,7) = 26,85 \text{ мм};$$

$$\Delta h = b_{6\text{пр}} - h_{7\text{пр}} = 34,0 - 19,7 = 14,3 \text{ мм}.$$

Диаметр валков в седьмой клетке $D = 370$ мм, поэтому катающий радиус $R_k = D/2 - h_{7\text{пр}} = 370/2 - 19,7 = 165,3$ мм. Уширение

$$\Delta b = 0,45 \sqrt{14,3 \cdot 165,3} \frac{14,3}{26,85} = 11,7 \text{ мм};$$

$$b_{7\text{расч}} = h_6 + \Delta b = 54,3 + 11,7 = 66,0 \text{ мм}.$$

Расчетное значение ширины $b_{7\text{расч}}$ получилось близким к $b_7 = 65,7$ мм, следовательно, отношение осей овала мы выбрали правильно. Выбираем размеры овала $26,3 \times 66,0$ мм, площадь F_7 и вытяжки λ_6 и λ_7 при этом можно немного скорректировать, хотя при таких малых отличиях $b_{7\text{расч}}$ и b_7 можно этого не делать.

4. Рассчитываем уширение в равноосном калибре по формуле

$$\Delta b = (0,25-0,3) \sqrt{\Delta h \cdot R_k} \frac{\Delta h}{h_{\text{ср}}}$$

Имеем приведенные размеры: $h_{8\text{пр}} = F_8/b_8 = 995,3/34,7 = 28,7$ мм; $b_{7\text{пр}} = F_7/h_7 = 1297/26,3 = 49,3$ мм; $h_{7\text{ср}} = 0,5(b_{7\text{пр}} + h_{8\text{пр}}) = 0,5(49,3 + 28,7) = 39$ мм; $\Delta h = b_{7\text{пр}} - h_{8\text{пр}} = 49,3 - 28,7 = 20,6$ мм. По ним рассчитываем

$$R_k = D/2 - h_{8\text{пр}} = 370/2 - 28,7 = 156,3 \text{ мм};$$

$$\Delta b = 0,27 \sqrt{20,6 \cdot 156,3} \frac{20,6}{39} = 8,1 \text{ мм};$$

$$b_{8\text{расч}} = h_7 + \Delta b = 26,3 + 8,1 = 34,4 \text{ мм}.$$

Так как размеры $b_{8\text{расч}}$ и $b_8 = 34,74$ мм отличаются только на 0,3 мм, то вновь немного скорректируем размеры овала в седьмом калибре, увеличив его высоту на 0,3 мм. Получим размеры овала $26,6 \times 66,0$ мм и эти размеры заносим на рис. 14.5 как окончательные размеры полосы, прокатываемой в седьмой клетки.

Размеры овала, получаемого в девятой клетки, предлагается студентам посчитать самостоятельно по обоим методикам и сравнить их.

14.3. Прокатка и калибровка полосовой стали

Полосовой сталью называют сортовой прокат прямоугольного сечения с катаными (острыми) или закругленными краями (рис. 14.8). Размеры горячекатаной стальной полосы по ГОСТ 103–76 изменяются по высоте от 4 до 60 мм и по ширине от 11 до 200 мм. Прокат выпускается в виде прутков длиной до 12 м или в рулонах (по требованию заказчика).

Разновидностью полосовой стали является обручное железо с острыми кромками, шинное железо с закругленными краями, рессоры, штрипсы (заготовка для сварных труб), горячекатаная лента и т. п. По ГОСТ 103–76 выпускается прокат повышенной и обычной точности (с маркировкой соответственно Б и В). Предельные отклонения на полосы малых толщин ($h = 4-6$ мм) по толщине составляют при обычной точности $+0,3...-0,5$ мм, при повышенной $+0,2...-0,3$ мм, на толстые полосы ($h = 50-60$ мм) допуски соответственно $+0,3...-2,4$ и $+0,2...-1,8$ мм.

Полоса входит в сортамент практически всех сортовых станов общего назначения. Применяются также специализированные штрипсовые станы. Прин-

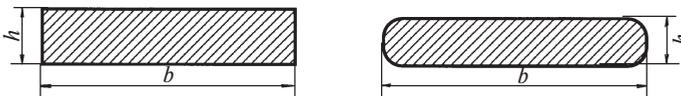


Рис. 14.8. Полосовая сталь

ципиальная схема прокатки полос на всех станах одинакова: при производстве мелких полос сначала могут следовать ящичные и вытяжные калибры, на выходе из которых получается квадрат заданного сечения со стороной a . Эта часть схемы прокатки, как правило, является общей и для других профилей — кругов, квадратов, уголков и т. д., обеспечивая универсальность калибровки по стану в целом. Далее следуют пропуски, в которых из квадрата a формируется требуемая полоса. На более крупных станах первая часть калибровки отсутствует, т. е. исходная квадратная заготовка имеет сторону a .

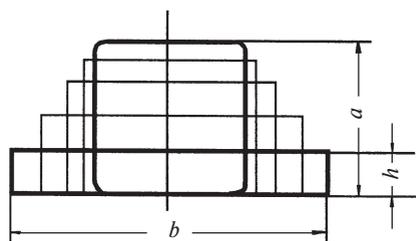


Рис. 14.9. Деформация металла в полосовых калибрах

Интерес представляет вторая часть калибровки полосы, которую условно назовем полосовой. Теоретически прокатка может проходить только в горизонтальных валках (рис. 14.9), и при суммарном обжатии

$$\sum \Delta h = a - h$$

за счет суммарного уширения $\sum \Delta b$ получается требуемая ширина полосы b . Отсюда

$$\sum \Delta b = b - a.$$

Отношение $\sum \Delta b / \sum \Delta h = k$ можно трактовать как средний показатель уширения за все пропуски. Обычно на сортовых станах он изменяется в пределах 0,3–0,45. Чем шире и толще полоса, тем меньше показатель k . Итак, имеем

$$k = \frac{b - a}{a - h}.$$

Отсюда сторона квадрата a , которая после прокатки только в горизонтальных валках без участия вертикальных обеспечивает заданные размеры полосы $h \times b$, такова:

$$a = \frac{b + kh}{1 + k}. \quad (14.1)$$

В связи с тем, что возможны ошибки в определении среднего показателя уширения k , фактически сторону квадрата a несколько увеличивают, а избыточное уширение устраняют в вертикальном (ребровом) пропуске. На стане с вертикальными и горизонтальными валками ребровых клеток может быть несколько. На стане без вертикальных клеток, как правило, одну предпоследнюю горизонтальную клетку делают ребровой.

Рассмотрим прокатку полосы на линейных станах (см. рис. 13.6 и 13.7). Это старая технология, хотя на многих заводах еще применяется. Трехвалковые клетки имеют ступенчатые валки (рис. 14.10, *a*), что позволяет за счет изменения расстояния между осями валков варьировать обжатия в широких пределах.

Предпоследняя клетка имеет ребровые калибры (рис. 14.10, *б*). Последняя клетка стана (2-валковая неревверсивная) используется для чистовой прокатки.

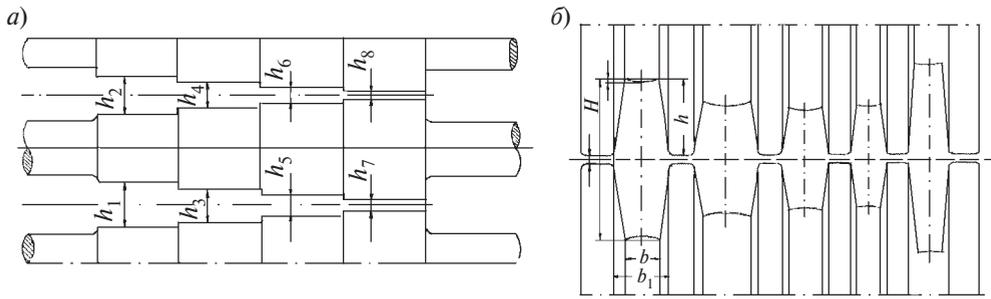


Рис. 14.10. Валки линейного стана для прокатки полосы: ступенчатые (а) и ребровые (б)

При таких валках на линейном стане весь сортимент полос можно прокатывать без перевалки, только изменяя зазор между валками при настройке стана. За счет изменения зазора между валками ребровой и чистовой клетей можно обеспечить требуемую точность проката.

Наиболее совершенной технологией является прокатка полосовой стали на непрерывных специализированных штрипсовых станах. Эти станы имеют короткую бочку валков с толстыми шейками, поэтому допускают высокие обжатия, обеспечивают высокую точность проката и выдерживают большие усилия. На специализированных штрипсовых станах имеется несколько вертикальных клетей, поэтому сторона требуемого квадрата a , вычисляемая по формуле (14.1), может быть увеличена до одного из больших типовых значений

(например, 80, 100 или 120 мм). Обычно этот квадрат является исходной заготовкой, а ящичные и вытяжные калибры отсутствуют. Для примера на рис. 14.11 приведена схема расположения клетей и схема прокатки полосы на среднесортном штрипсовом стане, имеющем 10 горизонтальных и 4 вертикальных клетки.

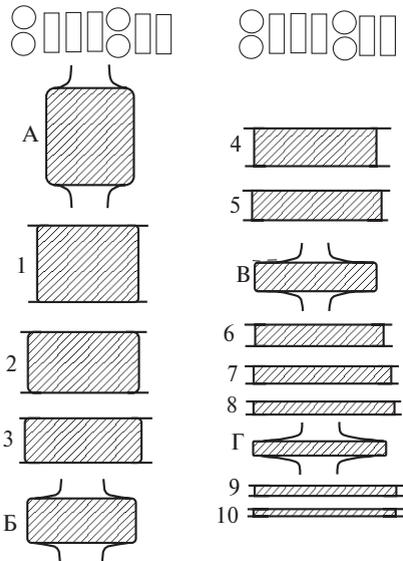


Рис. 14.11. Схема прокатки полосовой стали на специализированном непрерывном штрипсовом стане

Расчет полосовой части калибровки выполняется в следующем порядке.

1. Пересчитываем номинальные размеры прокатываемой полосы h_n и b_n на горячие размеры с учетом минусового допуска:

$$h = 1,012 h_n - \Delta_h; \quad b = 1,012 b_n - \Delta_b.$$

2. Вычисляем суммарный коэффициент высотной деформации:

$$\frac{1}{\eta_\Sigma} = \frac{a}{h}.$$

3. Частные коэффициенты высотной деформации по пропускам должны удовлетворять условию

$$\frac{1}{\eta_1} \frac{1}{\eta_2} \dots \frac{1}{\eta_n} = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\eta_i} = \frac{1}{\eta_\Sigma}. \quad (14.2)$$

Нумерацию всех горизонтальных клетей полосовой группы калибров $i = 1, 2, \dots, n$ обычно ведут от последнего к первому пропуску, т. е. против хода прокатки. Число горизонтальных клетей полосовой группы n определяется конструкцией стана или вычисляется по ходу расчета.

4. В значительной мере произвольно назначаем ряд чисел $1/\eta_i$, обеспечивающих произведение (14.2) и укладывающихся в рамки значений, принятых для большинства прокатных станов. Для первого по ходу расчета пропуска (чистового) принимают значения в пределах $1/\eta_1 = 1,2-1,3$. Для последнего по ходу расчета пропуска $1/\eta_n = 1,6-1,8$. Остальные значения выстраиваются в этих границах по убывающему закону к концу прокатки. Для контроля средних показателей высотной деформации должен укладываться в пределы

$$\frac{1}{\eta_{\text{cp}}} = \sqrt[n]{\frac{1}{\eta_\Sigma}} = 1,4-1,6.$$

Тем самым определяется и число n , и частные коэффициенты высотной деформации.

5. Вычисляем высоты в i -х пропусках:

$$h_{i+1} = h_i (1/\eta_i).$$

Обжатие $\Delta h_i = h_{i+1} - h_i$.

Уширение можно посчитать по любой формуле для прокатки на гладкой бочке, например по формуле Бахтинова с поправкой Смирнова:

$$\frac{\Delta b_i}{\Delta h_i} = \left[\frac{1,15}{2h_{i+1}} \left(\sqrt{0,5\Delta h_i D_k} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \right] \left(\frac{b_{i+1}}{h_{i+1}} \right)^y, \quad (14.3)$$

где μ — коэффициент трения.

Для горизонтальных клетей показатель $y = 0$, для ребровых пропусков $y = 1$.

6. Суммарное уширение во всех горизонтальных клетях

$$\Delta b_\Sigma = \Sigma \Delta b_i.$$

7. Обжатие в ребровом пропуске

$$\Delta h_p = (a + \Sigma \Delta b_i) - b.$$

Оно не должно превышать допустимого значения по углу захвата:

$$\Delta h_p < D(1 - \cos [\alpha]).$$

Пример. На 10-клетевом стане 350 (см. рис. 13.24) прокатываем полосу 50×8 мм. Горячие размеры полосы при минусовых допусках по толщине 0,5 мм и по ширине 0,8 мм:

$$h_{10} = 1,012 \cdot 8,0 - 0,5 = 7,6 \text{ мм}; \quad b_{10} = 1,012 \cdot 50 - 0,8 = 49,8 \text{ мм}.$$

При $k = 0,4$ размер квадрата

$$a \geq \frac{49,8 + 0,4 \cdot 7,6}{1 + 0,4} = 37,7.$$

Примем $a = 40$ мм. Суммарный коэффициент обжатия $1/\eta_{\Sigma} = 40/7,6 = 5,26$. Под полосовые калибры выбираем горизонтальные клетки 5–8 и 10; $n = 5$. Распределяем коэффициенты обжатия по пропускам от конца прокатки:

$$1/\eta_i = 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6.$$

Произведение этих чисел равно 5,26.

Высоты полос по клетям таковы: $h_{10} = 7,6$; $h_8 = 7,6 \cdot 1,2 = 9,1$; $h_7 = 9,1 \cdot 1,3 = 11,8$; $h_6 = 11,8 \cdot 1,4 = 16,5$; $h_5 = 16,5 \cdot 1,5 = 24,8$; $h_4 = 40,0$ мм (проверка: $24,8 \cdot 1,6 = 40,0$). Обжатия $\Delta h_{10} = 9,1 - 7,6 = 1,5$ мм; $\Delta h_8 = 2,7$; $\Delta h_7 = 4,7$; $\Delta h_6 = 8,3$; $\Delta h_5 = 15,2$ мм. Диаметры валков клетей 5 и 6 равны 480 мм, а клетей 7–10 — 370 мм.

$$\text{Уширения } \Delta b_5 = \frac{1,15 \cdot 15,2}{2 \cdot 40} \left(\sqrt{0,5 \cdot 480 \cdot 15,2} - \frac{15,2}{2 \cdot 0,5} \right) = 9,9 \text{ мм. Аналогично}$$

$\Delta b_6 = 7,0$; $\Delta b_7 = 4,0$; $\Delta b_8 = 2,6$; $\Delta b_{10} = 1,4$ мм. Суммарное уширение $\Delta b_{\Sigma} = 9,9 + 7,0 + 4,0 + 2,6 + 1,4 = 24,9$ мм. Обжатие в ребровом пропуске (клеть 9) $\Delta h_p = 40 + 24,9 - 49,8 = 15,1$. Уширение в ребровом пропуске вычисляется по формуле (15.3) при $v = 1$. В предчистовом ребровом пропуске уширение обычно мало, поэтому его часто принимают равным 0.

При $D_k = 300$ мм и $[\alpha] = 23^\circ$ допустимое обжатие в ребровом калибре.

$$\Delta h_{\max} = 300(1 - \cos 23^\circ) = 26 \text{ мм.}$$

Обжатие в ребровом пропуске 15,1 мм меньше допустимого 26 мм.

14.4. Прокатка и калибровка угловой стали

По ГОСТ 8509–93 производят равнополочную угловую сталь (уголки — рис. 14.12) с полками шириной b от 20×20 до 250×250 мм (уголки № 2–25) и по ГОСТ 8510–93 — неравнополочные угловую сталь 25×16–250×160 мм (№ 2,5/1,6–25/16). Минимальная толщина t профиля на уголках № 2 и 2,5 составляет 3 и 4 мм, для самых крупных уголков № 25 она изменяется в пределах 16–35 мм. Выпускаются уголки обычной и высокой точности (маркировка В и А соответственно). Допуски на ширину полок зависят от номера профиля, а на толщину — как от номера, так и от группы точности. Для уголков № 2 и 2,5 по ширине полок допуск составляет $\pm 1,0$ мм, а для № 22–25 он увеличивается до $\pm 4,0$ мм. По толщине мелкие уголки (при толщине 3 и 4 мм) по группе А имеют допуск $+0,2...-0,3$ и по группе В $+0,3...-0,4$ мм, а крупные уголки (при толщине выше 9 мм) по группе А имеют допуски $+0,4...-0,8$ мм и по группе В $+0,5...-0,9$ мм. Возможно отклонение от прямого угла при вершине до 35 мин. Регламентируется также притупление этого угла (на мелких уголках до $0,3t$ и на крупных — до 3 мм). В ГОСТе оговариваются также радиусы закруглений R и r и наличие прямого угла по концам полок. Они используются для построения калибровки валков, но на готовом прокате не контролируются. Длина готовых штанг, поставляемых потребителю, составляет 4–12 м.

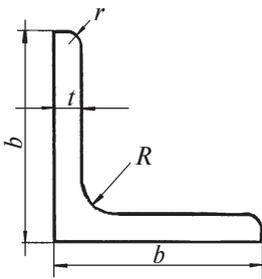


Рис. 14.12. Угловой равнобокий профиль по ГОСТ 8509–93

Большая доля угловых профилей производится на линейных, последовательных и других станах, где полоса при прокатке не испытывает натяжения или подпора со стороны соседних клетей. В этих условиях только за счет калибровки валков обеспечивается максимальная точность проката, есть возможность выполнить требования ГОСТа по углу и радиусам закруглений на торцах полок. На таких станах распространены три схемы прокатки профиля (рис. 14.13).

В *схеме прокатки с прямыми полками в закрытых калибрах* (рис. 14.13, I) центральный угол постепенно уменьшается от 180 до 90°. Закрытые калибры и чередование разъемов сверху и снизу обеспечивают высокую точность проката, достаточно хорошее выполнение угла и радиуса закругления на концах полок. Недостатком такого способа прокатки является сравнительно низкое обжатие полок по толщине, потому что деформация их осуществляется в боковом направлении (боковое обжатие). Кроме того, глубокий врез в валки и повышенный износ калибров из-за большой разницы скоростей валков и полосы по вершине и концам полок делают такую схему малоприменимой для прокатки средних и крупных уголков.

Этих недостатков лишена *схема прокатки с развернутыми полками в закрытых калибрах* (см. рис. 14.13, II). Центральный угол в первом калибре обычно принимают равным 130–145°, в последующих калибрах он постепенно уменьшается до 90°. В данной схеме прокатки полки на значительной части получают прямое (по вертикали) обжатие, что позволяет интенсифицировать их утонение. Количество пропусков по сравнению с прямополочной калибровкой сокращается, прокатка ведется при более высоких температурах, появляется возможность прокатки более тонкостенных профилей. Практически все достоинства предыдущей схемы прокатки здесь также сохраняются. Но схема прокатки с развернутыми полками в закрытых калибрах не применяется при производстве крупных уголков. При переходе от развернутых к чистовому калибру при-

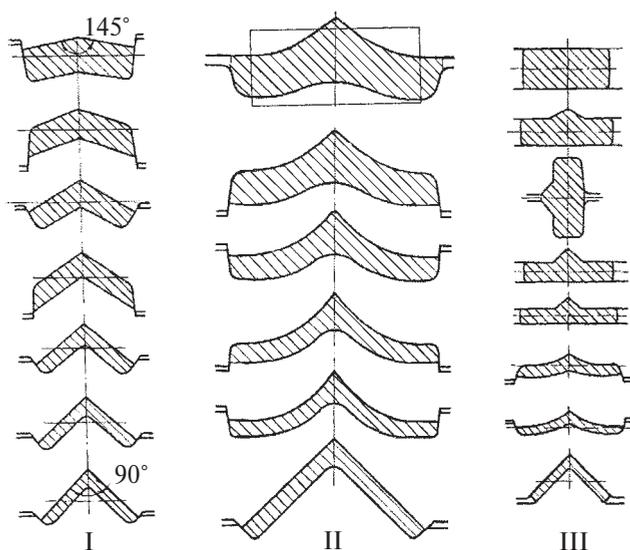


Рис. 14.13. Схемы прокатки угловых профилей

ходится совершать большую работу формоизменения, что ведет к уменьшению устойчивости прокатки, снижению условий захвата, появлению растягивающих напряжений на наружных гранях полок и, возможно, к появлению на них микротрещин. Для разгибания полок приходится применять несколько калибров. В связи с этим для крупных (и средних) профилей хорошо зарекомендовала себя промежуточная схема прокатки угловой стали с применением закрытых *развернутых калибров с постепенным сгибанием полок*. Эта схема принципиально построена так же, как и предыдущая (см. рис. 14.13, II), но полки начинают сгибаться раньше. Постепенный переход от полностью развернутых черновых к прямополочному чистовому калибру обеспечивает устойчивость и технологичность прокатки и высокое качество проката.

Во всех рассмотренных схемах прокатки применяются закрытые калибры с чередующимися разъемами сверху и снизу. Закрытость калибра позволяет контролировать ширину полок, а чередование разъемов обеспечивает поочередную проработку верха и низа концов полок и формирование записанных в ГОСТе прямого угла и радиуса на этом участке профиля. Это объективно должно было обеспечить высокую точность профиля. Но она на линейных станах недостижима из-за их конструктивных недостатков клетей.

На полунепрерывных и других станах, в том числе линейных, была разработана калибровка валков, в которой большую часть деформации осуществляют в *открытых калибрах* (см. рис. 14.13, III). Контроль ширины полосы осуществляется либо в вертикальных клетях, либо в ребровых пропусках (такой вариант показан на рис. 14.13, III). Последние калибры могут быть как открытыми, так и закрытыми. Эта схема прокатки позволяет деформировать металл более интенсивно, чем в закрытых калибрах, а меньшая точность в открытых калибрах

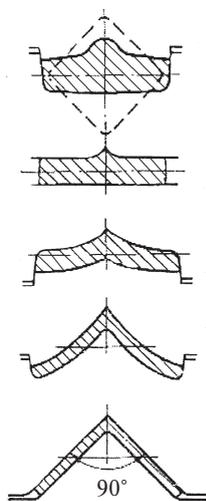


Рис. 14.14. Прокатка угловой стали при диагональном расположении заготовки в первом калибре

может быть скомпенсирована применением последних закрытых калибров при хорошо регулируемом и небольшом натяжении между клетями.

Приведенные схемы прокатки могут иметь разновидности. Если на рис. 14.13 исходная заготовка подается в первый калибр “плашмя”, то на некоторых станах предпочитают прокатывать ее “по диагонали” (рис. 14.14). Такая калибровка позволяет быстрее наращивать длину полок и поддерживать во всех калибрах угол при вершине постоянным (90°).

При прокатке неравнобоких уголков применяются те же схемы прокатки. Но расположение калибров на валках при этом несимметрично относительно вертикали. Возможны два способа их расположения (рис. 14.15). По первому способу биссектриса центрального угла проходит по вертикали (см. рис. 14.15, а). Вертикальные проекции полок различны, сила прокатки на левую и правую полки неодинаковы, поэтому валки при прокатке смещаются в осевом направлении, и толщина длинной полки получается больше, чем короткой. Необходимо на валках нарезать замки, чтобы предотвратить их осевое смещение.

При втором способе расположения калибров (см. рис. 14.15, б) силы на обе полки выравнены, прокатка обес-

печивает более высокую точность проката, не приводит к скручиванию профиля, протекает более устойчиво. Поэтому второй способ расположения калибров более распространен. Но в первом варианте при изменении зазора между валками толщина полок изменяется одинаково, и есть возможность прокатывать в одном калибре серию уголков с разной толщиной. Такой возможности не обеспечивает второй вариант.

При прокатке на непрерывных станах приведенные выше схемы прокатки не применяются. Прокатка с петлей приводит к полному искажению профиля между клетями, поэтому невозможна. При прокатке с натяжением колебания натяжения сильно сказываются на точности профиля. Как мы знаем, влияние натяжения на толщину определяется через колебания силы прокатки (формула Головина–Симса). На ширине полок колебания натяжения отражаются непосредственно через уширение и в большей мере, чем на толщине. Концевые участки по длине полосы заметно шире и толще, чем средняя часть. Если закрытый калибр настроить на концевой участок, то средняя часть полосы проходит закрытый калибр как открытый, без бокового стесняющего воздействия стенок калибра на уширение, отчего точность профиля недостаточна. Наоборот, если прокатку вести так, чтобы средняя часть полосы обрабатывалась стенками калибра по ширине, то концевые участки будут переполнять калибр, появится заусенец, который быстро изнашивает калибр, валки могут даже сломаться. Теряется смысл в закрытых калибрах.

При применении открытых калибров становится невозможным получение гостовской конфигурации кромок полок (требуемых ширины полок и точного радиуса и угла 90° по кромкам). В ГОСТе оговорено, что при сдаче продукции радиус и угол по кромкам не контролируются. Это не значит, что не надо стремиться к их выполнению. Очевидно, на непрерывных станах необходимо вводить дополнительные ребровые калибры для выравнивания и контроля ширины полок. Роль ребровых калибров могут выполнять вертикальные клетки, если они имеются.

На непрерывных и полунепрерывных станах применяется *полосовая схема прокатки уголков*, отличающаяся от схемы на рис. 14.13, III тем, что в ней полностью исключены закрытые калибры. Такая калибровка валков разработана на непрерывном мелкосортном стане 250 ЧерМК (рис. 14.16 и 14.17). В первых клетях стана, когда прокатка должна проводиться по системе ящичных калибров, широко используются преимущества прокатки на гладкой бочке. В последующих горизонтальных клетях поперечное сечение проката больше напоминает полосу, чем уголок. Это дает возможность прокатывать профиль как с натяжением, так и с петлей. Прокатку в обеих группах клетей удобнее проводить с небольшим натяжением. Это обеспечивает удобную работу, но

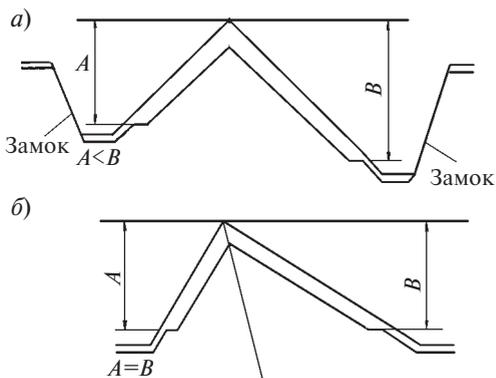


Рис. 14.15. Варианты расположения калибров на валках при прокатке неравнобоких уголков

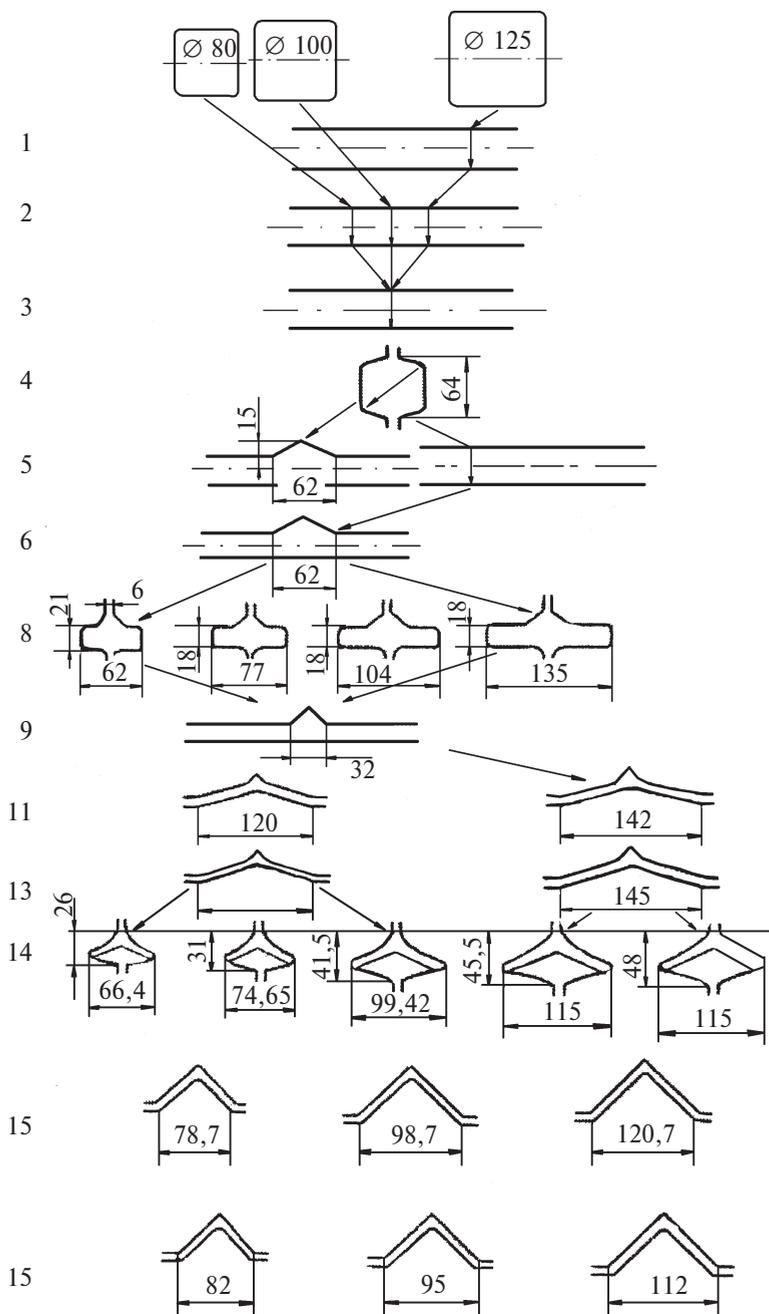


Рис. 14.16. Схема прокатки равнобоких уголков на мелкосортном стане 250 ЧерМК

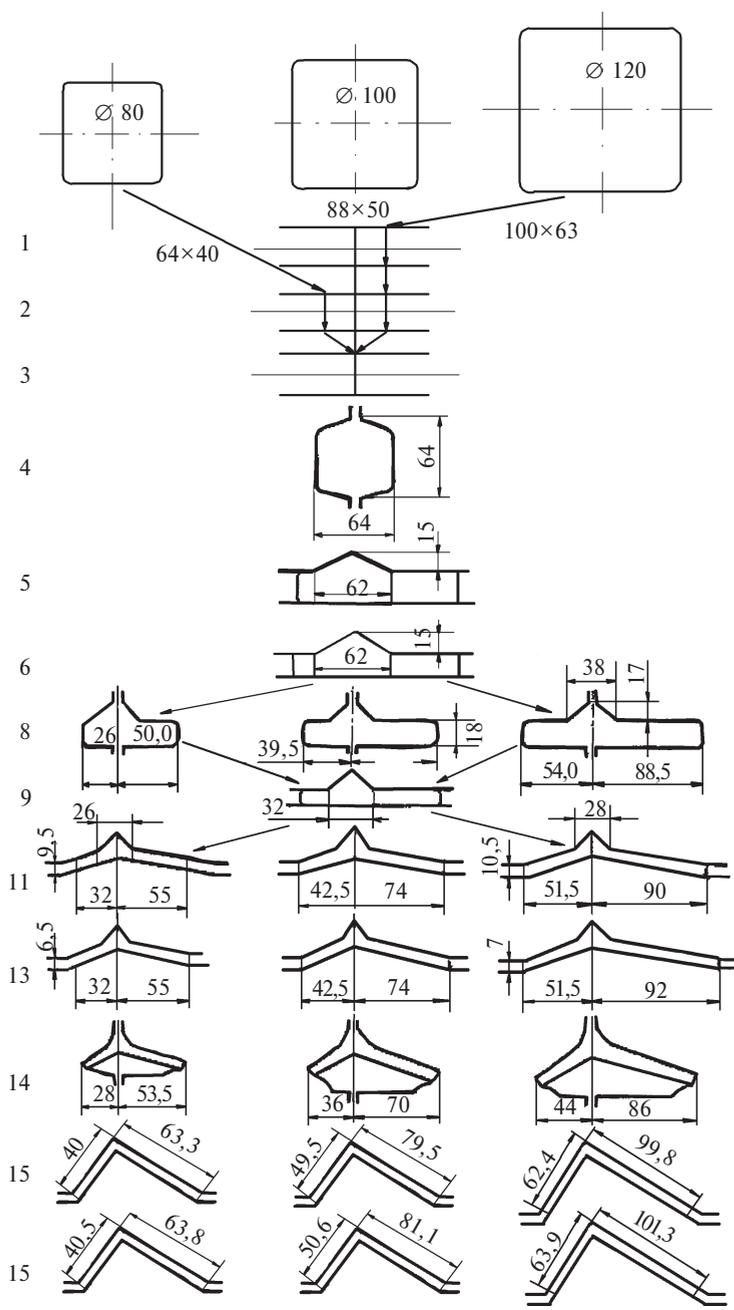


Рис. 14.17. Схема прокатки неравнобоких уголков на мелкосортном стане 250 ЧерМК

при такой прокатке закрытые калибры неприменимы. С другой стороны, без закрытых калибров точных размеров уголка получить не удастся. Поэтому точность профиля необходимо обеспечить в вертикальных клетях стана. В качестве ребровых используются 8-я и 14-я вертикальные клетки. Успех всей калибровки обеспечивается работой этих калибров. Они должны надежно удерживать профиль так, чтобы для выравнивания ширины полок допускалось различное их обжатие. Кроме того, ребровые калибры должны без образования наплывов устранять избыточное уширение концевых участков полосы.

На мелкосортном стане 250-1 Криворожского металлургического комбината, аналогичном череповецкому, калибровку уголков начали осваивать раньше, чем на ЧерМК, и основной идеей калибровки была ее универсальность (рис. 14.18). Калибры черновой группы клетей являются общими для прокатки круглых и угловых профилей. Овальная полоса, полученная в клетях 6, далее в чистовой группе используется для получения либо круглого проката, либо для уголка. Успех такой калибровки практически полностью определяется правильностью расчета деформации овальной полосы в калибре 7 и, что важнее, удержанием расчетных размеров при прокатке в этом калибре. Чтобы умень-

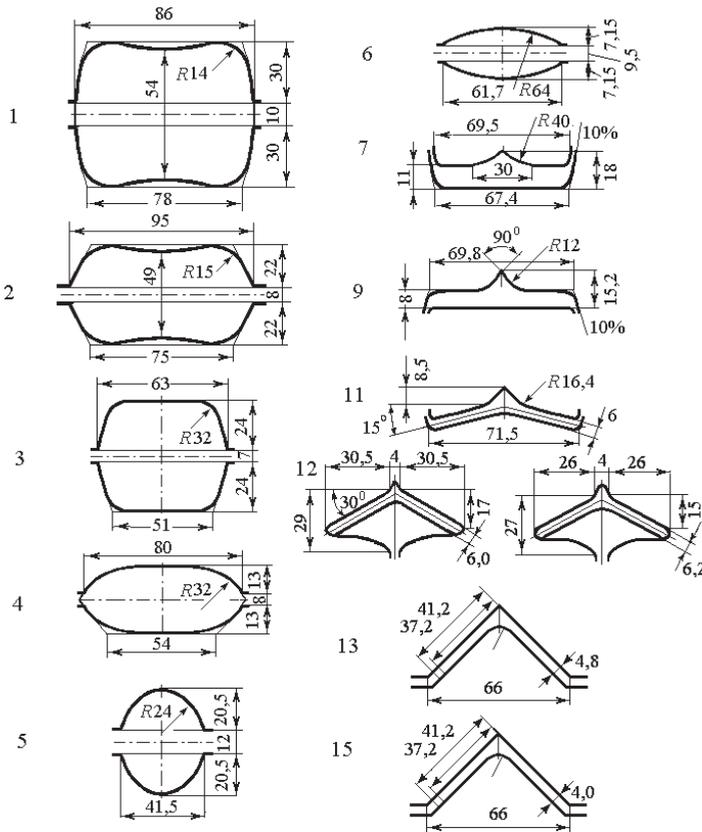


Рис. 14.18. Калибровка уголка на непрерывном мелкосортном стане по универсальному принципу

шить ошибки в уширении, здесь калибр выполнен закрытым (как и следующий). Но это, как известно, имеет смысл только при прокатке либо с небольшим и жестко регулируемым натяжением, либо с петлей при небольшом петлеобразовании и хорошей системе регулирования петли. На криворожском стане в чистовых клетях ведут прокатку с небольшой петлей. Точность при этом теряется, производительность стана уменьшается, а настройка стана усложняется. Теряются удобства работы на стане. Может быть, следовало бы выполнить калибры 7 и 9 открытыми, но подключить неиспользуемые вертикальные клетки 8 и 10 для формирования ширины полок профиля и организовать прокатку с натяжением. В этом плане череповецкая калибровка лучше криворожской.

Применяемые на других непрерывных мелкосортных станах калибровки различаются лишь конструкцией вертикальных калибров. На ЧерМК подобная схема прокатки уголков в открытых калибрах применяется также на среднесортном полунепрерывном стане 350 для уголков размерами от 50×50 до 75×75 мм.

14.5. Прокатка и калибровка двутавровых балок

Двутавровая балка (рис. 14.19) является одним из основных строительных профилей. Номер балки по ГОСТ 8239–89 соответствует ее высоте h в сантиметрах. Например, балка № 20 имеет высоту 200 мм. По этому ГОСТу выпускаются балки № 10–60. Наименьшая балка имеет размеры $h = 100$ мм, $b = 55$ мм, $s = 4,5$ мм, $t = 7,2$ мм, а самая крупная № 60 — $h = 600$ мм, $b = 190$ мм, $s = 12,0$ мм, $t = 17,8$ мм. Радиусы и уклоны (6–12 %) в ГОСТе указываются для построения калибровки, но на готовом профиле не контролируются. Отклонения по основным размерам определяются номером балки и группой точности профиля. Для мелких балок (до № 14 включительно) допуски по высоте h и ширине при обычной и повышенной точности составляют $\pm 2,0$ мм, по толщине стенки s и средней толщине полки t допуск при обычной точности составляет $-0,7$ мм и при повышенной точности $-0,4$ мм. Для крупных балок допуски на ширину и толщину при повышенной точности сохранены, а при обычной точности они повышены: по h до $\pm 2,5$ мм и по b до $\pm 3,0$ мм. Крупные балки по толщинам имеют допуск $-1,2$ мм при обычной и $-1,0$ мм при повышенной точности. В ГОСТе оговариваются также кривизна профиля (не более 0,2 % длины), притупление углов (до 2,2 мм) и отклонение по массе (+3...–0,5 %). Длина выпускаемых профилей от 4 до 12 м.

Основное предназначение двутавровой балки — работа на изгиб, поэтому ее важнейшей характеристикой является момент сопротивления изгибным нагрузкам и форма балки выбрана по максимальному значению момента сопротивления при минимальной площади поперечного сечения. Оптимальная форма двутавровой балки достигается при равном распределении металла между стенкой и полками. С ростом отношения высоты к толщине стенки h/d экономичность профиля возрастает.

ГОСТом предусмотрены также облегченные балки, имеющие меньшую толщину элементов, маркируемые бук-

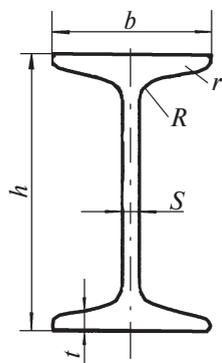


Рис. 14.19. Двутавровая балка по ГОСТ 8239–89

вой Л (например, № 20Л). С увеличением ширины полки b момент сопротивления балки растёт, поэтому предусмотрены широкополочные балки с маркировкой Ш (например, № 20Ш). Растёт потребность в облегченных балках, не имеющих уклонов по полкам. Однако с ростом отношений h/d и b/t и снижением уклонов резко возрастают трудности прокатки на существующем прокатном оборудовании. ГОСТ 8239–56, скорректированный в 1989 г., разработан с учетом требований как потребителя, так и возможностей прокатного оборудования. По этому ГОСТу основные прочностные параметры отечественных балок находятся на уровне зарубежных или превышают их. ГОСТ 8239–89 регламентирует жесткий минусовый допуск по толщине полок (-6%), задает ограничение по массе в пределах $+3\ldots-5\%$, определяет требования по состоянию поверхности балок и пр.

Значительное количество двутавровых балок и других видов проката, входящих в группу фланцевых профилей, производится на линейных рельсобалочных станах (рис. 14.20, см. также рис. 13.6). Такие станы имеются на металлургических комбинатах России (НТМК, ОХМК, КМК, Чусовской завод и др.), на многих украинских заводах (“Азовсталь”, г. Мариуполь, Днепродзержинск, Енакиево и др.). По конструктивным параметрам эти станы в значительной мере устарели и не могут производить крупные ($h > 700$ мм), а также широкополочные и облегченные (тонкостенные) балки. Большая доля двутавровых балок и других фланцевых профилей приходится на станы последовательного типа — станы 500 КМК и ММК (см. рис. 13.1).

Рассмотрим технологию прокатки и калибровку валков на стане линейного типа. Слиток после прокатки на блюминге 1150 поступает в реверсивную клеть 900 (малый блюминг) и после нескольких пропусков направляется в подготовительные клетки трио 800 с общим приводом. Последний чистовой пропуск производится в клетке дуо 750 с отдельным приводом. Для прокатки мелких балок № 10–16 применяют следующую калибровку валков.

В обжимной клетке (рис. 14.21) первым из фасонных следует разрезной калибр, назначение которого — обжать прямоугольную заготовку в середине сечения по ширине и подготовить ее для последующего формирования стенки и полок профиля. В данной калибровке прокатывается широкополочная балка, поэтому применено два разрезных открытых калибра *I* и *II*. Далее следуют два

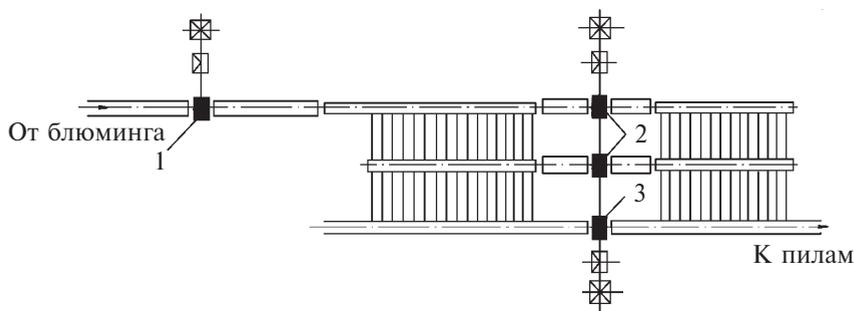


Рис. 14.20. Схема расположения клеток линейного рельсобалочного стана:

1 — 2-валковая реверсивная клетка 900 (малый блюминг); *2* — черновые клетки трио 800 (с общим приводом); *3* — чистовая неревверсивная клетка дуо 750

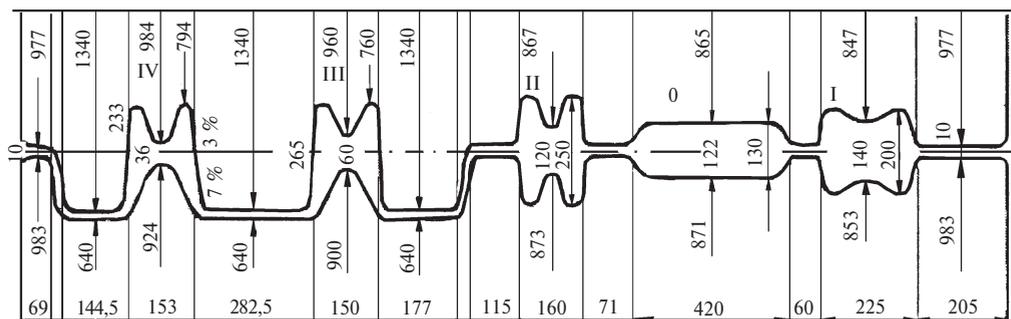


Рис. 14.21. Калибровка валков клетки 900 для прокатки балки № 16

закрытых калибра *III* и *IV*, заканчивающих перераспределение металла для формирования полок и стенки в последующей чистовой линии клетей. Открытые калибры обеспечивают меньший врез в валки, более высокое обжатие, чем закрытые, хотя в закрытых достигается большая точность и нет опасности образования заусенца по разьему калибра. В подготовительных клетях трио (черновой и предчистой) и чистовой клетки дуо (рис. 14.22) нарезаны так называемые балочные калибры. Средний валок имеет отдельный врез для верхнего и нижнего калибров. Видно, что калибры 8 и 9 нарезаны дважды с тем, чтобы продлить кампанию валков при износе калибров.

На рис. 14.23 приведен более точный чертеж балочных калибров для прокатки этой балки. По такой же схеме ведется прокатка балок № 12 и 14 на последовательном стане 550 (см. рис. 13.1).

В балочных закрытых калибрах боковые и внутренние грани полки имеют выпуск от 1–2 % в чистовом до 5–8 % в первом балочном калибрах (наклон к вертикали под углом от 0,5 до 3–5°). Эти уклоны необходимы для устранения окова валков при прокатке и для возможности переточки валков при износе. По такой калибровке невозможно прокатать балку без уклонов и не могут быть получены параллельные полки профиля.

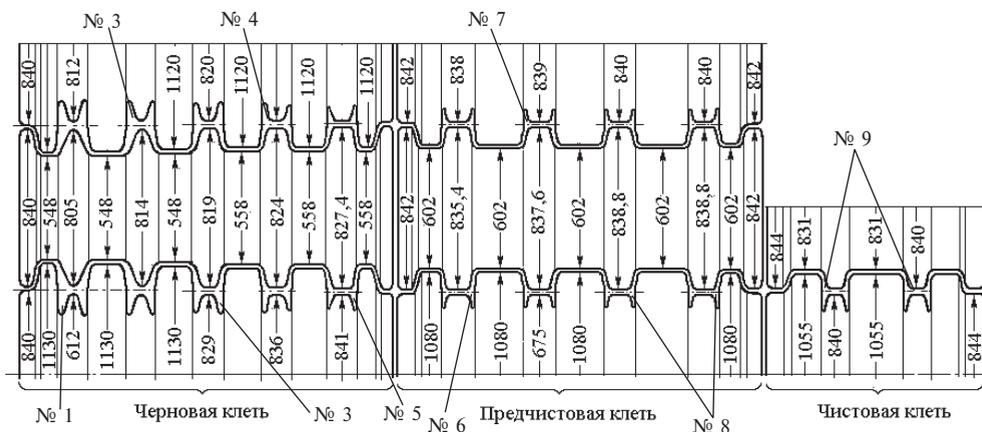


Рис. 14.22. Калибровка валков клетей трио 800 (черновой и предчистой) и чистовой 750

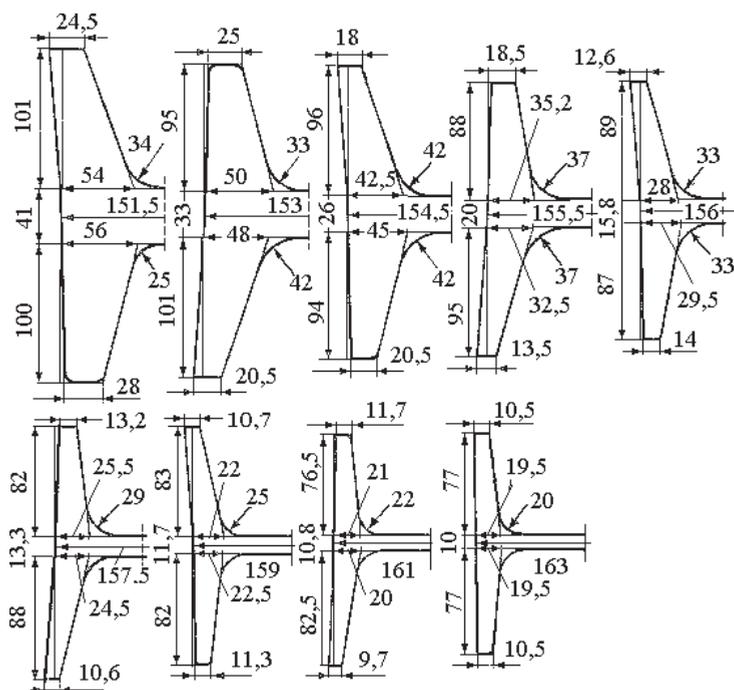


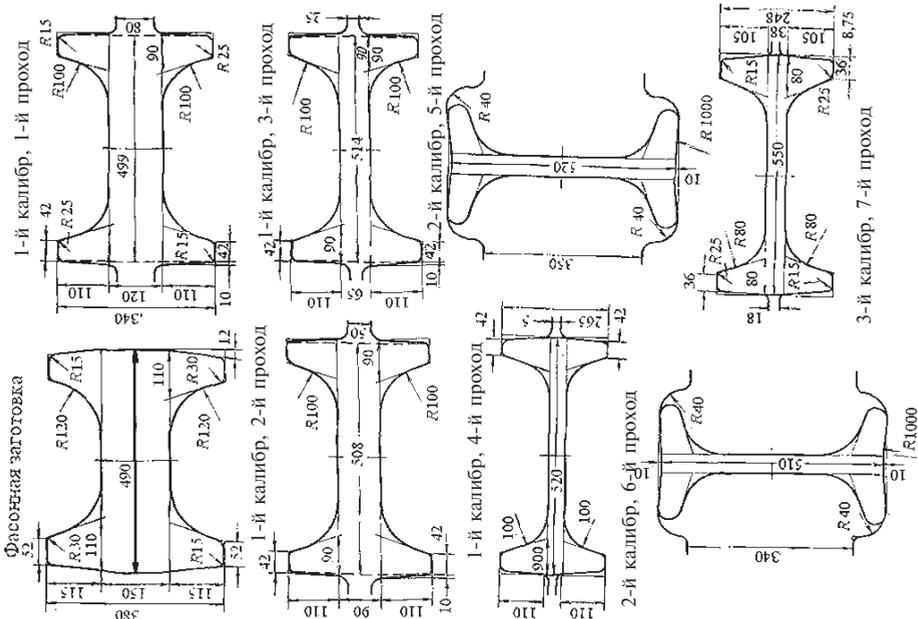
Рис. 14.23. Балочные калибры для прокатки балки № 16

Рассмотрим калибровку валков клетки 900 и чистовой линии клетей для прокатки более крупных балок (№ 60 — рис. 14.24). Калибровка чистовых клетей почти ничем не отличается от ранее приведенной. Калибровка же черновой клетки 900 принципиально отличается. Разрезные калибры (открытые) вынесены на блюминг 1150, и в клеть 900 поступает уже фасонная заготовка. Формирование ее до четвертого прохода продолжается по системе открытых калибров, поэтому возможны наплывы вблизи разъема. Эти наплывы, а также неровности грани полок устраняются в ребровых проходах 5 и 6 (на рисунках нумерация калибров и проходов дана по ходу прокатки).

В обеих приведенных калибровках в балочных калибрах применяются небольшие выпуски по полкам профиля. Наличие выпусков приводит к тому, что на готовом профиле полки непараллельны. Их выправляют и делают параллельными на правильной машине после охлаждения профиля.

Малые выпуски не обеспечивают интенсивную деформацию металла по полкам, так как они формируются только за счет бокового обжатия. При прокатке широкополочных и тонкостенных профилей это существенное ограничение. Чтобы прокатывать такие балки, необходимо увеличить выпуск по стенкам до 10–12 % и за счет этого увеличить обжатие по полкам. При этом стенку профиля изгибают (рис. 14.25). Появляется возможность выполнить угол 90° между полкой и стенкой, и на правильной машине правке будет подвергаться только стенка. Еще более интенсивная деформация полок достигается при наклонном расположении калибров в валках (рис. 14.26). При этом можно сократить число балочных калибров, увеличить температуру про-

а)



б)

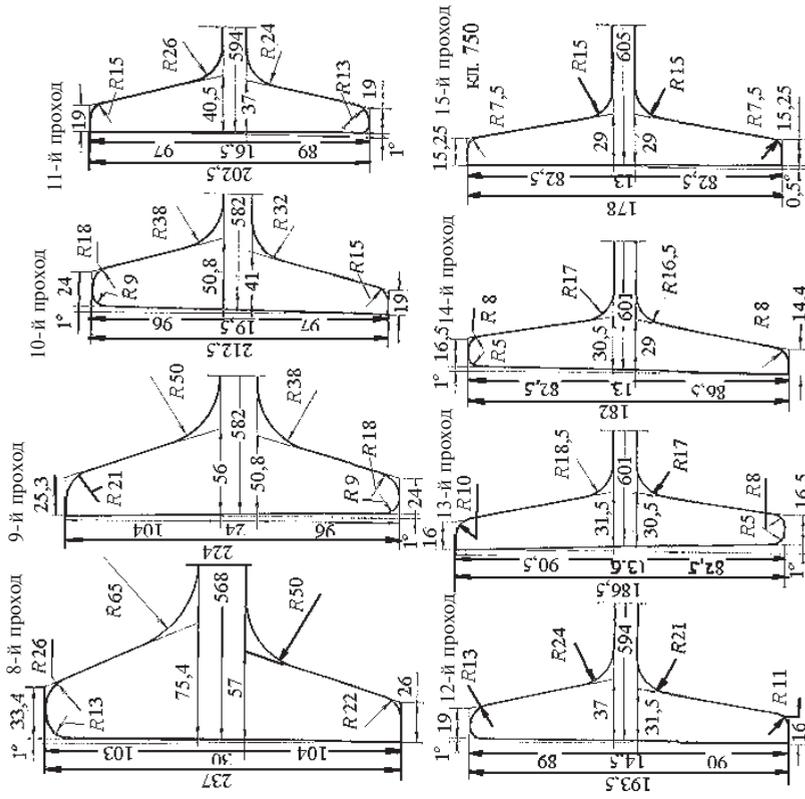


Рис. 14.24. Калибровка балки № 60: а — клеть 900; б — клетки 800 и 750

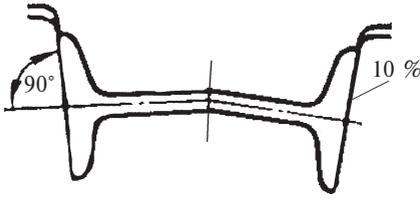


Рис. 14.25. Балочный профиль с изогнутой стенкой

катки металла в последних пропусках, прокатать балку с уменьшенными уклонами. Однако силы P_1 , P_2 и P_3 (показаны на первом калибре) не уравновешены, и их равнодействующая R_1 по верхнему валку сдвигает валок при прокатке вправо. Аналогично равнодействующая R_2 сил P_4 , P_5 , P_6 сдвигает нижний валок влево. Необходимо применять замки, но и в этом случае из-за износа замков толщина полок в процессе прокатки постепенно изменяется. Прокатка в наклонных калибрах применяется редко.

Необходимо рассмотреть основные особенности деформации металла в балочных калибрах. В литературе по калибровке принята терминология для обозначения элементов балочного профиля. Стенка профиля называется также шейкой. По полке профиля принято различать два фланца. Один из них полностью прокатывается в одном валке и называется закрытым. Второй фланец при прокатке формируется обоими валками и называется открытым. В процессе заполнения очага деформации оба фланца и стенка профиля деформируются по-разному (рис. 14.27).

Можно выделить несколько стадий деформации профиля. В сечении $I-I$ происходит касание бывшего открытого фланца профиля внешней стороны нижнего калибра. Происходит изгиб этого фланца профиля и заполнение закрытого фланца калибра. В положении $II-II$ в контакт с верхним валком вступает бывший закрытый фланец профиля, происходит окончательная отгибка обоих фланцев. К сечению $III-III$ закрытый фланец калибра практически полностью заполняется, и активная стадия деформации закрытого фланца заканчивается. На этой же стадии в верхнем валке происходит также деформация открытого фланца профиля. Важно отметить, что деформация обоих фланцев происходит за счет бокового обжатия, поэтому большие вытяжки фланцев невозможны. Стенка профиля еще не вступает в контакт с валками. За счет взаимодействия

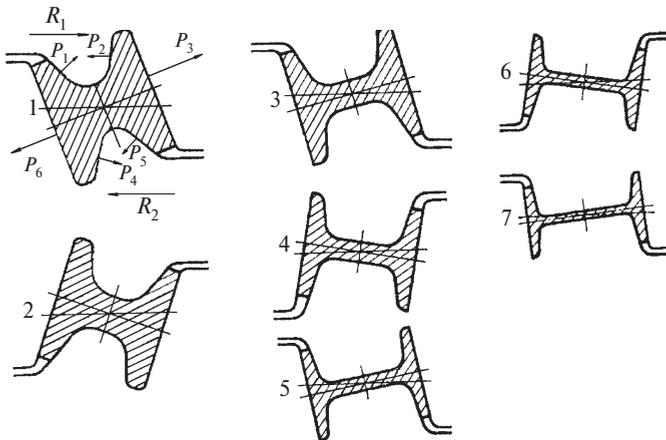


Рис. 14.26. Прокатка балок в наклонных калибрах

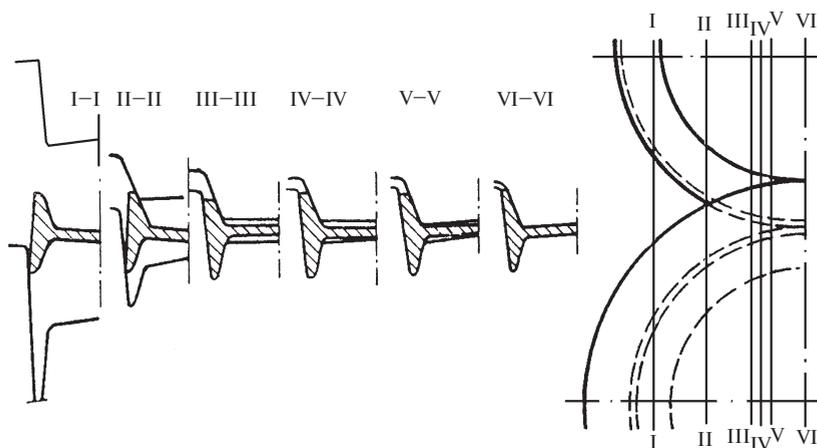


Рис. 14.27. Процесс заполнения очага деформации в балочном калибре

с фланцами она принудительно вытягивается и испытывает утяжку по толщине. В свою очередь, фланцы должны испытывать вынужденное уширение, происходит их наращивание. Наращиванию длины закрытого фланца мешают силы трения. Преодолевая их, металл неохотно течет в сторону закрытого фланца. Большая часть смещаемого объема металла устремляется в сторону открытого фланца, длина этого фланца наращивается интенсивно. К сечению *IV–IV* этот процесс протекает еще более выражено, так как деформация закрытого фланца уже прекратилась. В сечении *V–V* в контакт с валками вступает стенка профиля. Получая прямое обжатие, стенка деформируется более интенсивно, чем фланцы. Вплоть до сечения выхода *VI–VI* вытяжка стенки больше, чем фланцев. В результате их взаимодействия металл из фланцев перетекает в стенку, оба фланца сокращают свою длину. Таким образом, характер деформации в балочном калибре очень сложен, с неоднократным перетеканием металла из одной части профиля в другую.

Видно также, что почти на всех этапах деформации металла в балочном калибре имеется возможность немного увеличить длину стенки профиля за счет ее растяжения. Таким образом, ширина балочного калибра определяется не уширением металла, а растяжением стенки. Поэтому уширение в нем не рассчитывают, а назначают в соответствии с некоторыми рекомендациями.

На описанную картину накладывается так называемый скоростной фактор деформации в балочном калибре. Впервые он описан и рассчитан на конкретной балке № 24 (рис. 14.28) проф. В.Е. Грум-Гржимайло в книге “Прокатка и калибровка” (1933).

Как видно, в разных частях профиля катающие диаметры валков различны, различаются также окружные скорости валков ($V = \pi Rn/30$). Скорость валков по стенке примем за 100 %. Вся полоса выходит из валков с одинаковой скоростью — скоростью стенки (100 %). Скорость валков по закрытому фланцу меньше (для балки № 24 она составляет 88 %), следовательно, металл закрытого фланца проскальзывает относительно валков, дополнительно вытягиваясь,

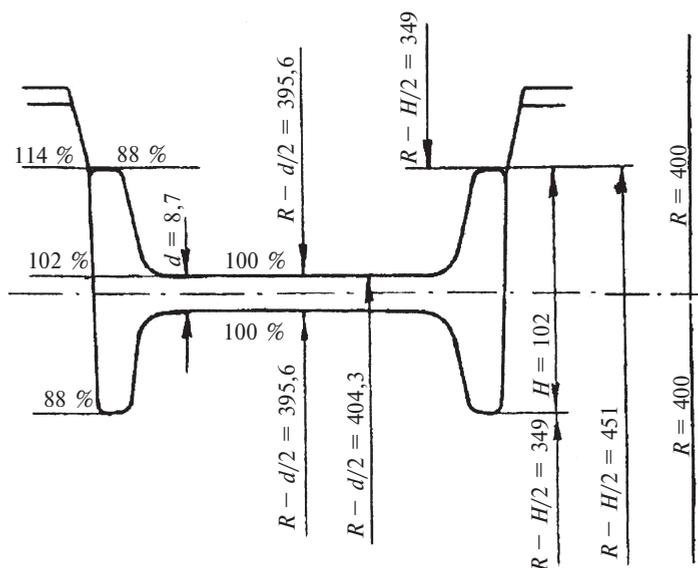


Рис. 14.28. Анализ скоростного фактора при прокатке в балочном калибре

чтобы иметь скорость остальной полосы. Происходит его утяжка, которая реализуется через уменьшение длины закрытого фланца. Открытый фланец находится в иных условиях. Скорость верхнего валка на конце открытого фланца выше средней (114 %), а нижнего — ниже средней (88 %). В целом открытый фланец находится примерно под таким же скоростным воздействием, что и стенка.

В конечном итоге под действием перетекания металла в калибре и скоростного фактора длина закрытого фланца при прокатке уменьшается, а длина открытого фланца увеличивается. Чтобы увеличить длину обоих фланцев профиля, необходимо чередовать разъемы валков и положение открытых и закрытых фланцев. Это наблюдается во всех приведенных выше калибровках.

Но, очевидно, возможности наращивания длины фланцев в балочных калибрах ограничены и прокатка широкополочных балок затруднена. Прокатка широкополочных и облегченных балок, не имеющих уклонов полок, стала возможной после строительства станом с универсальными клетями. На рис. 13.4 приведена схема расположения оборудования среднесортно-балочного стана 450, в сортамент которого входят балки до № 18 включительно. Из схемы расположения клетей и калибровки валков стана (рис. 14.29) видно, что в черновой группе клетей применяется новый метод прокатки в балочных калибрах с нечередующимися разъемами, повышенными уклонами и резким выпрямлением уклонов в вертикальных клетях перед задачей в следующую пару балочных калибров с противоположным направлением уклонов. Такая калибровка выполнена в Уральском политехническом университете и запатентована. В чистовой группе клетей применяются балочные и универсальные калибры, позволяющие прокатывать тонкие и длинные фланцы профиля без уклонов у основания.

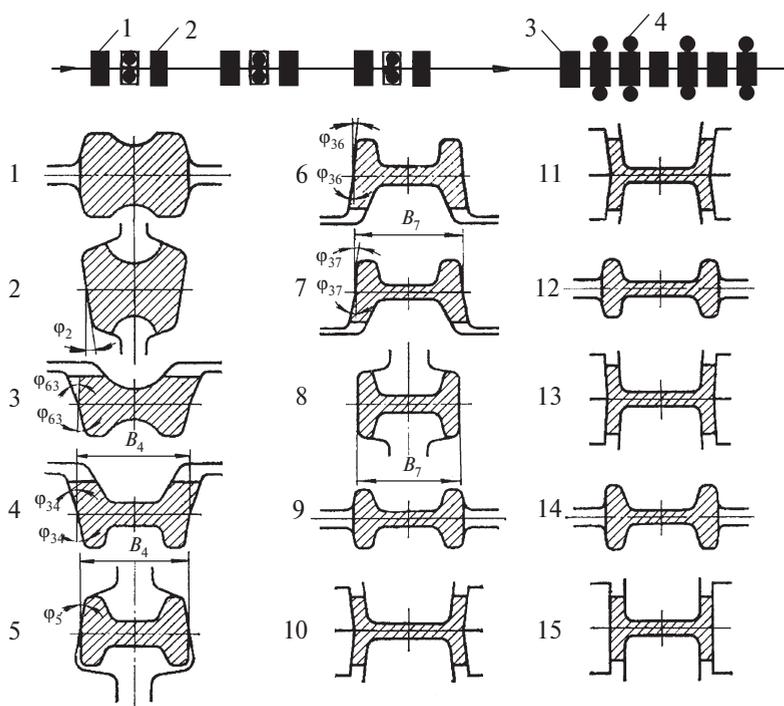


Рис. 14.29. Схема расположения клеток и калибровка валков непрерывного среднесортно-балочного стана 450:

1 — горизонтальные клетки черновой группы; 2 — комбинированные клетки черновой группы; 3 — комбинированные клетки чистовой группы; 4 — универсальные балочные клетки

Идея применения универсальных клеток на рельсобалочных станах оказалась очень продуктивной, и большинство существующих рельсобалочных станов линейного типа (см. рис. 14.20) реконструировано. После реконструкции либо чистовая неререверсивная клетка дуо превращена в универсальную, либо после нее установлена дополнительная универсальная клетка.

После строительства на НТМК уникального универсального балочного стана (УБС) были решены проблемы с производством крупных балок № 70–100 и более. До появления этого стана столь крупные балки в России сваривали из трех листов. В сортамент стана входят балки нормальные, широкополочные и колонные от № 20 до 100.

В состав стана (рис. 14.30, а) входит самый крупный в стране блюминг 1500 (не показан на рисунке), заготовочная реверсивная клетка дуо I, две вспомогательные горизонтальные 2-валковые клетки 2 и 5 и три универсальные 4-валковые клетки, включая чистовую 6.

В заготовочной клетке предусмотрено несколько вариантов калибровки валков (рис. 14.30, б). Для крупных балок используется фасонная заготовка, полученная с блюминга, и прокатка осуществляется по калибровке А. Прокатка ведется в открытых балочных калибрах II и III с большими уклонами. После нескольких таких пропусков могут осуществляться ребровые пропуски в осадочном калибре I для контроля размеров раската (рис. 14.31).

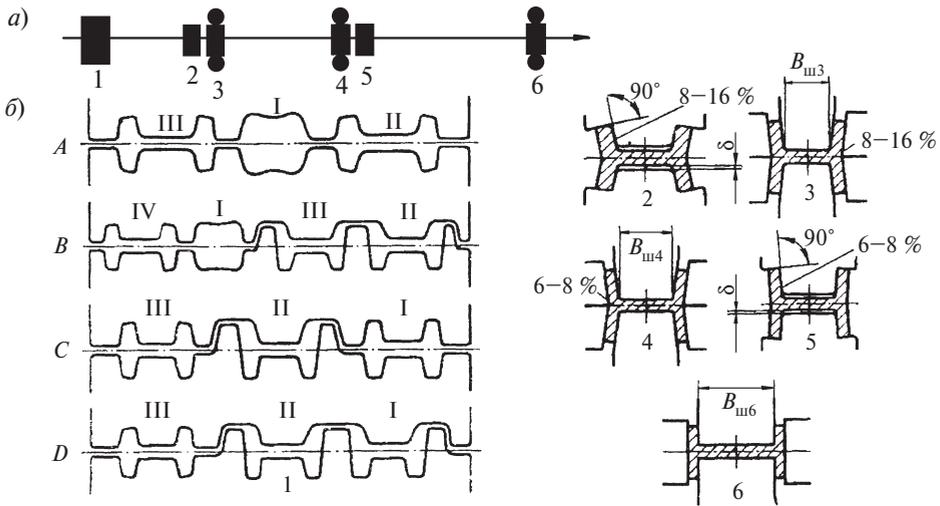


Рис. 14.30. Схема расположения клеток (а) и калибровка валков универсального балочного стана (УБС) (б): I — заготовочная клеть дуо реверсивная (A, B, C, D — варианты калибровки ее валков); 2, 5 — вспомогательные клетки дуо; 3, 4, 6 — универсальные клетки

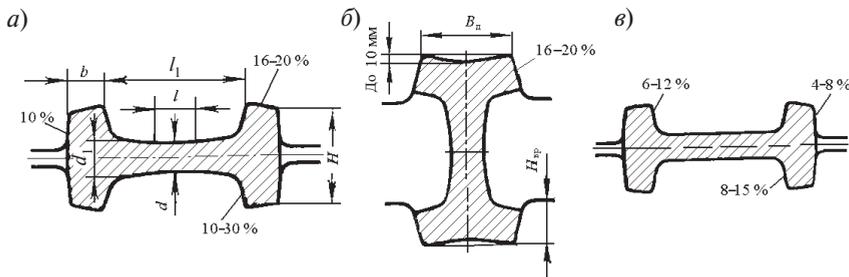


Рис. 14.31. Конструкция калибров заготовочной клетки УБС для прокатки крупных балок:

a — открытый калибр блюминга; б — осадочный (ребровой) калибр заготовочной клетки; в — открытый калибр заготовочной клетки

Самые мелкие балки прокатывают по схеме D (см. рис. 14,30,б) в закрытых балочных калибрах I и II с корректировкой размеров по высоте в открытом калибре III.

В чистой группе УБС основная деформация металла происходит в универсальных клетях, а горизонтальные вспомогательные клетки дуо осуществляют контроль размеров профиля по высоте полок.

14.6. Прокатка и калибровка швеллера

По ГОСТ 8240—89 выпускаются швеллеры высотой $H = 50-600$ мм (№ 5—60), шириной полки B от 32 до 190 мм, толщиной полки t от 7,0 до 17,8 мм и толщиной стенки d от 4,5 до 12 мм. Обыкновенные швеллеры серии У

и специальные серии С (отличающиеся от первых большими толщинами полки и стенки) выпускаются с уклонами по внутренним граням полки (рис. 14.32). Швеллеры серии П (параллельные), Э (экономичные) и Л (легкие) имеют параллельные грани полок. Швеллеры серии Э в отличие от серии П имеют более тонкую стенку S (от 4,4 до 8,0 мм), швеллеры легкой серии Л — более тонкую стенку и полки и укороченные размеры полки. Для товарной продукции обозначают тип и размеры швеллера, например № 20У, 14Л или 14С.

Допуски на размеры элементов швеллера:

по высоте H :

при $H < 80$ мм $\pm 1,5$ мм;

при $81 < H < 200$ мм $\pm 2,0$ мм;

по ширине B :

при $B < 40$ мм $\pm 1,5$ мм;

при $41 < B < 90$ мм $\pm 2,0$ мм;

по толщине полки t :

при $t < 10$ мм $+0...-0,5$ мм;

при $t > 11$ мм $+0...-1,0$ мм;

по толщине стенки S :

при $S < 5,1$ мм $\pm 0,5$ мм;

при $S > 6,0$ мм $\pm 0,7$ мм.

ГОСТом оговариваются перекося полки на длине 1 м, прогиб стенки (до 0,5–1,5 мм), общая кривизна и т. д. Длина выпускаемого проката — в пределах 2–12 м. Швеллеры изготовляют в основном из углеродистой стали обыкновенного качества и низколегированных сталей.

Швеллер производится на тех же станах, что и двутавровая балка, т. е. на последовательных, линейных и универсальных специализированных. Существует несколько способов прокатки швеллера на линейных и последовательных станах (рис. 14.33). В балочном способе (см. рис. 14.33, а) используется общность конфигурации балки и швеллера. Можно построить универсальную калибровку, в которой три-четыре черновые клетки являются общими для прокатки балок и швеллеров (и других профилей), при этом сокращается парк валков, снижается число перевалок и время на настройку стана.

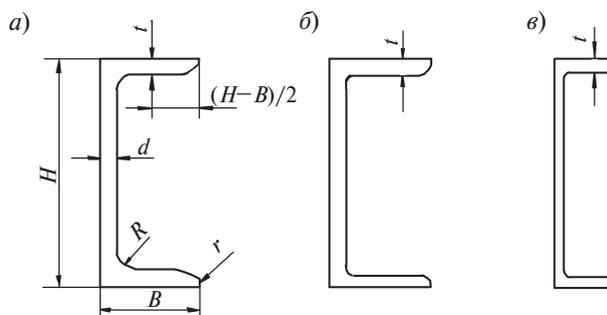


Рис. 14.32. Типы швеллеров по ГОСТ 8240–89:

а — обыкновенные серии У и С;

б — с параллельными гранями полок серии П;

в — экономичные с параллельными гранями полок серии Э и Л

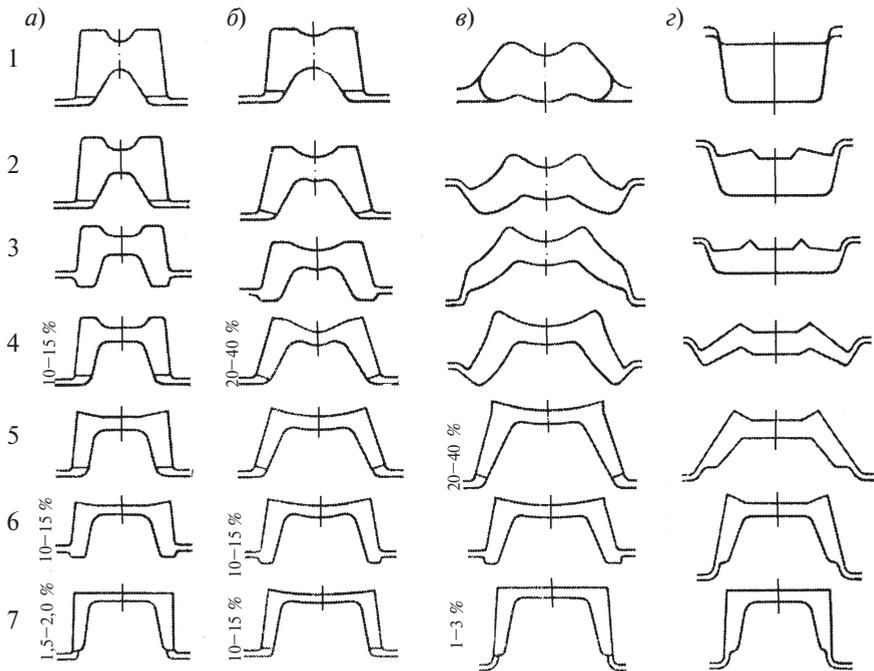


Рис. 14.33. Способы прокатки швеллера на линейных и последовательных станах:

a — балочный; *b* — с увеличенным уклоном полок (корытный метод);
в — с развернутыми полками; *г* — со сгибанием прямых полок

Швеллерные калибры, в отличие от балочных, имеют разъемы только с одной стороны, поэтому закрытый фланец по ходу прокатки должен постепенно сокращаться. Наличие его, с одной стороны, требует дополнительного расхода энергии, связано с большой неравномерностью деформации по сечению и кажется бесполезным. С другой стороны, ложный (закрытый) фланец необходим, чтобы сохранить температуру металла более равномерной по сечению профиля. Особенно это важно для правильного выполнения угла швеллера в месте сочленения полки и стенки.

Для контроля ширины полок применяют контрольные калибры (см., например, рис. 14.33, *a*, калибр *b*). Предпоследний калибр обязательно должен быть контрольным. По конструкции калибра видно, что путем изменения зазора между валками можно регулировать ширину полок. Контрольных калибров по ходу прокатки может быть два.

Балочный метод прокатки — самый старый и даже на старых линейных станах применяется редко. Основной недостаток связан с тем, что деформация полок осуществляется боковым обжатием и протекает неинтенсивно, поэтому требуется большое количество калибров. Чтобы увеличить обжатие полок, применяют прокатку с увеличенным выпуском (корытный метод — см. рис. 14.33, *b*). При этом стенка готового профиля (чистового калибра) может быть как изогнутой, так и прямой. В первом случае стенка и полки стыкуются под прямым

углом, и на правильной машине после прокатки выправляется стенка профиля. На отечественных заводах такая калибровка наиболее распространена. Во втором случае правке подвергаются полки.

Еще интенсивнее деформируются полки по калибровке с развернутыми полками (см. рис. 14.33, в). При такой прокатке также сокращается расход энергии на формообразование, снижается неравномерность деформации и износ валков, обеспечивается более равномерная температура по сечению профиля. Однако, несмотря на очевидные преимущества данной калибровки, она не получила широкого распространения. Полоса в таких калибрах менее устойчива, условия захвата в калибрах затруднены, переход от развернутых к прямополочным калибрам требует сложной арматуры. Развернутые калибры занимают большое место на валках, поэтому не всегда размещаются на валках. При резком переходе от развернутых к прямополочным калибрам могут появиться морщины на полках профиля.

По калибровке профиля, в которой несколько первых закрытых калибров выполнены по полосовому принципу (см. рис. 14.33, з), обеспечивается самая высокая степень обжатия, хорошая равномерность деформации по сечению, невысокий врез ручьев в валки, малый износ калибров. При прокатке мелких швеллеров полосовые калибры применяют практически до предчистового контрольного калибра и разгибание производят только в чистовом калибре. С увеличением размеров профиля требуется несколько калибров с прямыми полками, в которых происходит более плавное разгибание полок. Однако на крупных швеллерах разгибание полок даже в нескольких калибрах протекает трудно. Требуется сложная и точно настраиваемая арматура, не исключены риски на полках от буртов валков, размеры профиля неустойчивы.

Таким образом, любая схема прокатки швеллера имеет свои преимущества и недостатки.

Многие проблемы по производству как обычных профилей, так и швеллеров серии П, Э и Л могут быть решены только с использованием универсальных калибров. Как указывалось, многие существующие станы последовательного и линейного типа оборудованы универсальной клетью. Непрерывный стан 450 Западно-Сибирского металлургического завода, а также УБС Нижнетагильского металлургического комбината имеют специальные универсальные клетки. Прокатка швеллера в универсальной клетке (рис. 14.34) принципиально не отличается от прокатки балки в таких калибрах.

На полунепрерывных среднесортных станах 350 Днепродзержинского металлургического завода и ЧерМК разработана полосовая калибровка валков, которая отличается от рассмотренной ранее (см. рис. 14.33, з) тем, что выполнена в открытых калибрах. На рис. 14.35 приведена принципиальная схема калибровки, реализованная на ЧерМК для прокатки швеллеров № 5 и 10 с прямыми полками по ГОСТ 8240–97 с размерами, мм: № 5 — $h = 50 \pm 1,5$; $b = 32 \pm 1,5$; $t = 4,6$; $S = 4,4$ и № 10 — $h = 100 \pm 2,0$; $b = 46 \pm 2,0$; $t = 7,6$; $S = 4,5$. Конеч-

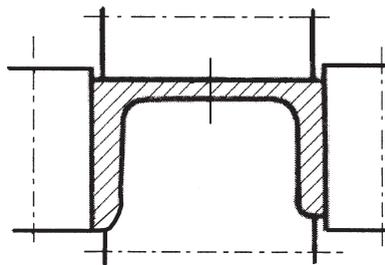


Рис. 14.34. Прокатка швеллера в универсальном калибре

ный профиль имеет изогнутую стенку, которая выправляется на правильной машине.

Для анализа калибровки полезно обратить внимание на то, что конфигурация калибров точно соответствует расположению клетей стана 350 (см. рис. 13.5). Видно также, что эта калибровка имеет тот же принцип построения, что и калибровка уголка на непрерывном стане 250 ЧерМК (см. рис. 14.16 и 14.17).

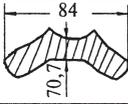
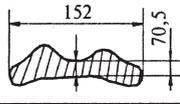
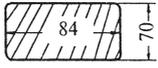
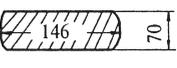
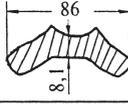
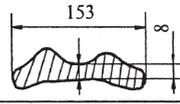
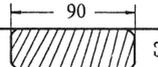
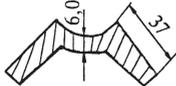
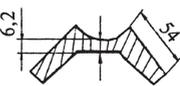
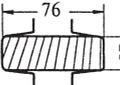
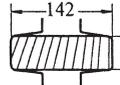
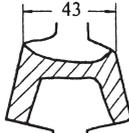
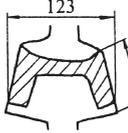
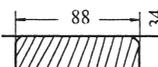
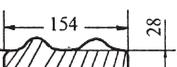
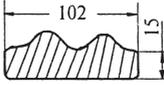
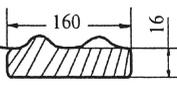
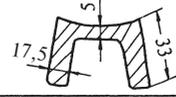
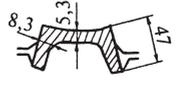
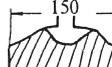
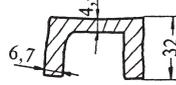
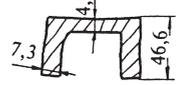
Клеть	Швеллер № 5П. Заготовка \varnothing 80 мм, $l = 6,0$ м	Швеллер № 10П. Заготовка \varnothing 125 мм, $l = 5,5$ м	Клеть	Швеллер № 5П. Заготовка \varnothing 80 мм, $l = 6,0$ м	Швеллер № 10П. Заготовка \varnothing 125 мм, $l = 5,5$ м
1			8		
2			9		
3			10		
4			11		
5					
6			12		
7			14		

Рис. 14.35. Принципиальная схема калибровки швеллера № 5 и 10 на полунепрерывном стане 350 ЧерМК

После пропусков, осуществляемых на гладкой бочке, следуют открытые калибры полосового типа с распластанными полками. Это позволяет вести прокатку в непрерывных группах клетей стана с небольшим натяжением. Для контроля ширины полок используются вертикальные клетки стана. Успех всей схемы прокатки, как и при прокатке уголка, зависит от конструкции вертикальных контрольных калибров. Они должны надежно удерживать профиль и обеспечивать неравномерность обжатия полок для выравнивания их ширины.

14.7. Прокатка и калибровка рельсов

Рельсы различают по назначению:

железнодорожные рельсы, или рельсы широкой колеи марок Р33–Р75; узкоколейные рельсы марок Р8–Р24 (в обоих случаях цифра означает примерно массу в килограммах одного погонного метра профиля);

трамвайные;

крановые;

для метрополитена и др. (рис. 14.36).

Помимо прямого назначения рельсы широко используются в строительстве.

Наиболее ответственным и распространенным является железнодорожный рельс Р50 (масса 1 пог. м равна 51,5 кг), применяемый для прокладки железнодорожных путей. По ГОСТ 7174–75 (который на территории РФ с 01.07 2001 г. временно отменен) он имеет следующие основные размеры и допуски по ним: высота — 152 (+0,8...–0,5) мм; ширина подошвы — 132 (± 1) мм; толщина стенки в среднем сечении — 16 (+0,75...–0,5) мм; средняя толщина подошвы — 10,5 (+1,0...–0,5) мм; ширина головки по основанию — 72 ($\pm 0,5$) мм; уклон внутренней грани подошвы — 1:4.

Значительную часть рельсов производят на станах линейного типа, среди которых отдельно следует выделить рельсобалочные станы, производящие основную массу железнодорожных и других крупных рельсов. Мелкие рельсы производят также на других сортовых станах. Исходным материалом для прокатки железнодорожных рельсов являются слитки массой около 10 т, из которых на блюминге, входящем в состав комплекса рельсобалочного стана, катают блюмы массой 2–4 т, предназначенные непосредственно для рельсов. Для производства рельсов используют спокойную высокоуглеродистую сталь с содержанием углерода 0,5–0,78 %. Большая масса рельсовой стали в России выплавляется в мартеновских печах, идет постоянное сокращение доли мартеновской стали и замена ее на стали конвертерной плавки.

Б.П. Бахтинов выделяет семь типовых схем прокатки рельсов. Если взять старые калибровки, то их будет еще больше. Мы отметим только две схемы,

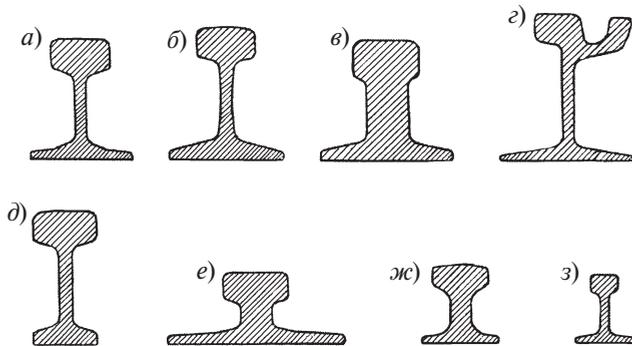


Рис. 14.36. Типы прокатываемых рельсов:

a, б — железнодорожные; *в* — для стрелочных остряков;
г — трамвайные; *д* — контррельсы; *е, ж* — подкрановые;
з — узкоколейные

которые, на наш взгляд, отражают принципиальные моменты при калибровке на существующих станах (рис. 14.37). В обеих схемах вначале следуют три подготовительных (тавровых), а затем рельсовые калибры. Назначение подготовительных калибров — обеспечить требуемое распределение металла по сечению подката. По схеме, представленной на рис. 14.37, а, прокатка ведется в закрытых калибрах, и при небольшой ширине подошвы рельса это обеспечивает требуемую точность профиля. При прокатке рельсов с широкой подошвой — железнодорожных и особенно трамвайных — применяют прокатку по схеме, представленной на рис. 14.37, б. При этом широко используется явление вынужденного уширения при неравномерном обжатии по сечению. В первом калибре гребнем нижнего валка производится разрезание бляма примерно до его середины. Это важно потому, что средняя часть мартеновского слитка и бляма, как правило, рыхла, и этот дефект не полностью устраняется при прокатке на блюминге, также имеются различные включения и загрязнения. После разрезки бляма при дальнейшей прокатке этот объем металла пойдет на формирование наименее ответственного участка рельса — средней части основания его подошвы.

Следующие два подготовительных калибра необходимы для быстрого наращивания ширины подошвы. Здесь участки будущей подошвы рельса подвергаются значительно большей деформации, чем участки головки и стенки. За счет их взаимодействия возникает значительное вынужденное уширение (см. также рис. 6.11).

Первый из рельсовых калибров — разрезной, и с него начинается формирование элементов профиля. В обеих схемах калибровки применяются закрытые рельсовые калибры с чередованием разъемов, как в балочных калибрах. Только чистовой калибр по головке рельса должен быть открытым, чтобы обеспечить требуемые по ГОСТу форму головки и радиусы закруглений. По схеме, представленной на рис. 14.37, а, разъемы калибров следуют с одной стороны и калибры располагаются в валках по горизонтальной оси. Это обеспечивает небольшой врез ручьев в валки и отсутствие осевых усилий на валках при прокатке. Зато схема с наклонными калибрами (см. рис. 14.37, б) дает возможность выдерживать параллельными плоскости подошвы и головки, что особенно важно при прокатке железнодорожных рельсов. Чтобы предотвратить осевое смещение валков при прокатке по этой схеме, часть бочки валков приходится расходовать на замки (рис. 14.38).

Необходимо отметить, что все приведенные схемы прокатки рельса уже значительно устарели и сохраняются

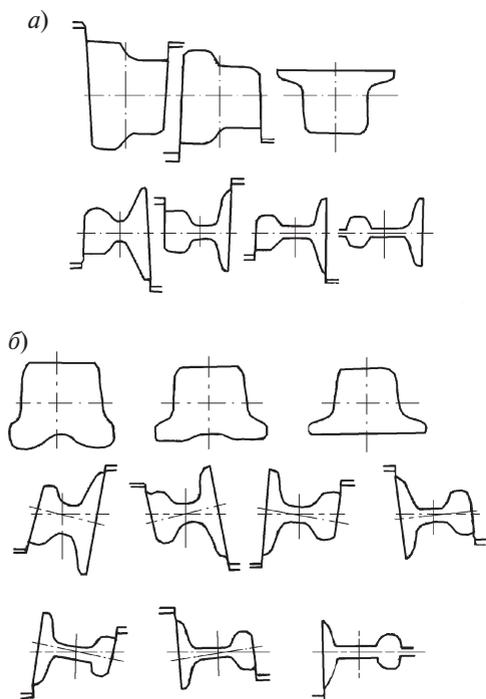


Рис. 14.37. Схемы прокатки рельсов

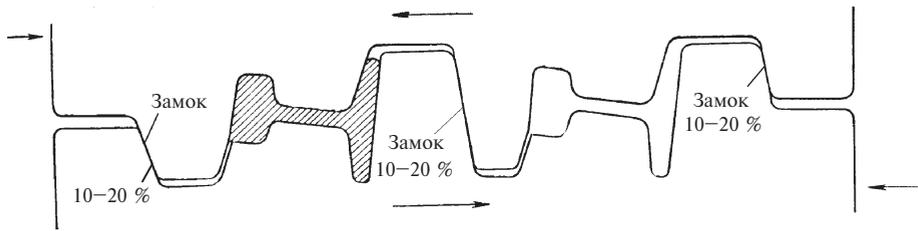


Рис. 14.38. Расположение наклонных рельсовых калибров на валках

только потому, что существуют рельсобалочные станы, удовлетворяющие потребности страны в рельсах. В мировой практике ведутся интенсивные работы по совершенствованию технологии производства рельсов. Например, компания SMS Meer GmbH (г. Менхенгладбах, Германия) поставила в Корею и Китай и имеет еще несколько заказов на новый непрерывный универсальный стан для прокатки рельсов (рис. 14.39). Стан имеет реверсивную клетку (малый блюминг), реверсивную клетку 1 с рельсовыми калибрами и непрерывную группу из трех клеток 2–4, из которых первая реверсивная и третья нереверсивная — универсальные, а средняя — клетка дуо нереверсивная. По расположению оборудования стан очень напоминает нижнетагильский УБС.

Калибры на валках расположены таким образом, чтобы реализовать схему прокатки, представленную на рис. 14.40. Видно, что после семи реверсивных пропусков в клетке 1 прокат проходит в одном направлении клеток 2 и 3, затем в обратном — только клетка 2 (в клетке 3 калибр отсутствует) и после реверса — клетки 2–4 в режиме непрерывной прокатки. Универсальные клетки 2 и 4 позволяют осуществлять обжатия с четырех сторон, что обеспечивает высокую точность готового проката.

При производстве рельсов высокие требования предъявляются к качеству готовой продукции. Показатели качества условно можно сгруппировать в две категории. В первую категорию входят требования по геометрии проката и состоянию его поверхности, а во вторую — механические характеристики металла профиля.

На поверхности боковых граней головки и на кромках подошвы рельса не допускаются никакие забоины, риски и прочие дефекты. По всей поверхности должны отсутствовать плены, рванины, трещины и закаты. Допускаются отдельные волосовины и морщины глубиной не более 1,0 мм на длине не более 1 м. Дефекты должны быть удалены полой зачисткой на глубину до 1 мм.

Железнодорожные рельсы после прокатки разрезаются пилами на длину 12,5 м или чаще — 25 м. На этой длине не допускаются волнистость и кривизна, превышающая $1/2200$ длины рельса, практически полностью исключаются концевые искривления. Большое внимание уделяется качеству торца рельса: поверхность его должна быть отфрезерована строго под прямым

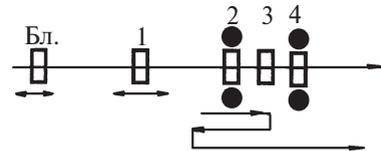


Рис. 14.39. Схема непрерывного универсального рельсового стана:

1 — клетка реверсивная дуо; 2 — клетка реверсивная универсальная; 3 — вспомогательная нереверсивная клетка дуо; 4 — чистовая клетка нереверсивная универсальная

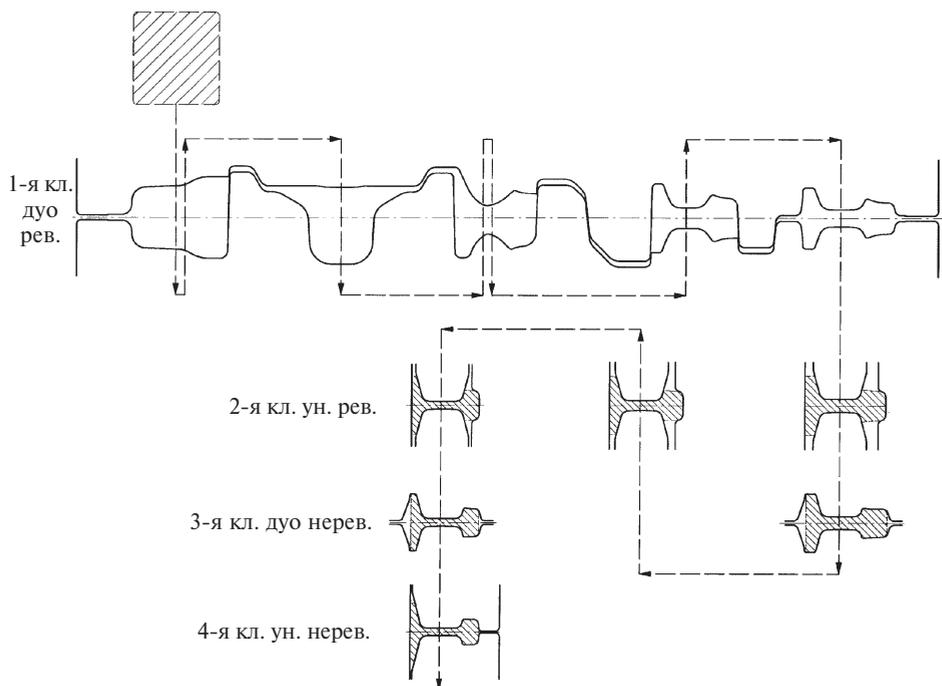


Рис. 14.40. Схема прокатки рельсов на непрерывном универсальном рельсовом стане

углом к оси. Конечно, важнейшими в формировании свойств являются операции термообработки проката.

Кратко рассмотрим основные технологические операции, которым подвергаются железнодорожные рельсы после прокатки и резки на мерные длины. На холодильнике они охлаждаются до температуры не ниже $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем загружаются рядами подошвой вниз в ямы замедленного охлаждения, где в штабелях медленно остывают до $100\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом выправляется кривизна рельсов и удаляются флокены из металла (напомним, что флокены представляют собой внутренние микропоры).

На некоторых заводах антифлокенная обработка осуществляется в печах изотермической обработки. По этой технологии на холодильнике прокат охлаждается до $350\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем при той же скорости движения шлеппера ($0,15\text{ м/с}$) поступает в проходную печь, где в течение 2 ч выдерживается при температуре $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. После печи рельсы вновь оказываются на холодильнике и остывают на нем до $100\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже.

После антифлокеной обработки рельсы поступают на отделку. Первая отделочная операция — правка — осуществляется в холодном состоянии на роликоправильных машинах, способных подвергать рельс знакопеременному изгибу в двух плоскостях. Окончательную правку при необходимости выполняют на штемпельных или специальных правильных прессах. Далее рельс поступает на отделочный стеллаж, по которому он перемещается в направлении, перпендикулярном своей длине. Стеллаж оборудован с двух сторон фрезерны-

ми станками для фрезерования концов рельсов, специализированными станками для сверления на каждом конце трех овальных крепежных отверстий, проходными установками для нагрева ТВЧ и струевыми аппаратами для поверхностной закалки концов рельсов (на длине примерно 0,5 м от торца). Износостойкость закаленных по концам рельсов в 2,5–3,0 раза выше, чем незакаленных. В продолжении отделочного стеллажа установлены инспекционные стеллажи для осмотра и приемки рельсов.

Как разновидность этой технологии можно отметить закалку концов рельса с прокатного нагрева. В этом случае после раскроя на пилах горячей резки рельсы подают на горячие стеллажи по 2–3 шт. и накладывают на их концы струевые устройства с регулируемым потоком воды.

Железнодорожные рельсы требуют повышенной твердости не только по концам, но и по периметру головки на глубину не менее 12 мм (по поверхности катания). Твердость рельса на концах обычно достигает НВ 380–400 и по поверхности головки — НВ 350–390. Стенка и подошва рельса, наоборот, должны оставаться мягкими, чтобы противостоять знакопеременным нагрузкам при движении поезда.

Для поверхностной закалки головки рельса используют закалочный агрегат, включающий установку нагрева головки рельса токами высокой частоты, в которой поверхностный слой головки примерно за 10 с разогревается до температур выше $A_{сз}$. Далее следует спрейная установка для быстрого охлаждения и закалки головки рельса. После такой термообработки рельс вновь подвергается правке, осмотру, а также испытаниям. Готовые рельсы выборочно подвергаются копровым испытаниям при температурах до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Испытываемые рельсы должны выдерживать ударную нагрузку на копре грузом массой 1 т с высоты не менее 3 м.

Для рельсов ответственного назначения применяют также объемную закалку с отпуском. После фрезерования и сверления отверстий рельсы подаются на специальную линию, имеющую:

нагревательную печь роликового типа для нагрева до температуры $840\text{ }^{\circ}\text{C}$; емкость с минеральным маслом для закалки рельса.

Не позже чем через 8 ч после закалки осуществляется отпуск рельсов в печах при температуре $450\text{--}480\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч. После отпуска и охлаждения до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ рельсы подаются на роликотправильную машину, после этого на правильные прессы и далее на инспекционные стеллажи. Здесь производится осмотр качества поверхности и измерение твердости головки рельса. Твердость сталей, содержащих 0,65–0,75 % С, после такой обработки равна НВ 320–380, по всему сечению достигается структура сорбита, обеспечивающая высокие прочностные и пластические свойства металла.

Для контроля флокенов в готовых рельсах используется ультразвуковой дефектоскоп УДМ-1М, который может работать как по зашлифованной, так и по черновой поверхностям металла. В последнее время участки отделки рельсов оснащаются также оборудованием для контроля макроструктуры стали непосредственно в ходе технологического процесса.

Одна из существенных тенденций в производстве рельсов — улучшение качества исходного металла, поступающего в прокатку, путем его рафинирования (очистки). Применяются внепечное вакуумирование и обработка син-

тетическими шлаками жидкого металла, в результате чего в металле уменьшается количество оксидных включений примерно на 30 %, а количество сульфидных включений — в 1,5–2,0 раза. Рельсы, полученные из рафинированной стали, имеют более высокие механические свойства.

Одним из резервов повышения механических свойств рельсов считается использование легированных марок стали, хотя стоимость таких рельсов существенно возрастает, и опыт их производства и использования пока незначителен.

14.8. Калибровка фасонных профилей проката

Применение фасонных профилей проката вместо традиционных профилей общего назначения (круглых и пр.) позволяет сэкономить большое количество металла у потребителя. Коэффициент использования металла увеличивается до 0,8–0,9, сокращается трудоемкость производства машин, значительно снижается энергопотребление при производстве конечных деталей. В России существует много цехов, расположенных непосредственно на машиностроительных заводах, которые производят для данного предприятия или группы подобных предприятий фасонный подкат для последующей штамповки. Большое количество профилей отраслевого назначения прокатывают на Кузнецком, Чусовском и других российских заводах. Значительная доля заводов, специализирующихся на производстве фасонных профилей, осталась на Украине: завод им. Петровского в Днепрпетровске, Енакиевский, Донецкий, им. Дзержинского в Днепродзержинске и др. В 60-х гг. были пущены в эксплуатацию сразу три специализированных производства фасонных профилей межотраслевого назначения (участки цехов на Ижевском и Омутнинском металлургических заводах и цех фасонных профилей на Череповецком сталепрокатном заводе) общей производительностью 40 тыс. т в год. Среди предприятий, специализирующихся на производстве фасонных профилей, необходимо отметить также завод турбинных лопаток и цех турбинных лопаток на ОАО “Кировский завод” в Санкт-Петербурге.

Сортамент фасонных профилей, применяемых в различных отраслях промышленности, весьма разнообразен. В бывшем СССР насчитывалось более 3 тыс. профилей самой разнообразной формы и размеров. Средняя продолжительность применения каждого профиля обычно не превышает 5–10 лет, поэтому происходит постепенное изъятие из сортамента устаревших профилей и пополнение его новыми. В сортаменте США насчитывается около 14 тыс. фасонных профилей с учетом того, что старые профили из сортамента не изымаются, хотя производство их прекращено. Примерно такое же количество профилей насчитывает сортамент Германии.

Различают две категории фасонных профилей. К первой категории относятся профили, получаемые горячей прокаткой или прессованием. Такие профили содержат окалину на поверхности, точность по размерам невысока. Они предназначены для последующей штамповки или обработки резанием и обеспечивают значительную экономию металла на этих операциях. Целесообразность применения фасонных профилей вместо круглых или квадратных обеспечивается за счет значительного повышения коэффициента использования металла (КИМ). Например, при производстве турбинных лопаток из круглого проката КИМ равен 0,4–0,5, а при применении фасонного подката КИМ повышается до 0,8–0,85.

Ко второй категории относят фасонные профили повышенной точности по геометрическим размерам, не имеющие на поверхности окалины. Такие профили максимально приближены к форме готового изделия, в ряде случаев требуют только финишных операций обработки (шлифование, сверление отверстий, резка на мерные длины и пр.). Точные фасонные профили получают по двухступенчатой технологии. Сначала горячей прокаткой или прессованием получают фасонную заготовку, которая затем после снятия окалины подвергается одной из чистовых операций:

волочению в сплошной или разъемной волоке;

холодной прокатке в 2- или многовалковом калибре;

холодной прокатке-волочению в роликовой волоке, которая представляет собой прокатную клеть с неприводными валками.

Таким образом, производство фасонных профилей — это обширный набор специализированного оборудования и технологических операций, оно требует специального рассмотрения. Здесь мы рассмотрим только производство горячекатаных фасонных профилей и особенности их калибровки.

Все фасонные профили, производимые на станах горячей прокаткой, принято делить на группы по степени их сложности, общности технологии их прокатки и калибровки валков. Одна из классификаций, включающая 14 групп, предложена Б.М. Илюковичем [8] (рис. 14.41). Обычно для каждой из групп разрабатываются свои приемы калибровки. При разработке схемы переходов нового осваиваемого профиля большое значение имеет накопленный заводами опыт прокатки и калибровки освоенных профилей той же группы.

Можно утверждать, что не существует общей методики калибровки и расчета формоизменения металла в фасонных калибрах. Калибровку фасонных профилей не рассчитывают, а скорее проектируют, и этот процесс остается искусством калибровщика, от опыта и эрудиции которого во многом зависит успех той или иной калибровки. Есть примеры, когда один и тот же профиль разными калибровщиками получается по разным схемам, разные идеи используются для решения одних и тех же задач.

Большое значение при этом имеют “мелочи”, т. е. особенности профиля, требования к его точности, особенности конструкции стана и оснастки и многое другое. Прежде чем научиться проектировать калибровки фасонных профилей, студент должен понимать те идеи, те средства решения, которые имеет в своем арсенале калибровщик. Можно выделить некоторые принципы, которыми необходимо руководствоваться.

1. При освоении нового профиля следует отнести его к той или иной классификационной группе и на основании анализа известных калибровок подобных профилей выбрать принципиальную схему его прокатки. Конечно, учитывают особенности стана, требования к профилю, его сложность, марку стали и т. д. Выбирают число пропусков и средства, обеспечивающие получение требуемой точности и качества готового профиля.

2. Исходя из конфигурации сечения и требований по точности отдельных элементов, намечают места разъемов и тип чистового калибра. Как правило, чистовой калибр выполняют закрытым, чтобы контролировать чистовые размеры по боковым граням профиля. Если по боковым граням жесткие требования отсутствуют, то калибр делают открытым.

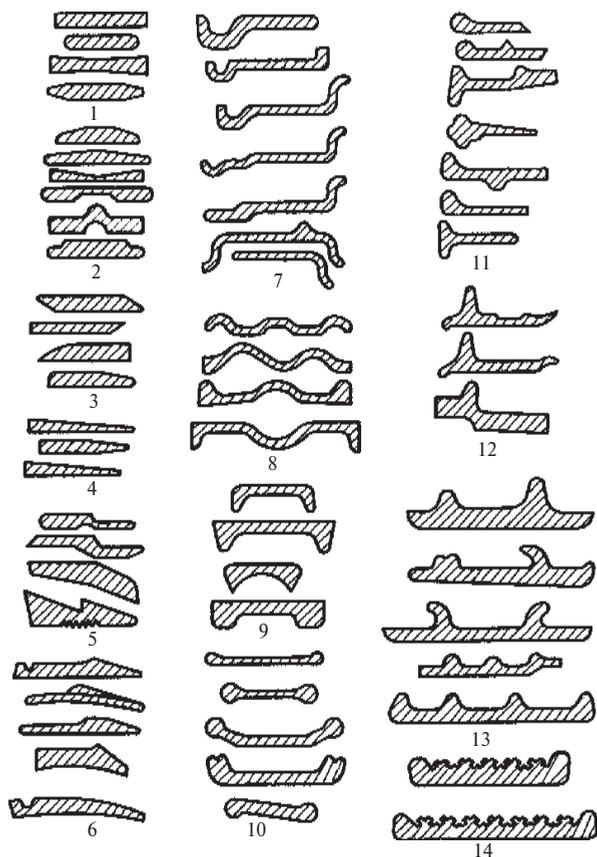


Рис. 14.41. Классификация фасонных профилей проката, получаемых прокаткой:

1 — полосовые с двумя осями симметрии; 2 — полосовые с одной (вертикальной) осью симметрии; 3 — полосовые асимметричные; 4 — полосовые клиновидные с горизонтальной осью симметрии; 5 — клиновидные асимметричные; 6 — полосовые асимметричные с клиновидными утолщениями; 7 — полосовые асимметричные с отогнутыми краями; 8 — полосовые желобчатые; 9 — полосовые с острыми элементами по краям; 10 — полосовые с круглыми утолщениями по краям; 11 — полособульбовые; 12 — полособы одногребневые; 13 — полособы двух- и многогребневые; 14 — полособы с выступами в виде ласточкина хвоста

3. Рассчитывают размеры чистового калибра с учетом температурного расширения и минусовых допусков. Для фасонного профиля допуски на размеры по элементам могут быть разными.

4. Форму и размеры предчистового калибра проектируют, исходя из принципа равномерности деформации по ширине полосы в чистовом калибре. Графическим методом конструируют контур предчистового калибра, для чего:

чистой профиль разбивают по ширине вертикальными сечениями на n характерных элементов, каждый из которых близок к известным в теории простым профилям: прямоугольник, овал, ромб и т. п.;

для каждого i -го элемента ($i = 1, 2, \dots, n$) назначают среднюю высоту элемента h_i и коэффициент высотного обжатия $1/\eta_i$ (обычно 1,05–1,25), затем определяют среднюю высоту i -го элемента на предчистой полосе: $h_{0i} = h_i(1/\eta_i)$; определяют обжатие по каждому элементу ($\Delta h_i = h_{0i} - h_i$) и распределяют его между верхним и нижним валками.

5. Контур предчистового калибра необходимо строить с учетом уширения металла в чистовом калибре; рассчитать достоверно уширение профиля в фасонных калибрах не удастся, поэтому калибры конструируют таким образом, чтобы ошибки в расчетах или прикидочных оценках уширения существенно не сказывались на точности чистового профиля.

6. Намечают места разъемов и типы калибров. Обычно предчистой калибр также делают закрытым, далее решают, можно ли обеспечить требуемую точность профиля, используя только закрытые калибры; для надежности часто используют ребровой калибр, устанавливаемый, как правило, непосредственно перед предчистовым. Если есть ребровой калибр, то предшествующие ему черновые калибры могут быть открытыми.

7. От первого до предчистового калибра коэффициент высотного обжатия $1/\eta$ распределяют между пропусками по убывающему графику от значений 1,6–1,8 до 1,1–1,3 (в предчистовом калибре). Неравномерность обжатия по элементам допустима только в первых калибрах, в чистовом и предчистовом калибрах деформация должна быть близка к равномерной.

8. Проводят графический анализ деформации металла во всех калибрах. Как указывалось ранее, при этом:

строят график распределения обжатий по ширине и по нему делают выводы об изгибе полосы, о вынужденном уширении и об утяжке элементов профиля;

анализируют условия захвата, из анализа получают сведения о скручивании и смещении полосы в калибре, об устойчивости процесса прокатки;

графический анализ калибровки проводят с учетом уширения в калибре.

9. Окончательный анализ калибровки производят на основании подобных калибровок или опытной прокатки; роль опытной прокатки при освоении каждого нового профиля очень велика.

Рассмотрим одну из действующих калибровок (рис. 14.42). Размеры чистового калибра (предпоследний на рис. 14.42) строятся по горячим размерам чистового профиля (последний на рис. 14.42) с учетом минусовых допусков. Внешний осмотр конфигурации готового профиля и анализ допусков на размеры показывают, что проработка его элементов по ширине возможна в закрытом чистовом калибре с разъемами вверху. Так формируется чистовой калибр 5.

Чистой профиль разбивается на шесть элементов простой формы, и, используя приемы графического анализа и добиваясь равномерной деформации по элементам, строят предчистовой калибр № 4 (рис. 14.43, а). При прокатке в чистовом калибре был выбран средний коэффициент высотной деформации 1,15. Желательно в чистовом калибре обеспечить такую же степень деформации

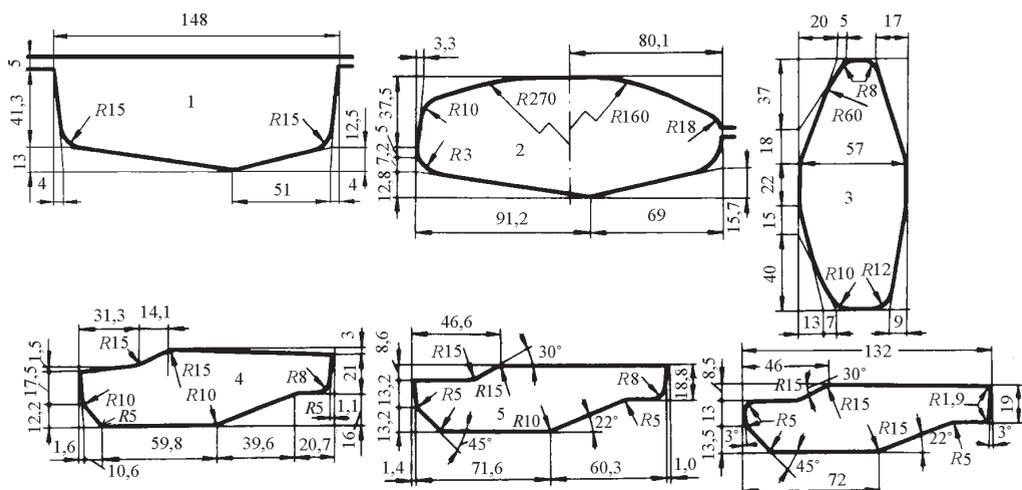


Рис. 14.42. Конструирование калибровки фасонного профиля

по всем элементам, однако решено было по элементам *II* и *III* коэффициент высотной деформации немного увеличить, чтобы за счет вынужденного уширения в этих элементах лучше заполнялись углы соседних элементов *I* и *IV*. Таким образом, график обжатий по элементам (см. рис. 14.43, *a*) сознательно сделали неравномерным (но почти равномерным). Из-за этого появится небольшое искривление чистовой полосы, которую можно устранить в тесных выводных проводках.

Полученные обжатия в общем случае необходимо распределить по элементам между верхним и нижним валками таким образом, чтобы не было скручивания и смещения полосы при захвате. В нашем случае обжатие полностью отнесли к верхнему валку, и контур верхнего валка предчистового калибра определен контуром чистового калибра путем прибавления обжатия. В таком

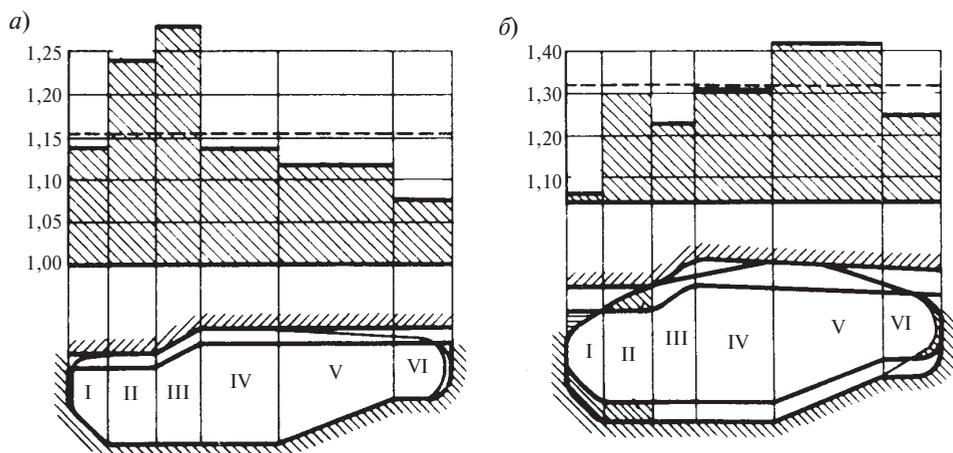


Рис. 14.43. Графический анализ деформации металла в калибрах 5 (*a*) и 4 (*b*)

случае контуры нижнего валка предчистового и чистового калибров будут полностью совпадать. Наилучшие условия по устойчивости прокатки в калибре достигаются именно в том случае, когда по одному валку (в данном случае — нижнему) очертания входящей в калибр полосы и калибра совпадают.

При конструировании каждого калибра необходимо учитывать уширение. При прокатке предчистовой полосы в чистовом калибре основное уширение происходит в элементах *I* и *VI*. Посчитаем его, например, по формуле Губкина как для прямоугольной полосы на гладкой бочке. Но поскольку указанные элементы находятся в закрытых частях калибра, то можно задать коэффициенты стеснения в пределах 0,6–0,8. В нашем случае получили уширение (с учетом стеснения) элемента *VI* 1,2 мм и элемента *I* 0,8 мм, общее уширение 2,0 мм.

Следующий от конца прокатки калибр выбран ребровым. Поскольку предшествующие ему калибры *1* и *2* (см. рис. 4.42) решено сделать открытыми, наличие ребрового калибра становится обязательным, чтобы проконтролировать ширину полосы, полученную из калибра *2*. Это позволяет также скорректировать ошибки в расчете уширения для чистового и предчистового калибров.

Поступающая в предчистовой калибр полоса конструируется по тем же принципам. Но требования по равномерности деформации по ширине ослабевают по мере удаления от чистового пропуска. График высотной деформации в предчистовом калибре (рис. 14.43, б) определил очертания левой части ребровой полосы из условия наилучшего размещения этой части полосы в нижнем ручье предчистового калибра. Контурсы левой части ребровой полосы и нижней части предчистового калибра почти совпадают. В этом случае характер распределения металла по правой кромке ребровой полосы может быть произвольным, и эту кромку можно сконструировать, исходя из удобств прокатки в ребровом калибре. При прокатке в ребровом калибре уширением можно пренебречь, поэтому по ребровой полосе легко строится предшествующая ей полоса и калибр *2* (см. рис. 14.42).

Далее назначают вытяжки в калибрах *1* и *2* (по убывающему графику) и тем самым определяют размеры исходной заготовки. Если провести графический анализ также в калибрах *2* и *1*, то мы увидим, что в калибре *2* входящая в него полоса *1* при захвате надежно фиксируется нижним валком, а в калибре *1* исходная прямоугольная заготовка фиксируется по всей ширине верхним валком. Это обеспечивает устойчивую прокатку в этих калибрах. Равномерности деформации в этих калибрах не требуется.

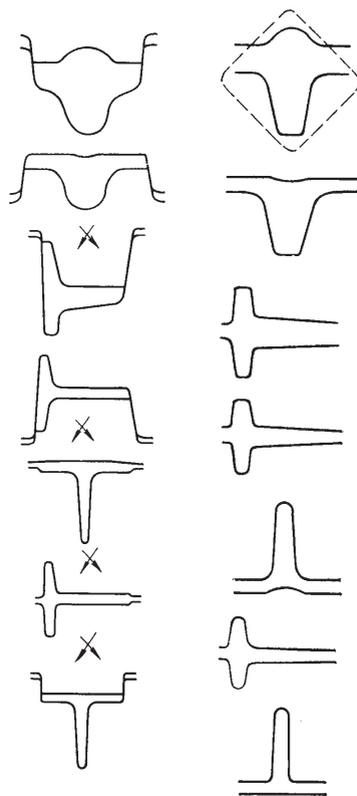


Рис. 14.44. Закрытая и открытая калибровки валков для прокатки таврового профиля

При рассмотрении приведенной калибровки видно, что выбор метода контроля уширения четко не определен. Можно использовать закрытые калибры, тогда ребровые калибры не потребуются. Можно, наоборот, использовать только открытые калибры с широким применением ребровых калибров. В первом варианте точность профиля будет объективно выше, чем во втором. Но в открытых калибрах врез ручьев калибров в валки меньше, упрощается их нарезка. В нашей калибровке последние два калибра оказались закрытыми, а все предыдущие — открытыми, что допустимо при наличии ребрового калибра.

Рассмотрим достоинства обоих способов контроля уширения на следующем примере. На разных станах применяют два способа калибровки таврового профиля (рис. 14.44). Закрытая калибровка обеспечивает точность проката за счет стесняющего действия стенок калибра, но при этом в некоторых калибрах отдельные элементы профиля деформируются только за счет бокового обжатия, т. е. неинтенсивно. Необходимо кантовать полосу или вводить ребровые пропуски, чтобы ослабить этот недостаток. При прокатке по открытой калибровке полоса часто кантуется, и уширение контролируется и корректируется

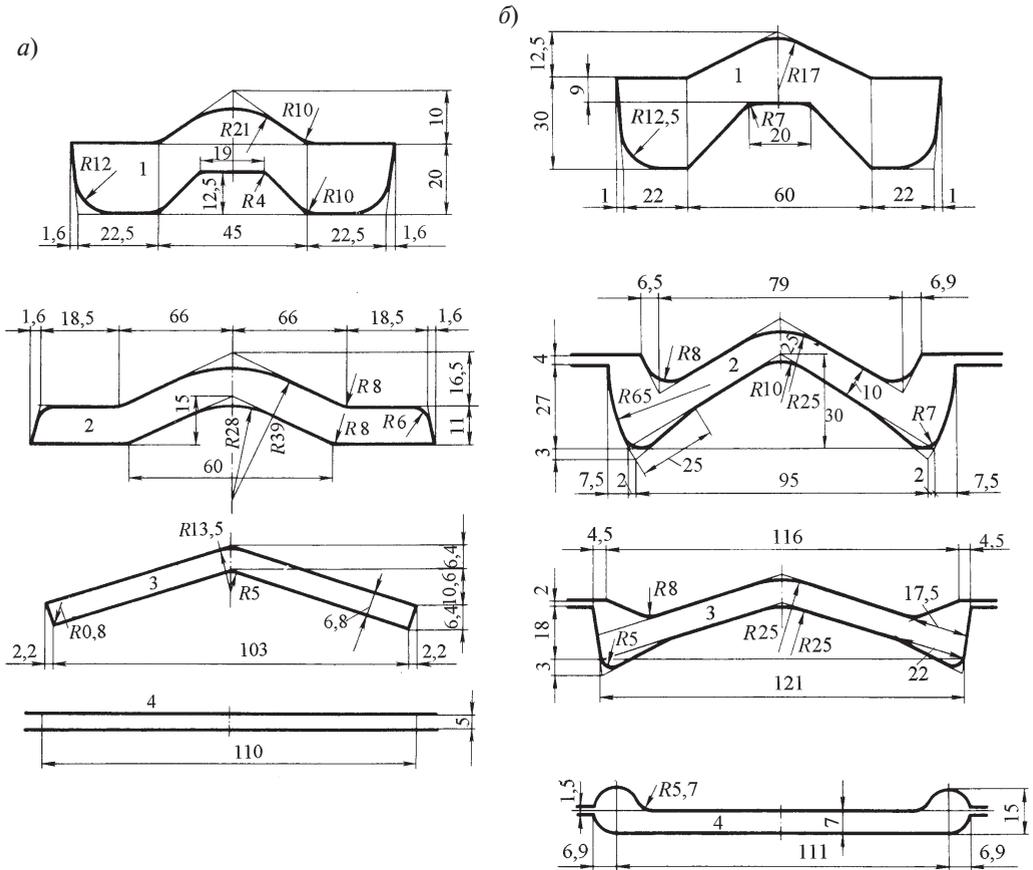


Рис. 14.45. Калибровка валков для прокатки полосы (а) и петли дверцы автомобиля (б) на 4-клетевом стане

только за счет изменения зазора между валками. Все ошибки в расчетах уширения компенсируются настройкой стана. Однако точность проката может быть ниже, чем по закрытой калибровке.

Кстати, следует обратить внимание на конструкцию первых двух калибров открытой калибровки. Они очень напоминают первые калибры при прокатке рельсов. Здесь также решается задача быстрого наращивания длины элементов таврового профиля за счет вынужденного уширения.

При калибровке фасонных профилей широко используют вынужденное уширение. В качестве примера рассмотрим две калибровки. Первая калибровка (рис. 14.45, а) предназначена для прокатки обычной полосы из прямоугольной заготовки. По традиционной технологии, рассмотренной ранее (см. разд. 14.3), полосу прокатывают из некоторого квадрата со стороны *a* на гладких валках с ребровым предчистовым калибром. Но на Череповецком

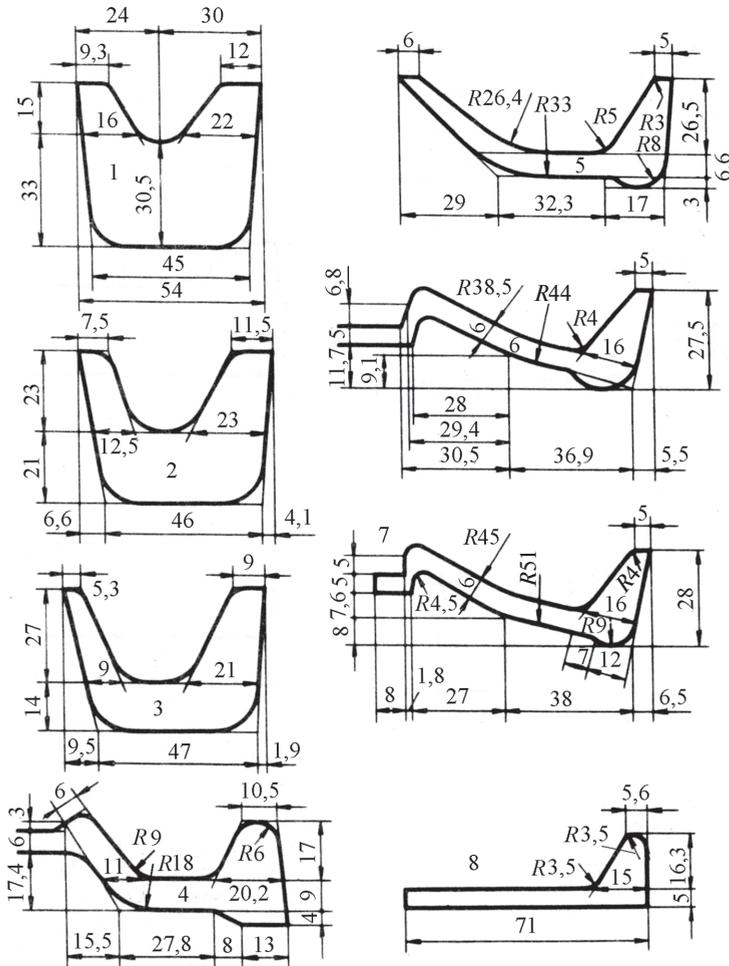


Рис. 14.46. Калибровка валков для прокатки полособульбового профиля

сталепрокатном заводе прокатный стан имеет всего четыре клетки, поэтому для традиционной технологии клетей не хватает. Опытный калибровщик нашел иное решение. Быстрое наращивание требуемой ширины достигнуто, во-первых, за счет разрезки исходной полосы в первом калибре с последующим его выпрямлением и, во-вторых, за счет увеличенного обжатия и вынужденного уширения по кромкам профиля. Кстати, первый калибр этой калибровки используется также для прокатки профиля петли дверцы автомобиля ВАЗ (рис. 14.45, б).

Заслуживает внимания конструкция первого калибра в обеих калибровках. В него задается круглая заготовка, которая в момент захвата в трех точках плотно удерживается в калибре, обеспечивая устойчивую прокатку.

Тот же прием разрезки профиля, его выпрямления и использования вынужденного уширения применили при проектировании калибровки полосо-бульбового профиля (рис. 14.46). Первый разрезной калибр также применяется для прокатки двутавровой балки и швеллера, обеспечивая универсальность калибровки. Левая полка профиля после отгибки обжимается прямым обжатием, что позволяет получить полосо-бульбовый профиль с тонкой и широкой полосовой частью в небольшом числе калибров. На правой полке сформирован “ложный” фланец, как при прокатке швеллера, что способствует равномерности температуры и выполнению точного угла в чистовом калибре.

Следует обратить внимание на то, как контролируются размеры левой полки.

Глава 15

ПРОИЗВОДСТВО ТОЛСТОГО ЛИСТА

15.1. Общие вопросы

В гл. 8 (см. рис. 8.4) рассматривалась общая схема производства сорта и листа и обсуждались общие проблемы производства основных видов продукции, получаемых прокаткой. Выделим листовую часть этой схемы (рис. 15.1). Как указывалось, для основной доли производимого листа исходной заготовкой служит литой сляб, так как он дешевле, чем катанный на слябинге, и при современных средствах очистки жидкого металла обеспечивает высокое качество готового листа, особенно тонкого. Но с увеличением толщины листа обрабатываемость центральных слоев сечения уменьшается и слабо продеформи-

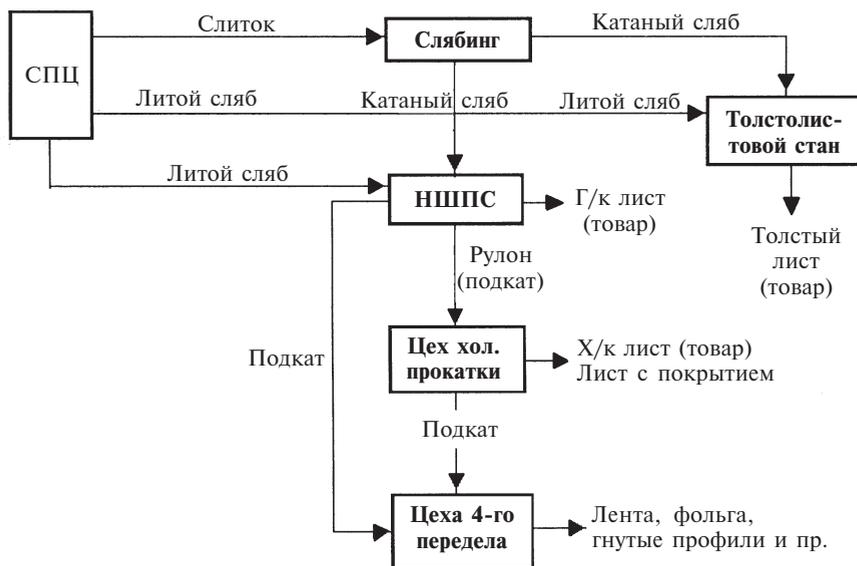


Рис. 15.1. Схема производства листовой продукции

рованные ликвационная дорожка и пористость, располагающиеся по центру литого сляба, снижают качество металла. Свойства листа из катаного сляба могут быть выше, чем из литого. При производстве основного сортамента листовой продукции качество листа из обоих видов сляба одинаковое.

Масса самых крупных листовых слитков не превышает 23–27 т, и при отделении головной и донной частей на слябинге остается 15–22 т здорового металла. Масса литых слябов достигает 40 т и выше, поэтому при их использовании производительность листовых станов возрастает, а затраты на 1 т продукции сокращаются.

подавляющее большинство современных металлургических предприятий, выпускающих высококачественный лист, не имеют слябингов и полностью обеспечиваются литыми слябами.

15.2. Сортамент толстолистовой продукции и развитие толстолистового производства в России

По ГОСТ 5687 толстым называется лист толщиной от 4 до 160 мм, шириной от 600 до 4900 мм и длиной от 2 до 12 м (иногда — до 18–20 м). Лист толщиной выше 60 мм носит отдельное название — плита. Толстый лист поставляется в виде карточек, которые вырезаются по требованию заказчика. Лист обрезается по кромкам гильотинными ножницами или газовым резаком, и способ обрезки листа также оговаривается заказчиком. В последнее время используют также плазменную и лазерную резку. Толстый лист с катаными кромками называется универсальным, так как он производится на специализированных универсальных станах, имеющих вертикальные валки для формирования кромок. Универсальный лист имеет толщину 4–50 мм, ширину 200–1050 мм и длину до 18 м.

Приведенные выше границы сортамента толстого листа условны и в значительной мере устарели. Большинство современных толстолистовых станов производят листы толщиной от 8 мм и выше. На широкополосном стане выгоднее, чем на толстолистовом, производить толстые листы толщиной от 4 до 8 мм (и даже до 16–20 мм), поэтому эта часть толстолистового сортамента постепенно перешла на станы, предназначенные для производства более тонкого горячекатаного листа. Точно так же верхний предел плит толщиной 160 мм вовсе не является предельным, современные толстолистовые станы типа стана 5000 ОАО “Северсталь” могут прокатывать плиты толщиной свыше 300 мм.

Требования по толщине листа и маркам стали, а также по качеству толстого листа закрепляются в соответствующих ГОСТах и ТУ и сильно зависят от потребителя этого листа. Основными потребителями являются судостроение, трубная промышленность, котло-, мосто- и автостроение. Особые свойства и повышенное качество листов требуют химическая промышленность и атомное энергомашиностроение.

Наибольшее количество толстого листа в мире производит Япония. В этой стране очень развит танкерный флот. Не имея собственного металлургического сырья, Япония танкерами завозит его из Индии, Бразилии и других стран. Собственные потребности в толстом листе, а также лидирующие позиции по

качеству листа определили ведущее место этой страны по производству и сбыту толстолистовой продукции. Значительную долю на рынке составляет немецкий толстый лист. Быстро растет его производство в других странах.

Россия имеет большую внутреннюю потребность в толстом листе для судостроения, для прокладки крупных нефте- и газопроводов, а также для быстро развивающихся химического и атомного машиностроения. В 1985 г. по производству толстого листа СССР находился на втором месте в мире (16 млн. т) после Японии (18 млн. т), однако после развала Советского Союза большое количество толстолистовых станов осталось на Украине и перед Россией встал вопрос о наращивании мощностей по производству толстого листа.

Россия в составе СССР начала производить толстый лист в достаточном количестве лишь с 1950-х гг. после строительства ряда типовых толстолистовых станов 2800 (рис. 15.2). Такие станы позволяли быстро наращивать объем толстолистовой продукции для развивающегося машиностроения СССР. В 1955 г. стан 2800 был построен на Коммунарском металлургическом заводе, в 1960-м — на ОХМК и т. д. (в названии листовых станов указывается длина бочки прокатных валков, так как эта характеристика наилучшим образом отражает возможности стана).

На стане 2800 заготовка (сляб) поступает на загрузочные решетки 1, где взвешивается и осматривается, затем с помощью толкателя загружается в одну из методических нагревательных печей 2. При проталкивании вся садка печи перемещается на один шаг, и последняя нагретая заготовка сбрасывается на приемный рольганг, ведущий к вертикальной клети 3 стана. В этой клети обжатие сляба происходит по боковым граням, и на основных широких гранях окалина разламывается и разрыхляется. Затем она смывается водой, подаваемой под высоким давлением (до 150 атм) из системы сопел гидросбива. В горизонтальной черновой клети 4 в реверсивном режиме происходит прокатка до некоторой промежуточной толщины. Окончательные размеры листа также реверсивной прокаткой формируются в универсальной чистовой клети 5, которая содержит горизонтальные и вертикальные валки. Последние снимают уширение (без дополнительного обжатия во избежание наплывов) и формируют ширину готового листа. На многих станах, построенных после 1965 г., чистовая клеть содержит только горизонтальные валки, так как идею использования вертикальных валков для получения катаных кромок и сокращения боковой обрезки на листе не удалось до конца осуществить. Далее готовый лист толщиной 25–50 мм после правки на правильной машине 6 по шлепперу 7 поступает на первую линию I стана. Здесь с помощью системы гильотинных ножниц 8 и 9, расположенных в продольном и поперечном направлениях, осуществля-

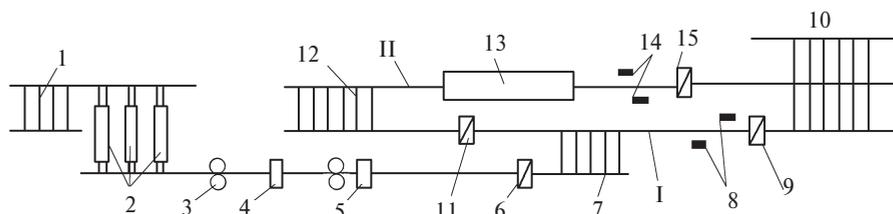


Рис. 15.2. Схема расположения типового толстолистового стана 2800

ется обрезка боковых и концевых кромок, а также раскрой листа по заказу. Здесь же (как правило, от одного листа каждой плавки) вырезается полоска металла для металлографических и механических испытаний (проба). В виде готовой карточки лист поступает на холодильник 10. Окончательно листы охлаждаются в штабелях на территории склада цеха.

Листы толщиной 5–25 мм после провки на роликоправильной машине 11 поступают по шлепперу 12 на вторую линию II, на которой перед порезкой подогреваются в печи 13. На продольных 14 и поперечных 15 ножницах обрезаются боковые и концевые кромки, а также вырезаются пробы. Готовый лист также поступает на холодильник 10 и далее охлаждается в штабелях, после чего направляется на отделочные операции.

Представленный стан очень прост. Он не содержит оборудования для контроля качества металла в процессе прокатки и, следовательно, не может гарантировать высокого качества листа. На современных станах заказчику необходимо выдавать гарантированные свойства листа, а также паспорт поверхностных и внутренних дефектов листа, если они допустимы. На листах, претендующих на высокое качество, поверхностные дефекты должны быть удалены. На стане 2800 такого оборудования в линии стана нет, контроль поверхностных дефектов осуществляется визуальным осмотром. Стан не имеет поворотного устройства, позволяющего перевернуть лист для осмотра его второй поверхности. Процедуры выявления и устранения дефектов сосредоточены на отдельном участке цеха (на адьюстаже), а не в линии стана. Это, во-первых, дорого, а во-вторых, на адьюстаже не удастся организовать 100 %-ный контроль качества продукции. На современном стане в технологической линии должны быть установлены соответствующие датчики (дефектоскопы), например ультразвуковые, для контроля поверхностных и внутренних дефектов. Также в технологической линии должны находиться зачистные станки, осуществляющие сплошную или выборочную зачистку поверхностей листа на ответственных заказах. Должны быть разметочные устройства, клеймочные машины и пр. Конечно, необходима автоматизированная система слежения за каждым листом на всех переделах на базе сети ЭВМ. На описываемых станах такие системы появились только в последнее время в результате реконструкции этих станов.

В линии стана 2800 нет термических печей. Так называемые сырые листы, которые получают при естественной скорости охлаждения после прокатки без его термической обработки, не удовлетворяют подавляющее большинство заказчиков. В линии стана должно быть оборудование для закалки, нормализации, отжига, режимного охлаждения листа. Попытки пристроить к действующему стану 2800 дополнительный термический цех показали, что такой путь дорог, так как не дает возможности использовать тепло прокатного нагрева. Кроме того, организационные затраты на производство в дополнительном цехе всегда выше, чем на стане, даже при тех же технологических операциях. В отдельно стоящем цехе недостижимы те высокие свойства, которые можно получить при соответствующих режимах, использующих совместное влияние на структуру металла пластической деформации и термической обработки (термомеханическая и контролируемая обработка).

Длина бочки валков 2800 дает возможность прокатывать лист не шире 2400 мм, а для судостроения, атомного и химического машиностроения требу-

ются более широкие листы. Чем шире лист, тем меньше сварочных и монтажных работ в машиностроении. Для магистральных газо- и нефтепроводов требуются трубы диаметром до 1420 мм, которые можно сформовать из листа шириной около 4600 мм или из двух листов меньшей ширины. Для прокатки широких листов необходимы станы с длиной бочки валков 3600–5500 мм, имеющие в своем составе термические средства и оборудование для контроля качества металла, а также разнообразные отделочные средства.

Значительным этапом в развитии производства толстого листа в СССР стало строительство в 1973 г. стана 3600 на заводе “Азовсталь” (г. Мариуполь, Украина), имеющего современное и по ряду позиций уникальное оборудование, которое обеспечивает высокое качество продукции, удовлетворяющее современным требованиям (рис. 15.3). Стан производит из углеродистых, конструкционных и легированных марок стали листы толщиной от 5 до 50 мм и плиты до 200 мм шириной 2000–3200 мм и длиной до 28 м. Прокатку ведут из катаных слябов толщиной 130–250 мм, шириной 1100–1900 мм и массой от 2,2 до 16,0 т, которые получают на слябингах заводов им. Ильича (Мариуполь) и “Запорожсталь” (Запорожье). Основную часть заготовки составляют литые слябы, получаемые на УНРС конвертерного цеха Азовстали. На стане предусмотрена также прокатка слитков весом от 10 до 30 т размерами 450–940×1300–2000×2400–3000 мм. Для нагрева слитков на стане имеются нагревательные колодцы 1, а для нагрева слябов — четыре методические печи 16, оборудованные автоматическими весами 15, показания которых сразу попадают в сетевую автоматизированную систему слежения и учета металла по всей технологической линии. Слябы со склада транспортируются тележкой 13 к подъемно-опускающему столу, с помощью которого они поступают на печной рольганг 14 и оттуда толкателями загружаются в методические печи. При перемещении толкателя на один шаг одна нагретая до температуры 1180–1280 °С заготовка выпадает на транспортный рольганг. Нагретые в колодцах слитки краном передаются на стационарный опрокидыватель 2, который укладывает слиток на рольганг, ведущий к линии стана.

В деформационной части стана имеется типовой набор оборудования — вертикальная клеть дуо 4, черновая 6 и чистовая 17 клетки кварто (без вертикальных валков), за каждой из которых установлены гидросбивы. Одной из особенностей стана является установка поворотных рольгангов не только за черновой, но и перед и за вертикальной клетью. Это позволяет применять технологические схемы прокатки, не применяемые ранее, и активно управлять формой раската. Набор оборудования стана очень многообразен и позволяет получать лист повышенной точности, с заданной структурой металла и высоким уровнем механических свойств. Предусмотрено несколько технологических потоков металла.

Технологический поток для отделки плит включает следующие технологические операции. Прокатанные в черновой клетке кварто плиты и толстые листы передаточной тележкой 9 по одному или в виде штабеля, формируемого на штабелирующем столе, направляются в пролет замедленного охлаждения. Здесь они могут быть направлены в садочные печи 12 для термообработки.

Печи снабжены закалочными ваннами. Готовые листы, не требующие закалки, подвергаются огневой резке 10 и зачистке 11, затем направляются на

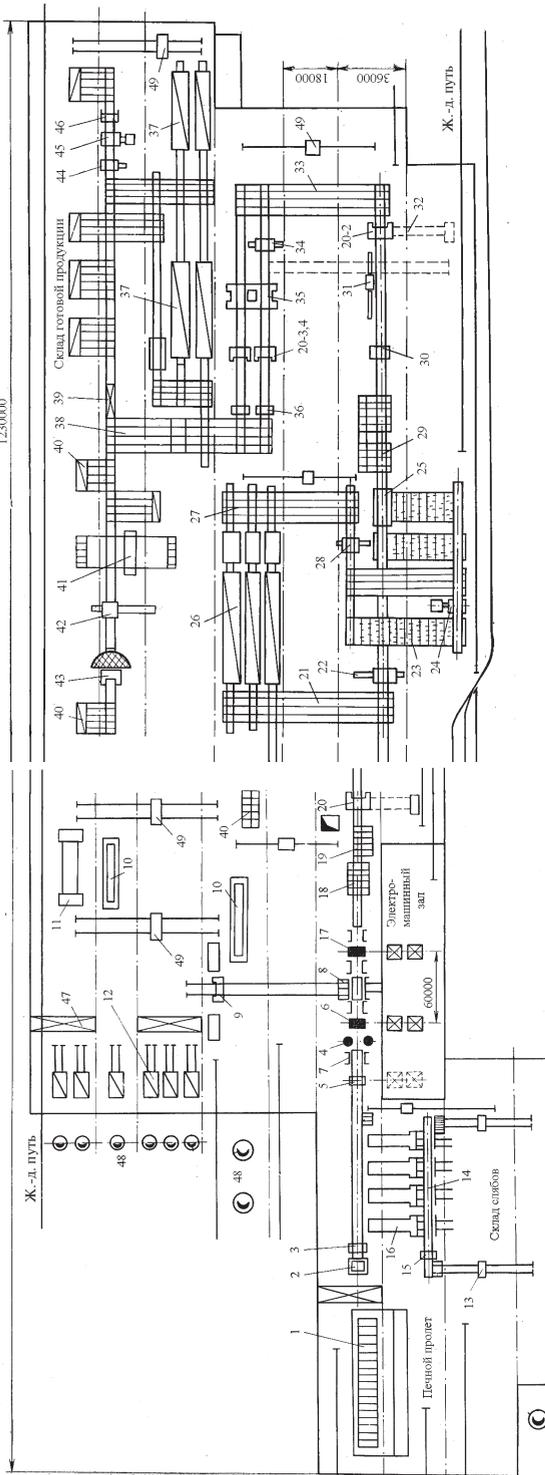


Рис. 15.3. План расположения оборудования стана 3600 завода "Азовсталь".

оборудование для производства плит: 1 — нагревательные колодцы; 2 — опрокидыватель слитков; 3 — поворотное устройство с весами; 4 — вертикальная клеть; 5 — горизонтальный окалиномателец; 6 — черновая горизонтальная клеть кварто 3600; 7 — линейки манипуляторов; 8 — подъемно-опускающийся стол; 9 — передаточная тележка; 10 — стенд огневой резки; 11 — стенд огневой зачистки; 12 — камерные печи с выдвигным полом;

оборудование для производства листов; 13 — тележка для слитков; 14 — загрузочный роляганг; 15 — весы; 16 — методические печи; 17 — чистовая горизонтальная клеть кварто 3600; 18 — роликозакалочная машина; 19 — кантователь листов № 1; 20 (1—5) — ножицы поперечной резки; 21 — передаточный шлеппер; 22 — роликовая правильная машина РПМ № 1; 23 — холодильник; 24 — РПМ № 2; 25 — охлаждающее устройство; 26 — роликовые нормализационные печи; 27 — возвратный шлеппер; 28 — РПМ № 3; 29 — инспекционный стеллаж № 1; 30 — ультразвуковой дефектоскоп; 31 — разметочная машина; 32 — транспортёр для проб; 33 — инспекционный шлепперный стеллаж № 2; 34 — дисковые ножицы; 35 — кромкообрезные ножицы № 2 и 3; 36 — клеймитель и маркировщик; 37 — печи для термообработки; 38 — шлепперы с кантователями; 39 — роляганг-весы; 40 — карманы; 41 — стеллаж огневой зачистки; 42 — РПМ № 4; 43 — ножицы № 5 с "гусиным" полом; 44 — РПМ № 5; 45 — РПМ № 6; 46 — ножицы поперечной резки № 6; 47 — мостовой кран (на плане показаны не все краны); 48 — дымовые трубы; 49 — тележка

участок осмотра, контроля и отделки. Толстые плиты правятся на прессе. Переносными ультразвуковыми датчиками проверяется качество поверхности, а при необходимости выявляются внутренние дефекты листов.

Более тонкие листы (до 50 мм) прокатываются в чистовой клети кварто 17. Далее они могут быть подвергнуты закалке на роликозакалочной машине (имеющей ванну с водой) 18, которая в случае ненадобности утапливается под рольганг. После прокатки лист может пройти по одному из четырех технологических потоков:

1) листы с повышенной неплоскостностью поверхности подвергаются горячей правке при температуре около 500 °С на роликовой правильной машине 22 и далее по рольгангу направляются на дальнейшую отделку;

2) листы толщиной 20–50 мм частично охлаждаются на дисковом холодильнике 23 и правятся в горячем состоянии на правильной машине 24, затем на холодильнике охлаждаются до 100–200 °С и далее до комнатной температуры с помощью охлаждающего устройства 25;

3) листы толщиной 5–20 мм по шлепперу 21 поступают в нормализационные печи 26, затем по шлепперу 27 подаются к правильной машине 28 и после охлаждения на холодильнике 23 выходят на основной рольганг линии стана;

4) закаленные на роликовой закалочной машине 18 листы по шлепперу 21 поступают в карманы и затем тележкой передаются в пролет отделки.

Далее по первым трем технологическим потокам установлены инспекционные стеллажи 29 для визуального контроля поверхности листа, которые оборудованы поворотным устройством для переворачивания листа с нижней плоскости на верхнюю. Для автоматического контроля имеются дефектоскопы 30, работающие на феррозондных датчиках, расположенных по всей ширине листа. Они чертят диаграмму дефектов по одной, а после переворота и по второй поверхности листа с указанием глубины залегания дефекта. Эти дефектограммы затем используются при зачистке дефектов на инспекционном столе 33. Имеется дополнительная возможность проконтролировать поверхность металла уже вне линии стана с помощью дополнительных ручных дефектоскопов. Наиболее ответственные заказчики получают дефектограмму как паспорт листа вместе с другой выходной документацией. На стане имеется автоматизированное устройство 31 для разметки и раскроя листа. Координатная система устройства получает информацию от ЭВМ, находящейся в системе слежения за металлом и содержащей сведения о выполняемых заказах. По разметке лист разрезается на карточки на ножницах 20 (листы толщиной 5–20 мм) и 35 (листы толщиной 20–50 мм). На этих ножницах осуществляют также обрезку кромок и отбор проб для исследования структуры, механических свойств и химического состава металла. Далее карточки маркируются на маркировочных машинах 36. В технологическом потоке имеется несколько правильных машин и ножниц различного назначения. Вне потока расположено также много уникального оборудования, такого как пресса для правки, установки газовой резки, станки для зачистки и ремонта поверхности металла, установки для контроля дефектов и др.

По ходу технологического потока предусмотрен также отжиг металла, закалка и отпуск в печах 37, режимное охлаждение на установке ускоренного охлаждения в целях получения определенной структуры металла. Как видно,

стан имеет полный набор термических средств для получения высококачественного листа по механическим свойствам и структуре металла.

Стан 3600 оборудован мессдозами для автоматического измерения усилия прокатки, автоматическими измерителями ширины и толщины проката. Уникальный привод валков стана позволяет передавать момент в 255 тм на 1 м длины бочки валков, что в 1,5 раза больше, чем на подобных зарубежных станах. Жесткие клетки позволяют прокатывать лист толщиной выше 5 мм с допуском $\pm 0,25-0,4$ мм, что значительно меньше, чем на других станах подобного типа. На стане установлены технологические счетно-решающие машины, из которых одна управляет технологией нагрева металла под прокатку, вторая — технологией прокатки на стане и третья — режимами термообработки в термических печах. Кроме того, имеется АСУП (автоматизированная система управления производством), осуществляющая слежение за ходом выполнения заказов и планирующая производство на месяц, сутки и смену, а также автоматизированная система слежения за металлом в процессе прокатки. Подобный стан 3600 спроектирован (но не построен) также для Западно-Сибирского металлургического комбината.

Как видно, стан дорогой, сложный в управлении, но по техническим характеристикам находится на уровне современных зарубежных станов, а по многим параметрам превосходит их.

Следующим этапом в развитии толстолистного производства в России должен был стать стан 5000 Ижорского завода, позволяющий производить листы шириной от 2500 до 4600 мм, толщиной от 10 до 450 мм из разнообразных марок стали, включая новые сложные марки, используемые в атомном машиностроении, а также титановые сплавы, применяемые в судостроении и химическом машиностроении. Предусмотрено производство биметаллических листов из конструкционных марок стали с плакирующим слоем толщиной 5–7 мм из нержавеющей, кислотостойких и специальных сталей и сплавов титана. Биметаллические листы применяются для изготовления емкостей, корпусов, труб, работающих в сильноагрессивных средах (например, в целлюлозно-бумажной промышленности). Морская вода является также очень агрессивной средой. Оборудование стана по проекту должно было производить продукцию по восьми различным технологическим потокам, включающим различные режимы деформации металла, огневую зачистку черновых раскатов, закалку и ускоренное охлаждение с прокатного нагрева, горячую и холодную правку и резку, термообработку, зачистку и разветвленный контроль качества металла. В проекте предусмотрена также антифлоккенная обработка металла в отапливаемых печах и ямах.

Рассмотрим проектную схему расположения оборудования стана 5000 (не в масштабе, поэтому схему — рис. 15.4). Хотя эта схема не реализована, изучение ее полезно в свете тех задач, которые должны решаться в современном толстолистном производстве. Для нагрева исходной заготовки проектом было предусмотрено пять типов печей: методические печи с шагающими балками для слябов, колодцы для слитков и брамов (кованых слябов из крупных слитков после отделения головной и донной частей), камерные печи для тяжелых слитков и брамов, электрические печи для легированных марок стали и индукционные вакуумные печи для титановых слитков. После нагрева заготовка

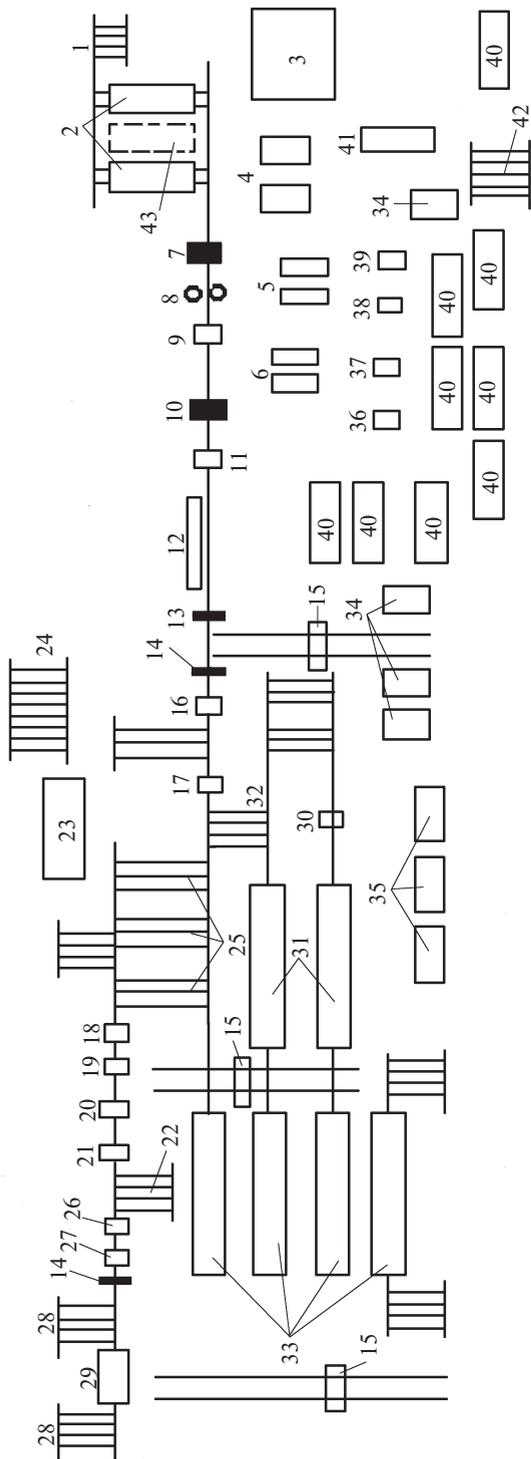


Рис. 15.4. Схема расположения оборудования стана 5000 (по проекту на полное развитие стана):

1 — загрузочный стол; 2 — методические печи с шагающими балками; 3 — нагревательные колодцы; 4 — нагревательные камерные печи с выкатным подом; 5 — электрические вакуумные печи; 6 — вакуумные индукционные печи; 7 — горизонтальная клеть дуо; 8 — вертикальная клеть; 9 — машина огневой зачистки; 10 — рабочая клеть кварто; 11 — установка регламентируемого охлаждения; 12 — установка термоупрочнения листов; 13 — клеймитель; 14 — машина маркировщик листов; 15 — тележка; 16 — листопрямляющая машина ЛПМ № 2; 17 — двоянные крошкообрезные ножницы (СКОН) № 1; 18 — ЛПМ № 3; 19 — ЛПМ № 4; 20 — установка ультразвукового контроля; 21 — установка контроля механических свойств; 22 — инспекционный стол; 23 — электрическая печь; 24 — установка ускоренного охлаждения; 25 — холодильник; 26 — СКОН № 2; 27 — ножницы продольной резки; 28 — листоукладчик; 29 — машина выборочной зачистки листов; 30 — установка дробеметной зачистки; 31 — закаточные печи № 1-2; 32 — холодильник; 33 — отпусчные печи № 3-6; 34 — неоттапливаемые колодцы; 35 — термические печи с выкатным подом; 36 — машина огневой резки плит; 37 — две установки газовой резки листов; 38 — кантователь; 39 — машина для зачистки листов и плит; 40 — термические печи с выкатным подом; 41 — установка для мойки и сушки слитков; 42 — водяной закалочный механизированный бак

поступает в камеру гидросбива окалины и затем на прокатку. Горизонтальная клеть дуо имеет размеры бочки валков $\varnothing 1600 \times 4000$ мм, вертикальная клеть 8 — $\varnothing 1000 \times 1100$ мм и горизонтальная клеть кварто 10 — $\varnothing 2360 \times 4800$ мм. Между вертикальной и клетью кварто установлена машина огневой зачистки (МОЗ) 9 с кантователем, которая используется в случае необходимости. На рольганге перед клетью кварто предусмотрена возможность покачивания раската “вперед-назад” для подстуживания перед чистовыми проходами и реализации режимов контролируемой прокатки.

После прокатки в чистовой клетке кварто раскат должен был проходить по одному из трех потоков:

1) на установку для закалки с прокатного нагрева 12 (для проката толщиной 10–160 мм), откуда прокат толщиной 10–50 мм поступает на рольганг к листопрямляющим машинам 18 и 19 и далее — по технологической линии, а прокат толщиной 51–160 мм — на тележку 15 для передачи на промежуточный склад плит;

2) на тележку 15 для передачи на резку и предварительную термообработку толстых листов и плит (толщиной 51–450 мм); весь прокат этой группы подвергается резке, зачистке, предварительной термообработке в здании цеха стана 5000 и окончательной термообработке в отдельном термическом цехе;

3) листы толщиной 10–50 мм после холодильника 32 — на участок отделки и термообработки; сюда же поступают по некоторым заказам холодные раскаты после закалки в установке 12; на этом участке осуществляется закалка, отпуск, нормализация, аустенизация и другие операции. Прокат, нуждающийся в противоблоксной обработке, шлеппером передается в неотопливаемые печи 34. В случае необходимости перед термическими печами прокат подвергается дробеметной зачистке на установке 30 на машинах абразивной зачистки 39.

В проекте было учтено также то, что стан находится на территории Ижорского завода, имеющего уникальное сталеплавильное оборудование для производства высококачественного металла и самых крупных в Европе слитков (до 325 т). На заводе размещаются самые крупные в России ковочные прессы усилием 6000 и 12000 т, которые позволяют ковать слитки в брамы весом до 85 т, используемые в качестве заготовки для прокатки крупных листов и плит на стане 5000. По многим параметрам стан не имел аналогов в мире.

Однако стан получился очень дорогим и должен был строиться в три этапа. Был завершен только первый этап, и то не в полном объеме. По проекту было предусмотрено пять типов нагревательных средств, но работают только садочные печи с выкатным подом (очень старые). Стан должен был содержать три прокатные клетки — черновую и чистовую горизонтальные и между ними вертикальную клетки, но сейчас имеет только одну чистовую клеть кварто. Немецкий опыт, где имеется несколько толстолистовых станов, содержащих только одну чистовую клеть кварто, а также уже накопленный Ижорским заводом опыт показали, что в одной клетке трудно прокатывать лист с высоким качеством поверхности из-за быстрого износа валков этой клетки и вдавливания окалины в поверхность листа. Кроме того, при прокатке в одной клетке резко заужены возможности управлять формой листа в плане, отчего велика обрезь металла по боковым и концевым кромкам.

В настоящее время стан 5000 входит в состав Череповецкого комбината ОАО “Северсталь” (как цех ЛПЦ-3) и ориентируется на прокатку широких листов в качестве заготовки (штрипса) для сварных труб большого диаметра 1420 мм из рядовых и низколегированных марок стали. В сортамент стана входят также широкие листы из конструкционных и легированных марок стали для нужд судостроения, атомного машиностроения и других отраслей промышленности, развивается возможность прокатки толстого листа из биметалла. Рядом с цехом построен новый Ижорский трубный завод (ИТЗ, также собственность ОАО “Северсталь”), который будет производить из получаемого штрипса трубы диаметром 1420 мм с одним сварным швом для магистральных газо- и нефтепроводов, предназначенных для работы в северных районах России и на дне Балтийского моря.

В связи с новыми задачами стан 5000 реконструируется и достраивается. Производительность его увеличивается до 800 тыс. т листа в год, в перспективе — до 1,5 млн. В качестве заготовки используются в основном литые слябы, производимые в сталеплавильных цехах комбината ОАО “Северсталь” (шириной до 1500 и толщиной до 250 мм). Планируется поставка более крупных литых слябов (шириной до 2700 и толщиной до 320 мм) с Нижне-Тагильского металлургического комбината.

Существующий стан 5000 (рис. 15.5, план цеха) пока не имеет полного набора оборудования для решения поставленных задач по обеспечению, прежде всего, трубного производства. В ближайшей перспективе будет построена черновая горизонтальная клеть дуо. Не будет строиться вертикальная клеть (без нее удастся решить все задачи). Таким образом, стан будет иметь две горизонтальные реверсивные клетки. Для нагрева пока используются только старые садочные печи с выкатным подом. Введена в строй и осваивается уникальная методическая печь с проходными тележками, аналогов которой в России нет. На стане достраиваются новые правильные машины для горячей правки листа, новые термические печи, средства контроля качества металла и пр. Сдвоенные кромкообрезные ножницы СКОН и правильная машина временно установлены в южном пролете цеха, что ограничивает возможности складирования и отделки листа. В дальнейшем это и другое оборудование будет размещено в строящихся восточных пролетах цеха.

Однако и в существующем виде стан 5000 позволяет прокатывать металл с высокими свойствами. На нем освоены режимы контролируемой прокатки, обеспечивающие высокие прочностные характеристики при высокой пластичности металла. Используется установка термоупрочнения для повышения прочностных свойств листов. Новая уникальная установка контролируемого охлаждения (УКО), снабженная счетно-решающей машиной, способна для каждого листа рассчитать и реализовать такой режим подачи воды на лист, который обеспечивает требуемую скорость охлаждения для получения высоких механических свойств металла и равномерность охлаждения по всей поверхности для повышения качества листа и предотвращения его коробления в процессе охлаждения.

Задача развития собственного производства толстого листа в России с каждым годом становится все острее. Возрождается судостроение, атомное машиностроение, трубная промышленность, тяжелое машиностроение — главные

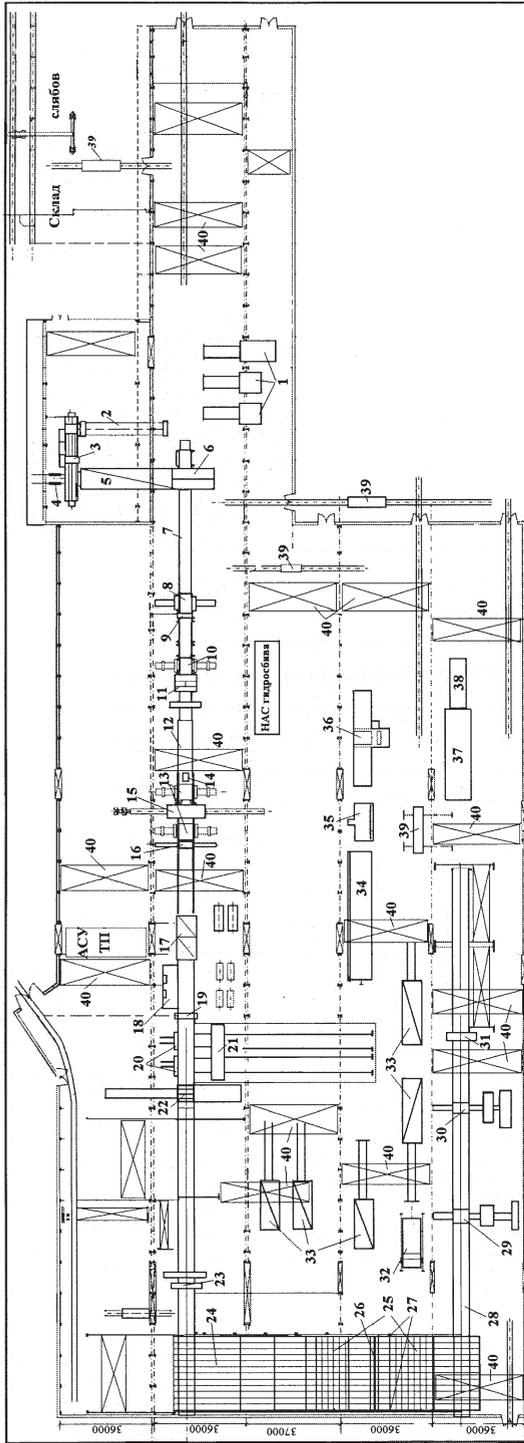


Рис. 15.5. Схема расположения оборудования стана 5000 на начало 2005 г.:

1 — печи с выкатным подом; 2 — загрузочная тележка и загрузочный стол; 3 — весы; 4 — толкатель; 5 — нагревательная методическая печь с проходными тележками; 6 — устройство выдачи слибов; 7 — роляганг; 8 — манипулятор перед клетью дуо; 9 — камера гидросбыва окалины; 10 — манипулятор за клетью дуо; 11 — роляганг с кантователем; 12 — раскатной роляганг; 13 — манипулятор; 14 — устройство сканирования формы раската; 15 — клеть кварто; 16 — клеть кварто; 17 — установка контролируемого охлаждения (УКО); 18 — установка термоупрочнения; 19 — клеймитель; 20 — стайквиватель плит; 21 — передаточная тележка для плит; 22 — листовая машина (ЛПМ № 1); 23 — установка ультразвуковая (УЗК) “Север-6-5000”; 24 — шлеппер-холодильник; 25 — стеллаж инспекторский; 26 — кантователь; 27 — маркировщик; 28 — роляганг перед СКОН; 29 — слвоенные кромокобрезные ножницы СКОН; 30 — ножницы поперечной резки; 31 — клеймитель и маркировщик; 32 — машина сплошной зачистки; 33 — термическая печь с выкатным подом; 34 — стенд термическая резки; 35 — кантователь листов и плит; 36 — машина листовая 7×500×3600; 37 — установка ультразвуковая “Север-10-5000”; 38 — участок ручного УЗК; 39 — тележка; 40 — мостовой кран

потребители толстого листа. Много толстого листа Россия покупает за рубежом. В связи с резким увеличением потребности в трубах большого диаметра (до 1420 мм) для магистральных газо- и нефтепроводов построено и строится несколько специализированных трубных цехов. Для их снабжения заготовкой (штрипсом) намечено строительство новых станов 5000 на НТМК и ММК. На этих комбинатах строятся новые МНЛЗ для крупногабаритных литых слябов. Реанимируется проект строительства стана 3600 на Западно-Сибирском металлургическом заводе (по типу стана 3600 завода “Азовсталь”, но с учетом его недостатков). Реконструированы орско-халиловский стан 2800 и череповецкий стан 2800/1700.

О последнем стане необходимо сказать отдельно. Этот стан, помимо типовой толстолистовой линии клетей стана 2800, содержит непрерывную группу клетей 1700, характерную для станов, производящих тонкий горячекатаный лист. В момент строительства предполагалось, что стан будет производить толстый и тонкий горячекатаный лист одновременно. Однако при массовом производстве листа такая идея оказалась неудачной, так как стан не смог развить нужную производительность по каждому из направлений. Толстолистовой и тонколистовой станы, как сиамские близнецы, мешали друг другу развиваться. Были проекты реконструкции стана под какой-нибудь один вид листа, например толстый. Однако развал советской экономики неожиданно высветил положительные возможности такого стана. В условиях невысокой потребности в листе он вполне справляется с производством и того, и другого видов листа, а ширина сортамента стала его преимуществом. После реконструкции стан производит высококачественный термообработанный толстый лист и высококачественный тонкий лист, предназначенный для последующей холодной прокатки.

В зарубежных странах производство толстого листа развивалось сразу со строительства станов с повышенной длиной бочки валков и средствами для формирования высокого качества продукции. Начиная с 1960-х гг. наблюдается быстрый рост толстолистого производства в США, ФРГ, Японии, Франции, Англии и даже в таких странах, как Турция, Финляндия, Португалия и др. В основном строились станы с длиной бочки более 4000 мм. Только в Японии в 1966–1968 гг. было построено пять таких станов. Самые крупные из них — в г. Мицусима (стан 5500 фирмы “Кавасаки стил”) и в г. Оита (стан 5500 фирмы “Ниппон стил”) — позволяют производить листы и плиты толщиной 50–300 мм и шириной 3900–4400 мм из слябов массой 50–80 т. В 1970-е гг. в Японии построено еще несколько самых современных станов, насыщенных автоматизированными системами управления технологией и производством. Последние толстолистовые станы отличаются высокой жесткостью рабочих клетей и рассчитаны на усилия прокатки 5000–8000 т (стан 5000 ОАО “Северсталь” проектировался на усилия до 9000 т, а стан 5590 в США позволяет развивать усилия до 16000 т). Для зарубежных станов, особенно японских, характерно широкое применение ЭВМ в управлении технологическим процессом и качеством листа, станы имеют широкие возможности по термической и термомеханической обработке по самым сложным режимам, по отделке листа и контролю его качества в потоке стана. Имеется система автоматизированного управления производством.

15.3. Схемы деформации при прокатке

На типовом толстолистовом стане, имеющем вертикальную и горизонтальные черновую и чистовую клети, нагретый в методической печи сляб поступает в вертикальную клетку стана, в которой осуществляется обжатие сляба по боковым граням. Вертикальная клетка используется для нескольких целей:

для снятия конусности слитков, если прокатка ведется из слитка;

для разрыхления окалины перед гидросбивом;

для формирования ширины сляба;

для получения толстых листов и плит с катаными концевыми торцами; в этом случае после прокатки в горизонтальной клети раскат кантуют на 90° и обжимают по торцам в вертикальной клети;

для управления формой раската в плане.

Одной из важнейших задач является разрыхление окалины на основных поверхностях сляба. Гидросбивами, установленными за вертикальной клеткой, а также после черновой клети, подающими струи воды под давлением до 150 атм (15 МПа), окалина смывается с поверхности сляба. Для разрыхления окалины в вертикальных валках, очевидно, достаточно произвести только один пропуск. Однако иногда количество пропусков в этой клети увеличивают до трех-пяти в целях уменьшения ширины исходного сляба. При большой разнообразии ширины готового листа выбирать "правильную" ширину исходного сляба под каждый лист невыгодно. Мы выигрываем на том, что в вертикальной клети производим только один пропуск, но существенно проигрываем на частой смене кристаллизаторов на УНРС, на изготовлении и хранении большого парка кристаллизаторов. Рационально иметь четыре-пять разных по ширине кристаллизаторов, а более точную подгонку ширины сляба под требуемый лист осуществлять в вертикальной клети. Можно более строго поставить оптимизационную задачу на минимизацию суммарных затрат на работу с кристаллизаторами и на вертикальные пропуски на стане. В результате ее решения получится оптимальный парк кристаллизаторов и определится количество вертикальных пропусков для каждого типоразмера листа.

После вертикальных пропусков в черновой горизонтальной клети четверто осуществляются протяжные пропуски. При этом направление прокатки по-прежнему совпадает с длиной сляба. В этих пропусках решают две задачи. Во-первых, стремятся максимально проработать сечение сляба с тем, чтобы устранить литую структуру, измельчить зерно, получить равномерную катаную структуру по всему сечению. В этих пропусках применяют максимально возможные степени обжатия за проход. Во-вторых, протяжные пропуски необходимы для придания листу правильной прямоугольной формы в плане.

Если сляб представить в виде отдельных горизонтальных слоев, расположенных на расстоянии y от центра (рис. 15.6, a), то прорабатываемостью P_y каждого слоя будет называться та суммарная степень деформации, которую получает этот слой за весь цикл прокатки сляба:

$$P_y = \int \epsilon_{iy} dt,$$

где ϵ_i — интенсивность деформации в слое с координатой y в некотором пропуске, и интегрирование следует понимать как суммирование деформации по всем пропускам.

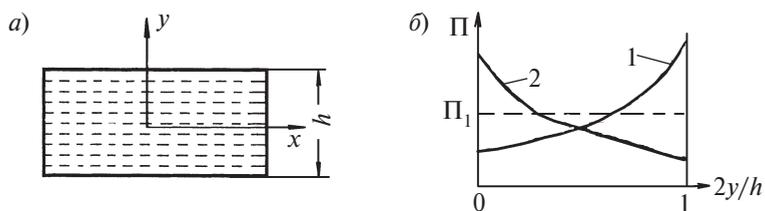


Рис. 15.6. Поперечное сечение толстого листа (а), прорабатываемость слоев (б) на высоком (кривая 1) и среднем и низком (кривая 2) очаге деформации

Можно записать

$$\Pi_y = \int \frac{\sigma_{iy} \varepsilon_{iy} dt}{\sigma_{iy}}$$

Числитель представляет собой энергию деформации. Для горячей прокатки интенсивность напряжений σ_{iy} равна пределу текучести материала σ_s , который можно считать величиной постоянной. Отсюда вывод: чем больше энергии затрачивается на деформацию слоя и меньше предел текучести металла (чем мягче металл), тем больше прорабатываемость слоя. При прокатке в первых пропусках прорабатываемость слоев уменьшается по направлению от поверхности сляба к его середине (рис. 15.6, б, кривая 1), так как очаг деформации высокий и фактор l/h_{cp} , определяющий высоту очага деформации, меньше или близок к 1. По мере уменьшения толщины раската фактор l/h_{cp} увеличивается, и очаг деформации переходит в разряд средних, когда, наоборот, центральные слои прорабатываются более интенсивно, чем поверхностные (см. рис. 15.6, б, кривая 2).

Суммарная прорабатываемость отдельных слоев за все пропуски может быть разной при прокатке листов разной толщины. При прокатке тонких листов она достаточна высока по всем слоям. Но при прокатке толстых листов и плит центральные слои могут быть недостаточно проработаны. Существует минимальная прорабатываемость Π_1 , ниже которой свойства металла остаются низкими, так как в центральных слоях сохраняется структура литого металла. При прорабатываемости Π_1 и выше структура становится более однородной и мелкозернистой, характерной для катаного металла, поэтому желательно во всех слоях получить прорабатываемость выше Π_1 .

В протяжных пропусках катают металл с максимальными обжатиями, чтобы обеспечить высокую прорабатываемость центральных слоев металла. Тем не менее на толстых листах и плитах свойства металла по высоте могут различаться. Для таких листов оговаривается, что при стандартных испытаниях должны фиксироваться свойства листа в слое, расположенном на расстоянии $2y/h = 1/3$.

Протяжные пропуски могут решать еще одну задачу. Поскольку на исходных слябах высота и ширина очень нестабильны, что связано с условиями разлива сляба, то при прокатке листов режимы обжатия и в конечном счете высота и особенно ширина листа могут колебаться в широких пределах. После протяжных пропусков размеры сляба становятся строго определенными. Это

обеспечивает стабильное выполнение расчетных режимов обжатия в последующих пропусках, что особенно важно для автоматизации управления процессом прокатки.

После протяжных пропусков возможно несколько схем прокатки листа.

15.3.1. Поперечная схема прокатки

Сляб шириной b и длиной l разворачивается на 90° и сначала в черновой, а затем в чистовой клетях прокатывается до конечной толщины h , не меняя направления прокатки. Таким образом, раскат во всех пропусках прокатывается в поперечном направлении по отношению к исходному слябу (рис. 15.7). Такие пропуски называются поперечными, и вся схема прокатки носит такое же название. Если не учитывать уширение, длина сляба l после протяжных пропусков должна быть равна ширине готового листа $b_{\text{л}}$. При прокатке листов разной ширины для каждого листа следует правильно подбирать длину исходного сляба. Удобно то, что высота и ширина сляба для всех размеров листа могут быть неизменными, следовательно, на УНРС размер кристаллизатора не связан с размерами прокатываемых листов. Можно организовать работу “под заказ”, если имеется автоматизированная система единого планирования производства и слежения за движением слябов на участках УНРС и на стане. Такой системы пока нигде нет.

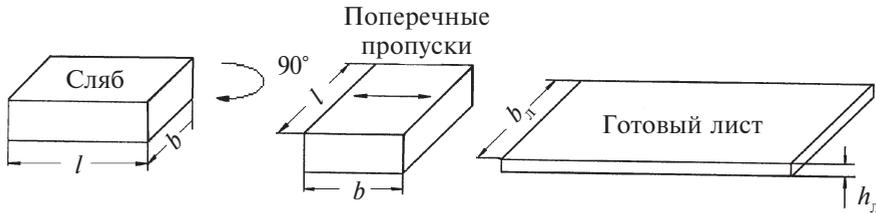


Рис. 15.7. Схема поперечной прокатки листа

К преимуществам поперечной схемы прокатки можно отнести также наличие только одной кантовки (поворота на 90°) листа за весь цикл прокатки.

Поперечная схема имеет недостатки. В центре литого сляба всегда имеется ликвационная дорожка, рыхлость и различные включения, что связано с условиями кристаллизации металла. Чем чище металл, получаемый в сталеплавильном производстве, и лучше организовано перемешивание металла перед кристаллизатором, тем меньше этих дефектов, и достоинства поперечной схемы прокатки становятся более привлекательными. Однако при современном уровне непрерывной разливки в реальном слябе вдоль его оси по длине всегда встречаются мелкие дефектные участки. При прокатке в поперечных пропусках в направлении прокатки действуют растягивающие напряжения, которые способствуют разрыву металла в центральных слоях сляба. Литые слябы по поперечной схеме прокатывать опасно, поэтому ее применяют в основном для прокатки катаных слябов. Для литых слябов более надежна продольная схема прокатки.

15.3.2. Продольная схема прокатки

После протяжных пропусков сляб поворачивают (кантуют) на 90° . Следуют уширительные пропуски, в которых сляб прокатывается в поперечном направлении до получения заданной ширины готового листа $b = b_{\text{д}}$ (без учета уширения). Уширительные пропуски осуществляются в черновой клети кварто. Затем сляб еще раз разворачивается на 90° , и дальнейшая его прокатка ведется в продольном направлении до готовых размеров. Продольные пропуски либо осуществляются только в чистовой клети, либо начинаются в черновой, а заканчиваются в чистовой клетях. Как видно (рис. 15.8), основная деформация листа проходит в продольных пропусках, в которых центральные дефекты сляба раскатываются в направлении длины. Они при прокатке не раскрываются, а при большой степени деформации сильно вытягиваются, разрываются и практически исчезают. Качество листа при продольной прокатке выше, чем при поперечной.

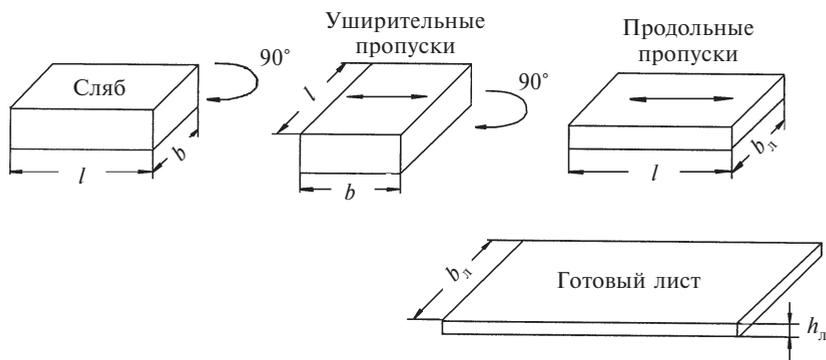


Рис. 15.8. Продольная схема прокатки

При продольной схеме прокатки ширина сляба может быть постоянной и минимально возможной, поскольку ширина готового листа формируется в уширительных пропусках. Но с точки зрения затрат энергии и качества боковых кромок листа количество уширительных пропусков следует свести к минимуму. Видимо, также необходимо решить оптимизационную задачу на минимум суммарных затрат на смену и содержание парка кристаллизаторов и на уширительные пропуски, чтобы определить оптимальный парк кристаллизаторов и оптимальное количество уширительных пропусков.

Продольная схема прокатки имеет свои недостатки. Форма готового листа в плане больше отличается от прямоугольной, чем при поперечной схеме прокатки. Чем больше деформация в уширительных пропусках, тем больше искажается форма боковой грани листа. Наличие лишней кантовки снижает производительность стана.

15.3.3. Прокатка на угол

Наилучшее приближение к прямоугольной форме листа в плане обеспечивает схема прокатки на угол, суть которой представлена на рис. 15.9. После протяжных пропусков сляб разворачивается на угол α к направлению оси вала

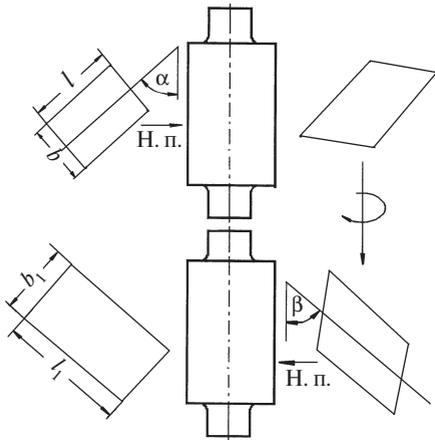


Рис. 15.9. Схема прокатки на угол

и задается в черновую клеть кварто. После реверса валков сляб прокатывается тупым углом вперед под углом β к оси валка.

При правильном подборе углов α и β за пару пропусков сляб становится прямоугольным. При этом его ширина b и длина l увеличатся до значений b_1 и l_1 . За несколько пар пропусков на угол получаем требуемую ширину сляба, равную ширине готового листа $b_{д}$, и дальнейшая прокатка производится в обычных продольных пропусках. После пары пропусков на угол все грани сляба остаются прямолинейными, при других схемах прокатки они значительно искажаются, что увеличивает расход металла в обрезь.

При прокатке на угол проблема состоит в том, чтобы, во-первых, правильно рассчитать углы α и β для каждого сляба и каждого режима его деформации, а во-вторых, при прокатке выдерживать расчетные значения углов на стане. Станы не имеют приборов и оборудования для измерения этих углов и удержания сляба в заданном положении на рольганге. Такое оборудование можно было бы изготовить, но оно дорого и экономически неоправданно. Схема прокатки на угол полностью зависит от квалификации оператора стана и иногда приводит к браку по геометрии листа.

15.4. Формирование геометрии листа в плане

15.4.1. Формирование профиля в вертикальных валках

При прокатке в вертикальной клетке очаг деформации узкий и высокий (шириной и высотой очага деформации в этом случае служит соответственно высота и ширина сляба). В этих условиях деформация металла крайне неравномерна как по ширине, так и по длине сляба. Образуются неравномерные наплывы по длине сляба. В начале и конце прокатки на длине, равной длине дуги



Рис. 15.10. Форма сляба после прокатки в вертикальных валках и первом горизонтальном пропуске

захвата, наплывы не образуются, так как металл имеет возможность течь в длину. Средние же по длине участки сляба образуют мощные наплывы. При последующей прокатке в горизонтальных валках наплывы имеют большее обжатие и этот металл устремляется в ширину. За счет дополнительного уширения средняя часть сляба будет шире, чем концы, поэтому раскат после вертикальных и первого горизонтального пропусков имеет зауженные концы (рис. 15.10). Опыты показали, что ширина переднего зауженного конца всегда меньше, чем заднего, но длина их примерно одинаково-

ва и равна двум-трем длинам очага деформации. Чем больше пропусков в вертикальной клети, тем концы более заужены. А так как количество пропусков в вертикальных валках всегда нечетно, то разница в ширине переднего и заднего концов сляба остается всегда.

Для устранения зауженных концов на некоторых станах (например, на стане 3600 “Азовстали”) осуществляют дополнительную прокатку торцов сляба в вертикальной клети. Для этого после пропусков в вертикальных валках сляб один раз пропускают в горизонтальных валках, чтобы наплывы перешли на боковые грани сляба и образовались зауженные концы, затем кантуют на 90° и производят еще несколько пропусков в вертикальных валках, обжимая торцы. Видно, что неравномерное обжатие в этих пропусках способствует заполнению недостающих объемов металла по основным граням.

При оптимальных обжатиях торцов можно получить раскат практически прямоугольной формы. При дополнительной прокатке торцов производительность, конечно, теряется.

15.4.2. Формирование профиля в протяжных и уширительных пропусках

Воспользуемся анализом характера напряженно-деформированного состояния при прокатке широких листов, проведенным в разд. 5.1. По ширине листа деформация неравномерна. Рассмотрим сначала установившийся процесс прокатки, когда за пределами очага деформации имеются большие внешние зоны (“жесткие концы”). Кубик металла, выделенный в точке B в средней по ширине части (рис. 15.11), не может перемещаться в ширину, так как этому препятствуют поперечные силы трения. Весь металл устремляется в вытяжку.

В точке A , расположенной вблизи кромки, металл имеет возможность смещаться как в длину, так и в ширину, поскольку силы трения в поперечном направлении на кромках быстро падают до 0. Но за счет взаимодействия с недеформируемыми внешними (“жесткими”) концами деформация по ширине выравнивается. Металл из прикромочных областей вынужден течь в длину, уширения не происходит. Но в точке A' , расположенной также на кромке, но на расстоянии от конца листа не более длины дуги захвата, с одной стороны “жесткий конец” отсутствует. Металл имеет возможность течь и в длину, и в ширину. В точке B' он по-прежнему течет только в длину. За счет этого концы листа приобретают форму веера и языка. Обычно термином “веер” обозначают эффект расширения конечного участка полосы, а термин “язык” отражает форму торца этого участка. Язык и веер тем более выражены, чем больше пропусков осуществлено в одном направлении и больше суммарная деформация за все пропуски при малой степени деформации в одном пропуске. При прокатке толстых раскатов описываемые

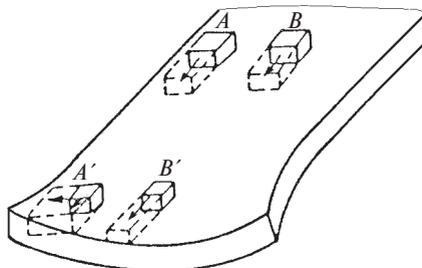


Рис. 15.11. Характер напряженно-деформированного состояния металла в середине и по кромке при прокатке листа

эффекты выражены в большей мере, чем тонких. На тонких раскатах (уже в продольных пропусках) расширение концевых участков (веер) почти не наблюдается, но язык образуется, и его протяженность тем выше, чем больше суммарная деформация в продольных пропусках.

В протяжных пропусках мы сталкиваемся с обоими эффектами. Лист приобретает форму языка и веера, и чем больше суммарная высотная деформация в этих пропусках, тем больше искажается его форма.

Это явление можно использовать для формирования листа в плане. Так как после вертикальных пропусков, точнее, после первого протяжного пропуска концы сляба заужены (см. рис. 15.10), то можно скорректировать их форму в протяжных пропусках, подобрав такое суммарное обжатие в них, при котором сляб приобретает практически прямоугольную форму. В этом случае можно отказаться от обжатия торцов сляба в вертикальных валках. Однако требуемые обжатия в протяжных пропусках обычно оказываются за пределами необходимых по технологии.

Выравниванию геометрии листа в плане способствует также оптимальное соотношение обжатий в протяжных и уширительных пропусках. Обозначим высотную деформацию за все протяжные пропуски λ_{Π} , а за все уширительные пропуски λ_{γ} :

$$\lambda_{\Pi} = h_c/h_{\Pi} \quad \text{и} \quad \lambda_{\gamma} = h_{\Pi}/h_{\gamma},$$

где h_c , h_{Π} и h_{γ} — соответственно высота исходного сляба, раската после протяжных и уширительных пропусков.

Допустим, перед прокаткой в протяжных пропусках сляб имел прямоугольную форму в плане. После протяжных пропусков концы его стали веерообразными и приобрели форму языка. После кантовки при прокатке в уширительных пропусках форма полосы начнет выправляться. Исследования показывают, что при вытяжке в уширительных пропусках λ_{γ} , примерно равной вытяжке λ_{Π} в протяжных пропусках, форма листа в плане после уширительных пропусков приближается к прямоугольной. Условием получения прямоугольной полосы в этом случае считается равенство $\lambda_{\gamma} = \lambda_{\Pi}$.

Таким образом, за счет режима обжатия можно обеспечить почти прямоугольную форму раската в плане после уширительных пропусков, а так как на тонких листах в продольных пропусках форма листа искажается мало, то обрезь на готовом листе будет небольшой. Прокатка должна проводиться по следующей схеме: обжатие боковых граней в вертикальных валках за несколько пропусков — один пропуск в горизонтальных валках — кантовка — обжатие торцов в вертикальных валках — кантовка — протяжные пропуски в горизонтальных валках — кантовка — разбивка ширины в уширительных пропусках с вытяжкой, равной вытяжке в протяжных пропусках, — кантовка — прокатка в продольных пропусках. При такой схеме прокатки существенно уменьшается не только обрезь, но и разброс ширины раскатов в партии, процесс практически полностью стабилизируется. Однако при этом существенно падает производительность.

Кроме того, практически не удастся создать равные вытяжки в протяжных и уширительных пропусках, так как при этом необходимо выбирать очень короткие слябы, и производительность стана также падает. Предпочитают иметь

максимально длинные слябы, насколько позволяет длина бочки валков в уширительных пропусках, при этом прокаткой в протяжных пропусках невозможно компенсировать искажение формы в уширительных пропусках.

15.4.3. Формирование профиля в уширительных и продольных пропусках

В уширительных пропусках еще в большей мере, чем в протяжных, проявляется склонность к образованию веера и языка на концах раската. Если не бороться с ними, то в продольных пропусках они останутся на боковой грани готового листа. При вырезке карточки из готового листа боковая обрезь будет значительной. Концевая обрезь в меньшей мере отражается на общем расходе металла.

Рассмотрим этапы формирования готового листа в плане при прокатке в продольных пропусках тонких листов (рис. 15.12). Заметим, что под термином “тонкий лист” здесь подразумевается толстолистовой прокат на нижних границах диапазона толщин по ГОСТ 5687. Форма проката после уширительных пропусков обозначена цифрой 1. По мере утонения тонкого листа в продольных пропусках концевые участки (торцы) постепенно меняют свою форму за счет неравномерной вытяжки по ширине. При малых обжатиях торцы готового листа остаются вогнутыми (рис. 15.12, 2). При увеличении обжатий они выпрямляются и при больших обжатиях становятся выпуклыми (в виде языка — см. рис. 15.12, 3). Видимо, существует оптимальное соотношение между обжатиями в уширительных и продольных пропусках, при которых торцы становятся прямолинейными. Боковая же поверхность листа при малых толщинах раската по мере утонения листа почти не меняется, эффект веерообразования почти не наблюдается. При вырезке прямоугольной карточки из такого листа боковая обрезь будет значительной, а концевая — небольшой.

Большая боковая обрезь — основной недостаток продольной схемы прокатки по сравнению с остальными. При поперечной схеме прокатки языки и веер образуются по торцам листа и меньше отражаются на суммарной обрезе листа. При удачной прокатке на угол боковая и торцевая обрезь листа должна быть минимальной.

При прокатке более толстых листов в продольных пропусках меняются форма не только торцов, но и боковой поверхности — за счет образования веера (см. рис. 15.11). Обозначим суммарную высотную деформацию в продольных пропусках

$$\lambda_{\text{пр}} = h_y/h_{\text{л}},$$

где $h_{\text{л}}$ — толщина готового листа.

Чем больше $\lambda_{\text{пр}}$, тем больше возможности для образования веера по концам готового листа. При определенном соотношении $\lambda_{\text{пр}}/\lambda_y = A$ можно скомпенсировать зауженные концевые участки листа, образовавшиеся в уширительных пропусках.

При малых отношениях ($\lambda_{\text{пр}}/\lambda_y < A$) основная деформация приходится на ушири-

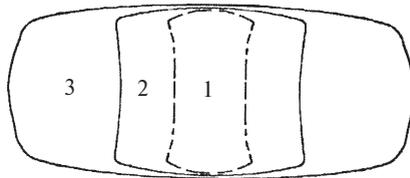


Рис. 15.12. Форма листа в плане на разных стадиях прокатки

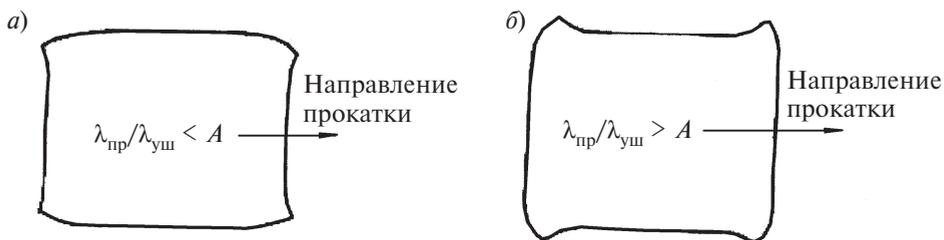


Рис. 15.13. Форма листа при различных режимах деформации

тельные пропуски, готовый лист будет иметь выпуклые кромки и вогнутые торцы (рис.15.13, а). Обрезь по кромкам будет большой, а концевая обрезь — малой. С ростом отношения $\lambda_{пр}/\lambda_{уш}$ боковая обрезь сокращается, но растет концевая обрезь за счет роста концевых язычков. При $\lambda_{пр}/\lambda_{уш} > A$ лист приобретает форму, показанную на рис. 15.13, б. По данным разных заводов (в основном немецких и японских) наименьшая обрезь и наибольшее приближение формы листа к прямоугольной на толстых листах наблюдается при $A = 1,5-1,8$. Чем тоньше и длиннее готовый лист, тем большую долю в общей обрезе занимает обрезь по кромкам, поэтому оптимальное отношение $A = \lambda_{пр}/\lambda_{уш}$ будет сдвигаться в сторону больших значений. Для тонких листов необходимо стремиться к отсутствию боковой обрезки, т. е. к минимальной деформации в уширительных пропусках (или полному их отсутствию). Однако эту рекомендацию в полной мере используют уже не на толстолистовом, а на широкополосном стане. На рис. 15.14 приведены экспериментальные данные величины обрезки по боковым кромкам и по концам в зависимости от отношения $\lambda_{пр}/\lambda_{уш}$ при промышленной прокатке листа размерами 8×1800 мм.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что для получения толстого листа с минимальной обрезью необходимо правильно подбирать размеры исходного сляба и строго дозированно распределять деформацию в вертикальных, протяжных, уширительных и продольных пропусках. На прак-

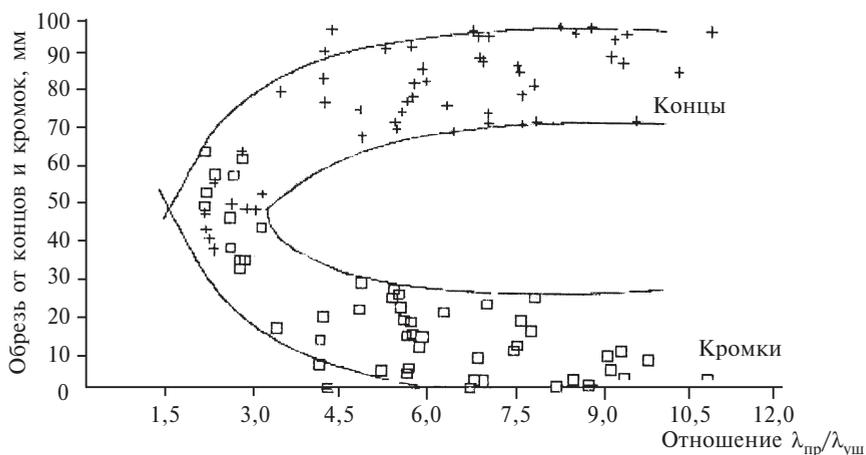


Рис. 15.14. Обрезь листа по кромкам и концам в зависимости от отношения $\lambda_{пр}/\lambda_{уш}$

тике никогда не удастся выполнить все требования, сформулированные выше. Видимо, невозможно решить проблемы формирования геометрии листа в плане только за счет оптимизации режимов обжатия сляба и листа. Необходимо искать более радикальные пути управления геометрической формой листа.

15.5. Пути устранения недостатков продольной схемы прокатки

Присущие продольной схеме прокатки недостатки, связанные с наличием уширительных пропусков, необходимо свести к минимуму. Предложено несколько конструктивных и технологических решений, устраняющих искажение листа в плане.

Прежде всего следует рассмотреть такие решения, в которых уширительные пропуски вообще отсутствуют. В Германии предложен для отливки слябов кристаллизатор переменной ширины, состоящий из двух взаимно перемещающихся половинок (рис. 15.15). Такой кристаллизатор не удалось внедрить в промышленность, так как при переходе от одной ширины на другую некоторый участок непрерывно-литого сляба имеет переменную ширину, и эта часть металла не может быть использована. Частые перестройки кристаллизатора дестабилизируют процесс отливки слябов. Кроме того, по организационным трудностям пока не удается отливать слябы “под заказ”, т. е. для каждого листа индивидуально. Для этого необходимо жесткое планирование производства на участке отливки слябов и на прокатном стане, чего пока нигде нет.

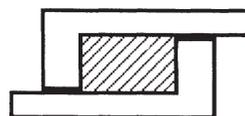


Рис. 15.15. Кристаллизатор переменной ширины

Более перспективна установка перед вертикальной клетью действующего стана одной-двух редуционных клетей (патенты России, ЦНИИЧермет). Отдельно стоящий редуционный стан производительностью 10 млн. т/год по всаду (рис. 15.16), установленный в Японии, предназначен для получения слябов шириной от 950 до 1850 мм из литых слябов размерами 280×1900 мм. Сляб после нагрева в печи и снятия гидросбивом окалины прокатывается в двух вертикальных редуционных и одной горизонтальной клетях, затем разрезается

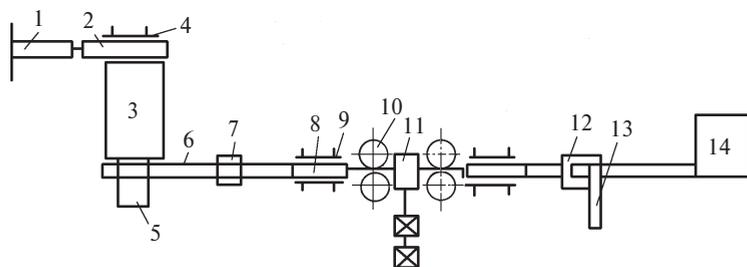


Рис. 15.16. Редуционный стан:

1 — приемный рольганг; 2 — загрузочный рольганг; 3 — методическая печь; 4 — толкатель; 5 — амортизатор; 6 — рольганг; 7 — камера гидросбива окалины; 8 — рабочий рольганг; 9 — манипулятор; 10 — редуционная клетя; 11 — горизонтальная клетя; 12 — ножницы; 13 — механизм уборки обреза; 14 — уборочные карманы

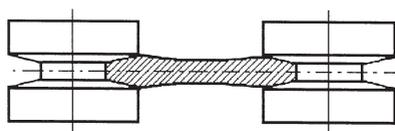


Рис. 15.17. Прокатка сляба в редуционной клетке

на мерные части, которые направляются на основной стан — толстолистовой или широкополосный — или к уборочным карманам.

Редуционная клетка — это клетка с вертикальными валками, имеющими глубокие и тесные калибры. Прокатка в таких калибрах (рис. 15.17) способствует защемлению сляба

стенками калибра, поэтому потеря устойчивости сляба наступает при гораздо больших отношениях b/h , чем на гладкой бочке или в обычных ящичных калибрах. Предельные значения на гладкой бочке $b/h = 1,7$, в ящичном калибре $b/h = 2,0-2,2$, при прокатке в специальных глубоких и тесных калибрах редуционного стана потеря устойчивости наблюдается при $b/h = 7,0-8,0$ и выше.

Кроме того, в таких калибрах деформация легче проникает в глубину очага деформации, поэтому при значениях l/h_{cp} гораздо меньших, чем на обычных высоких очагах, деформация проникает в центральные слои. Наплывы из-за неравномерности деформации значительно меньше выражены, чем, например, при прокатке на слябинге. Редуционные клетки позволяют литые слябы постоянных размеров прокатывать до требуемой ширины, отказавшись от уширительных пропусков.

Ни на одном толстолистовом стане России не установлены редуционные клетки, хотя они хорошо показали себя при полупромышленных испытаниях. Впервые такие клетки установлены не на толстолистовых, а на широкополосных станах (НШПС), где проблема регулирования ширины сляба в широких пределах стоит острее, так как на таких станах (последнего поколения) вообще не применяются уширительные пропуски. В 1980 г. упомянутый выше редуционный стан был установлен на НШПС завода в Оите (Япония).

Можно решить проблемы сокращения боковой обрезки путем установки прессы после черновой клетки кварто. После уширительных пропусков сляб обжимается с боков на прессе (рис. 15.18). При этом устраняются образовавшиеся языки, а на боковых кромках появляются небольшие наплывы. Дальнейшая прокатка сравнительно тонких полос в продольных пропусках осуществляется почти при ровной боковой кромке. Кроме того, по напльвам высотное обжатие немного больше, чем по средней части, поэтому вытяжка кромок больше, чем середины. Это компенсирует недостаток металла в прикромочных областях в языке, поэтому концы листа выравниваются по ширине. При более высоких напльвах вытяжка по кромкам еще больше, и конец листа приобретает форму рыбьего хвоста. При наличии рыбьего хвоста концевая и боковая обрезка листа всегда меньше, чем при наличии языка, особенно при прокатке тонких листов.

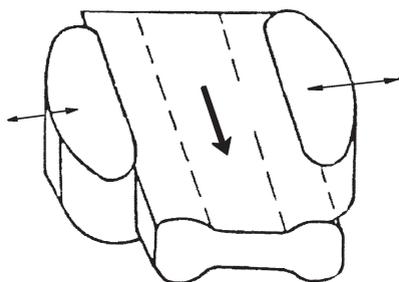


Рис. 15.18. Обжатие боковых кромок сляба на прессе

Схема прокатки с обработкой сляба на прессе после уширительных пропусков не совсем удобна и обеспечивает меньшую производительность, так как содержит дополнительную технологическую операцию, и сама операция осадки осуществляется на неподвижной полосе.

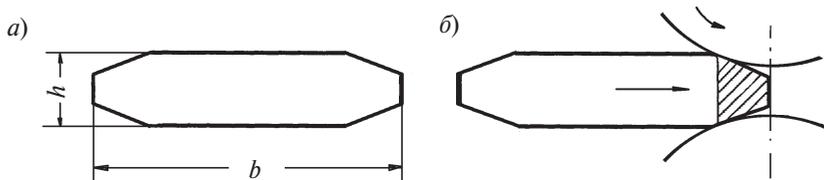


Рис. 15.19. Форма поперечного сечения сляба (а) и его прокатка в уширительных пропусках (б)

Оригинальное решение предложено на стане 2800 Коммунарского металлургического завода (КМЗ). Отливаемый сляб имеет скосы по боковым кромкам (рис. 15.19, а). В уширительных пропусках сляб подается в валки заостренным концом, часть которого проходит через валки без обжатия (рис. 15.19, б). Эта часть сляба играет роль “жесткого конца”, т. е. внеконтактной зоны, которая выравнивает деформацию металла по ширине. В данном случае отсутствуют концевые участки *A'* и *B'* (см. рис. 15.11), и языки не образуются.

На стане 3600 завода “Азовсталь” проблемы формы раската после уширительных пропусков решают в вертикальной клети. Такое же решение реализовано на стане 2800 ОХМК. В вертикальной клети сляб обжимается с переменным обжатием по длине, приобретая х-образную форму в плане (рис. 15.20). Очевидно, выемки в средней части сляба должны быть рассчитаны так, чтобы скомпенсировать языки в уширительных пропусках. Помимо электромеханического нажимного устройства, с помощью которого устанавливается положение вертикальных валков до прокатки, стан должен иметь мощное гидравлическое нажимное устройство, позволяющее изменять расстояние между валками в процессе прокатки. Кроме того, управляющая ЭВМ должна рассчитать требуемый профиль сляба и реализовать его в вертикальной клети в автоматическом режиме управления. Не каждый толстолистовой стан имеет такие технологические возможности.

На последних толстолистовых станах Японии с валками 4000–5000 мм, а также на некоторых станах Германии установлены мощные гидронажимные устройства на черновой клети. С их помощью по соответствующей программе, разработанной для каждого типа листа, в последнем уширительном пропуске осуществляется прокатка с переменным обжатием. Получается полоса переменной высоты по ширине будущего листа (рис. 15.21, а). После кантовки и прокатки в продольных пропусках (рис. 15.21, б) боковые кромки полосы получают дополнительное обжатие, и вместо языка на концах листа получается рыбий хвост.

Схема такого процесса названа MAS-прокаткой. На рис. 15.22 приведены формы конца полосы по обычной технологии (языки) и с применением MAS-прокатки (рыбий хвост). Концевая обрезь на листах, прокатанных по MAS-технологии,

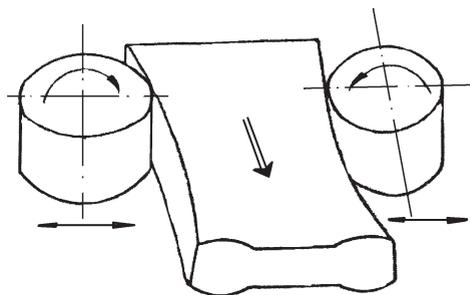


Рис. 15.20. Переменное обжатие сляба в вертикальной клети

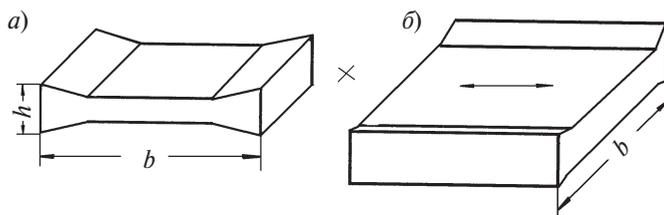


Рис. 15.21. Схема MAS-прокатки:
a — в последнем уширительном пропуске;
б — перед продольными пропусками

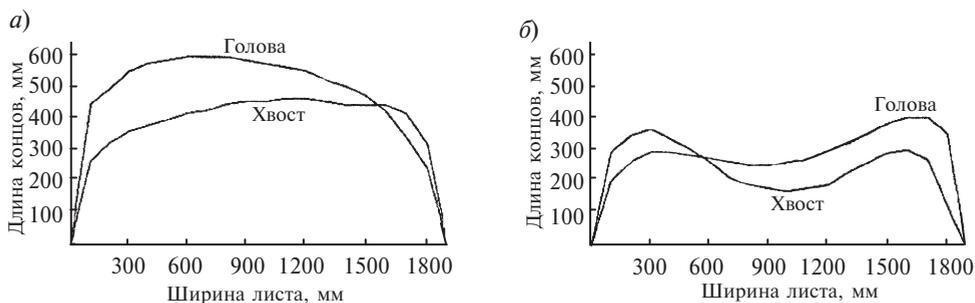


Рис. 15.22. Форма концов полосы после обычной прокатки (*a*) и после MAS-прокатки (*б*)

значительно ниже, чем по обычной технологии. Также значительно сокращается боковая обрезь.

Особенно эффективно применение данного способа управления формой раската на станах, не имеющих вертикальных валков, например на стане 3000 завода им. Ильича (Украина), на стане 3200 в Ильзенбурге (Германия) и др. Можно рекомендовать его для стана 5000 ОАО “Северсталь”. Такие станы должны быть оснащены мощными гидравлическими нажимными устройствами, управляемыми от ЭВМ в автоматическом режиме по расчетной программе.

Схемы MAS-прокатки весьма разнообразны (рис. 15.23). Изменяя обжатия в процессе прокатки в протяжных или уширительных пропусках, можно получать листы различной геометрии в плане по требованию заказчика. Это может дать большую экономию металла у потребителя при изготовлении конкретных деталей.

У нас в стране идеи MAS-прокатки прошли опробование на стане 1500 Ашинского металлургического завода задолго до появления в Японии патента на этот способ прокатки. Здесь впервые реализованы схемы прокатки (рис. 15.24), направленные на получение формы листа, приближенной к прямоугольной.

В этой связи необходимо подробнее рассмотреть структуру потерь металла при прокатке толстого листа. На рис. 15.25 приведена структура потерь до и после внедрения технологии MAS-прокатки на толстолистовом стане в г. Мицусима (Япония). Видно, что значительную долю в общих потерях составляет обрезь по концам и кромкам листа, если не бороться с этими потерями. Они значительно сокращаются при использовании MAS-прокатки. На японских заводах общие потери доведены до 7–10 %.

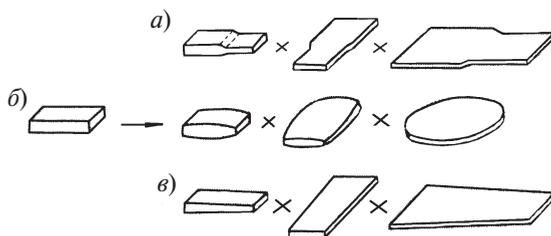


Рис. 15.23. Схемы MAS-прокатки для получения листов разной конфигурации в плане

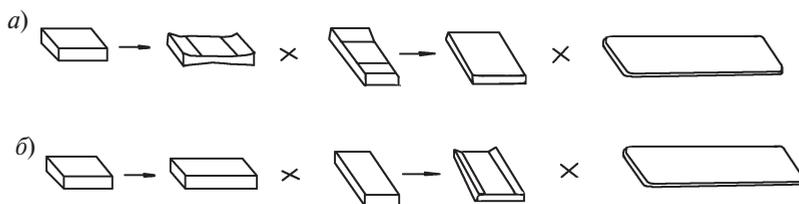


Рис. 15.24. Схемы прокатки листа на Ашинском металлургическом заводе

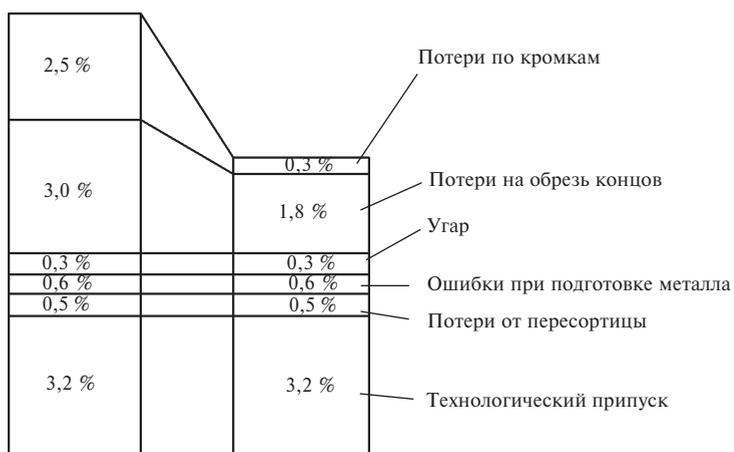


Рис. 15.25. Структура потерь металла до (слева) и после (справа) внедрения MAS-прокатки на заводе в г. Мицусима

На отечественных заводах эти потери значительно выше и суммарно могут достигать 15–22 %. Они выше по всем составляющим. Неоправданно велики у нас потери на угар металла в нагревательных печах. Значительно выше также потери от пересортицы, при подготовке металла к сдаче (отбраковка, зачистка и пр.). Значительную долю на наших и на зарубежных заводах составляют технологические потери, т. е. потери, запланированные технологией производства листа. В технологические потери входят потери на отрезку проб для последующих механических испытаний, которые вряд ли можно уменьшить. Кроме них большую долю составляют потери на обрезку кромок в связи с его неровностью по высоте и в связи с образованием боковых наплывов (рис. 15.26, *а*). В уширительных пропусках также центральные слои прорабатываются слабо, поэтому здесь наплывы образуются в направлении прокатки. После разворота они оказываются на боковых кромках и при дальнейшей прокатке в продольных пропусках закрываются (рис. 15.26, *б*). ГОСТом предусмотрена дополнительная боковая обрезка до 160 мм, чтобы удалить эти участки. Чем толще

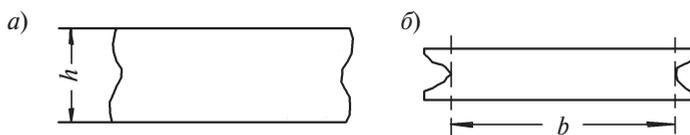


Рис. 15.26. Форма сляба до (*а*) и после (*б*) прокатки

исходный сляб и шире конечный лист, тем больше наплывы и больше технологические потери. Увеличивая степень проработки центральных слоев металла в уширительных пропусках, можно улучшить конфигурацию боковой кромки и уменьшить рассматриваемую долю технологической обрезки.

Гораздо большая часть технологических потерь связана с организацией производства. Особенно велики они при прокатке листов с точно заданными размерами: высотой, длиной и шириной. Из-за нестабильности производства возможны большие отклонения фактических размеров от запланированных. При жестких допусках на размеры технолог должен задавать в производство значительно большее количество металла, чем требуется: лучше заложить лишнюю обрезь, чем не выполнить заказ по размерам. Эта часть потерь полностью зависит от организации и культуры производства и на российских заводах очень велика. Сократить организационные потери можно во много раз.

В целом отметим, что на отечественных заводах пока недостаточное внимание уделяют уменьшению потерь и улучшению их структуры, а в связи с этим — проблемам улучшения геометрии листа.

15.6. Термическая и термомеханическая обработка листа

Более важной и первоочередной считается задача улучшения качества толстолистового металла за счет правильного выбора температурного режима прокатки, термической и термомеханической обработки листа в технологическом потоке стана.

Исследования показывают (проведены на стане 2800 ЧерМК), что из-за неправильного выбора параметров термической обработки до 40 % толстых листов по первым испытаниям не удовлетворяют требованиям стандартов.

Температура конца прокатки для среднеуглеродистых сталей должна быть в диапазоне от A_{c3} до $(A_{c3} + 50)$. Более высокие температуры способствуют росту зерна, поэтому вязкие характеристики металла снижаются. При температурах конца прокатки ниже A_{c3} (в межфазной области) свойства также снижаются. Из аустенита выделяется феррит, а оставшийся аустенит обогащается углеродом вплоть до эвтектоидного состава (при температуре A_{c1}). При деформации в межфазной области зерна феррита и аустенита деформируются с разной интенсивностью. При охлаждении после деформации и при образовании из оставшегося аустенита перлита появляется пестрая структура металла, в которой за счет взаимодействия между зернами феррита и перлита появляются дополнительные напряжения, снижающие общие механические свойства.

Для низколегированных малоуглеродистых (менее 0,1 % С), так называемых малоперлитных, сталей полезны температуры конца прокатки в межфазной области. При выделении феррита из аустенита ниже A_{c3} в таких сталях оставшийся аустенит представляет собой обедненный углеродом эвтектоид (псевдоэвтектоид), который при $\gamma \rightarrow \alpha$ -переходе распадается на феррит и цементит в виде пластин, которые за счет деформации располагаются внутри ферритных зерен. Под действием пластической деформации этот процесс протекает быстрее и при более высокой температуре. Появляется возможность управлять формой, размерами и расположением цементитных выделений. Деформация в межфазной области способствует также измельчению и упрочнению ферритных зерен. Кроме того, при деформации в этом температурном интервале интенсивно выделяются частицы карбонитридов ванадия и ниобия, которые дополнительно размельчают и упрочняют ферритные зерна. Промышленные исследования показали, что снижение температуры конца прокатки с 1000 до 800 °С увеличивает предел текучести низколегированной стали 09Г2ФБТ на 110–130 Н/мм².

Большое значение имеет скорость охлаждения после прокатки. При ее увеличении и уменьшении температуры изотермической выдержки ниже температуры A_{c1} подавляются диффузионные процессы, поэтому уменьшается и затем полностью исчезает количество избыточного феррита. С увеличением переохлаждения аустенита получается более обедненный углеродом псевдоэвтектоид. Последний представляет собой смесь цементита и обогащенного углеродом феррита, располагающегося между цементитными пластинами. Чем ниже температура переохлаждения псевдоэвтектоида, тем мельче пластинки цементита и меньше расстояние между ними, поэтому выше прочность и пластичность готового металла. Таким образом, варьируя скоростью охлаждения и температурой изотермической выдержки в рассматриваемой области (в области так называемых перлитных структур), можно получать различную конечную структуру металла и его механические свойства. На кинетику фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения большое влияние оказывают легирующие элементы.

При переохлаждении аустенита ниже перлитных температур (520–490 °С) псевдоэвтектоид уже не образуется, из такого аустенита образуется бейнит, представляющий собой феррит с избыточным содержанием углерода, который сильно искажает решетку α -фазы и повышает ее прочность, снижая пла-

стичность. При более низких температурах переохлаждения и высоких скоростях охлаждения превращение $\gamma \rightarrow \alpha$ осуществляется по мартенситному механизму без изменения концентрации аустенита, с наследованием его структуры и с сильным искажением решетки α -фазы.

Для формирования окончательных свойств толстого листа на толстолистовых станах в технологическом потоке, а также на отдельно стоящих термических агрегатах применяют все виды перечисленных превращений и осуществляют все виды термической обработки — отжиг, нормализацию, ускоренное охлаждение, закалку и отпуск — с большим разнообразием графиков нагрева, выдержки и охлаждения металла. Но при производстве многих видов толстого листа наиболее высокие эксплуатационные свойства достигаются при термомеханической (ТМО) и контролируемой прокатке (КП), которые ставят своей задачей разработку режимов нагрева, дозированной деформации и точного графика охлаждения после прокатки в целях получения требуемой структуры и свойств металла. Наиболее перспективны такие режимы на низколегированных малоуглеродистых сталях типа 09Г2, 08Г2ФБ, 09Г2СФ, 17Г1СУ, 10 ХСНД и др. Одно из главных требований к листам, прокатываемым из таких сталей, — высокая ударная вязкость при низких температурах (-40 , -60 °С и ниже). Стали с микродобавками V и Nb реализуют свои оптимальные свойства только после контролируемой прокатки.

Существует несколько разновидностей ТМО низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Для толстого листа распространена термическая обработка, при которой лист после горячей деформации закаливается и затем отпускается с получением ферритно-перлитных или бейнитных структур. Наилучший результат достигается в том случае, когда закалка осуществляется от температуры, лежащей в интервале двухфазной ($\alpha + \gamma$) области, так как при этих температурах аустенит имеет мелкозернистую развитую полигональную структуру, которую полностью наследует мартенсит. Для закалки с прокатного нагрева широкое распространение получили роликоткалочные машины.

После прокатки в ($\alpha + \gamma$) области часто вместо закалки применяют другие способы охлаждения металла. В зависимости от времени выдержки, температуры конца прокатки и скорости последующего охлаждения получают различные структуры и свойства готового листа. При малых скоростях охлаждения получают *полигональный феррит* с мелкими вытянутыми зёрнами, при более высоких скоростях — *игльчатый феррит* с зёрнами неправильной формы с развитой субструктурой и плоскими границами, размер которых зависит от зёрен первоначально образующегося феррита. При тех же скоростях охлаждения, но более низких температурах деформации образуется верхний бейнит, размер зёрен которого и плотность дислокационной структуры определяются размером зёрен исходного аустенита, а не феррита, как в предыдущем случае. Основная задача при охлаждении состоит в том, чтобы, во-первых, обеспечить требуемую скорость охлаждения металла во всех точках по плоскости и высоте листа, во-вторых, избежать коробления полосы из-за неравномерного ее охлаждения. Соответственно установка контролируемого охлаждения (УКО) должна содержать компьютер, рассчитывающий требуемый режим охлаждения в каждой точке листа. Кроме того, она должна быть оборудована системами, обеспечивающими и контролирующими равномерность охлажде-

ния полосы по всей площади. Обычно перед установкой лист должен пройти правку. Донниичермет разработал совмещенный процесс правки и контролируемого или ускоренного охлаждения листа. Правильно-охлаждающая машина снабжена системой подачи воды на полосу между правящими роликами. Система работает от ЭВМ, рассчитывающей режим подачи воды, скорость движения полосы и другие параметры.

Легко реализуема в потоке стана ВТМО, заключающаяся в горячей деформации аустенита с последующим быстрым охлаждением до температур фазового превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ с последующей деформацией при этих температурах. Происходит перекристаллизация металла за счет зарождения и роста новых зерен. При этом зерно резко размельчается, происходит полигонизация структуры образующегося мелкозернистого вытянутого феррита. Равномерно распределенные в нем мелкие сферические или мелкопластинчатые частицы цементита обеспечивают высокие прочностные и не снижают пластические свойства листа. Пластическая деформация при этих температурах приводит, во-первых, к дополнительному измельчению зерна, во-вторых, к размещению цементитных частиц внутри ферритных зерен, в-третьих, к образованию новых дефектных структур, способствуя распаду аустенита. Чем ниже температура деформации в $(\alpha + \gamma)$ области и выше степень деформации, тем большая доля феррита оказывается в наклепанном состоянии, и зерна феррита становятся мелкими и полигонизованными, что способствует увеличению его прочности. При наличии в стали микролегирующих добавок V и Nb (в сотых долях процента) происходит их растворение при высоких температурах, что замедляет процессы, связанные с диффузией, — рост зерна, рекристаллизацию и процесс $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. При снижении температуры прокатки происходит обильное выделение мелкодисперсных карбонитридов этих элементов, которые, с одной стороны, препятствуют росту зерен феррита и способствуют еще большему их измельчению, и, с другой стороны, упрочняют феррит.

При контролируемой прокатке, которую некоторые авторы причисляют к разновидностям ВТМО, должны строго выдерживаться режим и температура нагрева металла под прокатку, температура прокатки и режим обжатия в черновой клетке, время подстуживания раската перед чистовой клетью, частные и суммарное обжатия в чистовой клетке, температура конца прокатки, режим охлаждения листа после прокатки. Оптимальные свойства листа, т. е. высокая прочность при высокой пластичности металла и высокой вязкости при низких температурах, достигаются при определенных для каждой марки стали значениях перечисленных технологических параметров. Формирование таких свойств осуществляется от одновременного действия следующих основных механизмов: измельчение зерна феррита, вносящего в общий вклад долю 35–45 %; полигонизация структуры (примерная доля 25–35 %) и дисперсионное упрочнение карбонитридами ванадия, титана и ниобия (20–25 %).

Следует отметить, что механизм упрочнения феррита с помощью карбонитридов различен в зависимости от вида микролегирующих добавок. Титан растворяется в аустените при высоких температурах, поэтому применяется для сталей, нагреваемых до максимально возможных температур (1200–1250 °С). Нитриды титана стабильны при высоких температурах и позволяют контролировать размер зерна аустенита. При последующем охлаждении в процессе прокат-

ки карбиды титана выделяются при высоких температурах и упрочняют аустенит. Деформация упрочненного и мелкозернистого аустенита и его последующий распад обеспечивают получение упрочненных мелких зерен феррита.

Ванадий растворяется в аустените при более низких температурах (около 1150 °С), следовательно, допускает более низкий нагрев под прокатку. Он практически не формирует выделений в аустените. Выделение карбонитридов ванадия происходит в основном в процессе и после фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Часть частиц выделяется непосредственно в феррит, способствуя его измельчению и упрочнению. Деформация ускоряет его выделение.

Как микролегирующий элемент для измельчения зерна наиболее эффективен ниобий, карбонитриды которого обеспечивают максимальное торможение рекристаллизации аустенита. Мелкодисперсные частицы карбонитридов ниобия, обильно выпадающие при пластической деформации при температурах фазового перехода $\gamma \rightarrow \alpha$, измельчают зерно по механизму торможения рекристаллизации. При наличии ниобия в количестве 0,03 % сталь вообще не рекристаллизуется при температурах ниже 950 °С. Карбонитриды продолжают выпадать также при охлаждении после прокатки и упрочняют феррит по механизму дисперсионного твердения. Это дает возможность наиболее эффективно измельчать и упрочнять феррит в процессе деформации в $(\gamma + \alpha)$ области и при последующем охлаждении. При совместном легировании металла ванадием и ниобием расширяются возможности каждого из механизмов измельчения и упрочнения металла, расширяется диапазон температур, при которых выделяются упрочняющие частицы.

Таким образом, в зависимости от легирующих добавок для каждой марки стали выбираются температура нагрева под прокатку, температурный и деформационный режим прокатки и режим охлаждения металла после деформации, или в совокупности — режим контролируемой прокатки. Например, исследования, проведенные на стане 3600 “Азовстали” при прокатке листов толщиной от 12 до 32 мм из сталей марок 08Г2СФБ и 09Г2ФБ, применяемых для производства электросварных хладостойких газопроводных труб диаметром 1420 мм, показали, что существует определенный интервал значений перечисленных параметров для получения одного из главных технологических свойств толстого листа — высокой ударной вязкости металла при температурах -40 и -60 °С. С повышением температуры нагрева металла под прокатку до 1250 °С ударная вязкость снижается, снижается также доля вязкой составляющей при испытании падающим грузом (ИПГ, или по иностранным нормативам — DWTT) при температурах ниже -15 °С (испытание осуществляется путем разрушения стандартного образца падающим грузом и визуальной оценки доли вязкой составляющей в изломе). При высоких температурах нагрева быстро растет зерно аустенита, и после прокатки в готовом листе может наблюдаться структура верхнего бейнита, возможны участки с остаточным аустенитом. При высоком нагреве уменьшается плотность дислокаций, больше растворяются высокодисперсные карбонитриды ванадия и ниобия, которые в свободном (нерастворенном) виде необходимы при чистовой прокатке как центры зарождения новых зерен феррита. При снижении температуры нагрева под прокатку до 1150 °С увеличивается ударная вязкость металла на 0,3–0,8 Дж/м², также увеличивается доля вязкой составляющей в изломе при ИПГ. При этом хрупкое разрушение металла при низких температурах происходит не столь

лавинообразно, как при прокатке от высоких температур. Зерна аустенита при нагреве и прокатке от этих температур имеют вытянутую ладьеобразную форму, внутри зерен формируются полосы деформации с высокой плотностью дислокаций. Высокая энергия внутривитеренных структур при остывании способствует зарождению мелкозернистых зерен феррита.

Более низкий нагрев под прокатку (ниже 1150 °С) также нежелателен, так как приводит к недостаточному растворению в аустените карбонитридов ванадия и ниобия. При дальнейшей прокатке и охлаждении металла из раствора выпадает меньшее количество высокодисперсных частиц, которые необходимы для упрочнения зерен феррита при $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении.

Важнейшими параметрами контролируемой прокатки являются степень деформации и температура прокатки в каждом пропуске. Прокатку обычно ведут в два этапа. До толщин, равных примерно двум-трем толщинам готового листа, проводится первая прокатка по обычным режимам, аустенит деформируется при температурах нагрева. Затем лист подстуживают на отводящем рольганге или на специализированной площадке, оборудованной установкой для ускорения охлаждения. Вторая (чистовая) прокатка проводится при температурах ниже начала фазового перехода. Эта температура, строго говоря, должна вычисляться отдельно для каждой марки и даже плавки металла. Например, для листа 16,8×2195 мм из стали 09Г2ФБ температура конца прокатки лежит в интервале 700–750 °С. Чем ниже температура подстуживания в интервале фазовых превращений и выше суммарная степень деформации при этой температуре (т. е. в чистовых пропусках), тем выше свойства листа. Низкотемпературная прокатка даже при небольших единичных обжатиях способствует увеличению ударной вязкости при низких температурах и позволяет увеличить долю вязкой составляющей при ИПГ при –60 °С от 0 до 100 %. При этом уменьшается также размер зерна (до балла 9–11). В структуре стали наблюдаются хорошо развитые мелкие субзерна, разделенные малоугловыми границами. Дислокационная сетка внутри зерен имеет правильную форму.

На многих толстолистовых станах температура и режим деформации при второй прокатке сдерживаются возможностями оборудования. Станы 3600 и 5000, описанные выше, специально проектировались под контролируемую прокатку. На стане 5000 прокатана в режиме ТМО партия листа из стали 10ГБ для толстостенных труб подводного трубопровода. Термомеханическая прокатка проводится на стане 2800 ОХМК для производства хладостойких труб из стали 10Г2СФБ. Успешное промышленное опробование режимов контролируемой прокатки проведено также на непрерывных широкополосных станах: на стане 2000 ОАО “Северсталь” (стали 12ГСБ и 12Г2СБ) и на стане 2000 НЛМК на сталях 08ГБЮ и 09ГБЮ, предназначенных для труб северного исполнения диаметром 530 мм с толщиной стенки 5–12 мм. При проектировании режимов контролируемой прокатки широко используют компьютерные модели нагрева сляба, температурно-деформационных параметров, управления прокаткой сразу нескольких слябов на разных стадиях их обработки. Разрабатываются также модели рекристаллизации аустенита и выделения карбонитридных фаз, модели фазовых переходов, модели типа структура—свойства.

Следует заметить, что с увеличением толщины листа резко возрастают трудности получения требуемых свойств листа. Например, при производстве листа по оптимальной технологии для толстостенных труб зона температур,

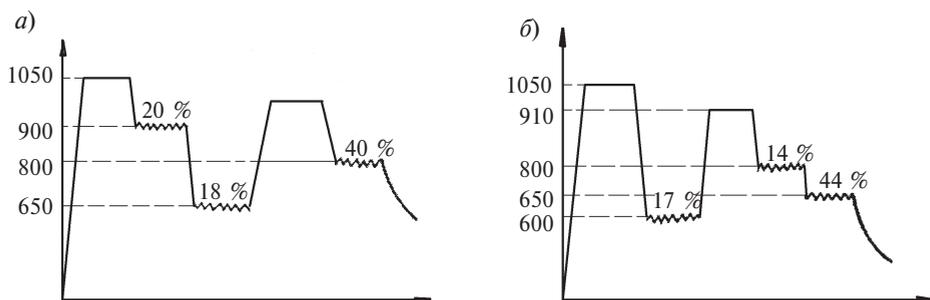


Рис. 15.27. Режимы контролируемой прокатки

при которых наблюдается 100 % вязкой составляющей на образцах DWTT, резко возрастает от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ при толщинах 5–10 мм до $-10\dots-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при толщинах 35–40 мм. В связи с этим указанные выше модели должны строиться для каждой марки стали, каждого размера листа с учетом всех особенностей его производства, начиная от выплавки металла.

Разновидностью контролируемой прокатки является способ упрочнения проката в потоке стана с промежуточной перекристаллизацией металла после черновой клетки, запатентованный японской фирмой “Сумитомо Кинзуки Коге”. Вначале проводится обычная прокатка в области аустенита, затем следует глубокое подстуживание и вновь подогрев до межкритических температур, затем вторая прокатка при этих температурах и охлаждение на воздухе. Дополнительное измельчение зерна достигается за счет двойной фазовой перекристаллизации при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращениях.

Та же идея может быть использована при построении более сложных режимов контролируемой прокатки. Например, для мало- и среднеуглеродистых сталей разработаны режимы, приведенные на рис. 15.27. По первой схеме (см. рис. 15.27, а) металл нагревается до $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдерживается до полной аустенизации, после чего следует охлаждение до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ и черновая прокатка. Затем лист охлаждается до $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и осуществляется вторая прокатка, после чего металл повторно аустенизируется и еще раз подстуживается. Окончательная прокатка ведется при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего металл охлаждается на воздухе. На рисунке указана суммарная степень деформации при каждой прокатке.

Этот режим, а также приведенные выше режимы ВТМО имеют один общий существенный недостаток: лист после прокатки может иметь полосчатую структуру, когда отдельные фазы располагаются слоями, вытянутыми в направлении прокатки. Между этими слоями возможны остаточные напряжения, что снижает пластичность металла при штамповке деталей. При штамповке возможна также фестонистость, т. е. разная вытяжка в разных направлениях.

Чтобы устранить полосчатость структуры листа, после прокатки применяют глубокое переохлаждение металла с последующим отжигом. Например, Донничермет предложил режим термообработки (см. рис. 15.27, б), по которому после нагрева предусматривается глубокое охлаждение и высокая степень деформации за один проход при температуре $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем следует кратковременная аустенизация при $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ и прокатка сначала при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем окончательно при температуре $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Суммарная степень деформации

во всех проходах 75 %. Реализация этих схем требует не только мощного оборудования стана, но и наличия соответствующих печей в линии прокатного стана, которых на действующих отечественных станах не хватает.

Дополнительное измельчение зерна за счет перекристаллизации достигается при термоциклической обработке листа. При этом металл несколько раз переходит границу фазового перехода за счет нагрева и последующего охлаждения. Практически удобна такая схема обработки, когда после прокатки в аустенитной области лист кратковременно замачивается в баке с водой, в котором температура поверхностных слоев опускается значительно ниже температуры фазового перехода, затем вылеживается на рольганге до выравнивания температуры по высоте. При этом поверхностные слои переходят температуру фазового перехода вверх, после чего следует вторая замочка листа в баке и очередное вылеживание на рольганге. На толстых листах температуры металла хватает на три-четыре таких термоцикла, за счет чего зерно феррита в поверхностных слоях листа значительно размельчается. На рис. 15.28 представле-

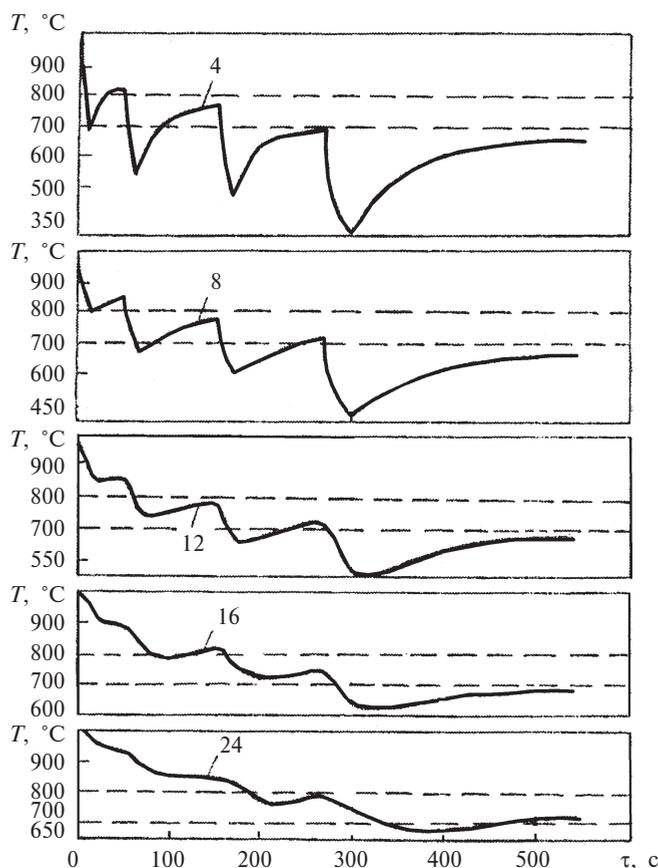


Рис. 15.28. Изменение температуры по слоям листа толщиной 48 мм при термоциклировании (числа на графиках соответствуют глубине слоя от поверхности)

ны полученные расчетным путем графики изменения температуры по высоте листа толщиной 48 мм при такой термоциклической обработке (на графике указана глубина слоя от поверхности листа). Видно, что наиболее глубокие циклы соответствуют поверхностным слоям, тогда как внутренние слои остывают практически монотонно. При такой обработке свойства листа по высоте будут различными. Но даже поверхностное увеличение свойств имеет большое значение для формирования окончательных эксплуатационных характеристик листа.

Еще более высокие свойства не только поверхностных, но и срединных слоев листа могут быть достигнуты при совмещении термоциклирования со значительной суммарной деформацией металла перед очередной замочкой в баке. Тепло от пластической деформации также используется для термоциклирования, а сама деформация необходима для дополнительного измельчения зерна. При этом достигается эффект контролируемой прокатки, при которой для измельчения зерна используется сразу несколько механизмов.

В целом производство толстого листа следует рассматривать как совокупность чередующихся операций деформации и термической или термомеханической обработки на всех стадиях, начиная от нагрева под прокатку, кончая операциями правки и охлаждения металла. После рассмотренных выше термомеханических видов обработки процесс формирования свойств металла продолжается при последующей правке и термообработке металла. На рис. 15.29 приведена обобщенная схема проведения ВТМО и НТМО при производстве толстого листа.

Как видно, в процесс формирования свойств металла вовлечены также операции горячей и холодной правки, на которых осуществляется также дозированная деформация металла за счет знакопеременного изгиба. В зависимости от толщины листа и марки стали состав и порядок операций меняется, а режимы конкретизируются.

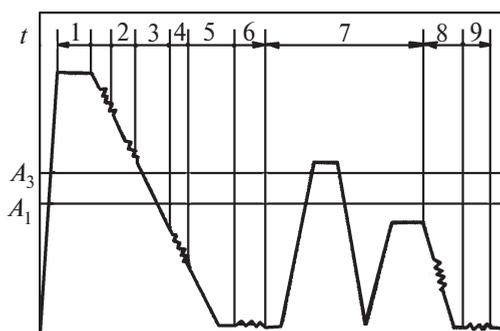


Рис. 15.29. Обобщенная схема термомеханических процессов при производстве толстого листа:

1 — нагрев металла; 2 — горячая и низкотемпературная прокатка; 3, 5 — охлаждение, 4 — горячая правка; 6 — холодная правка; 7 — термообработка; 8 — охлаждение и горячая правка; 9 — холодная правка

Следует заметить, что к настоящему времени нет достаточного опыта промышленного применения как термоциклирования, так и контролируемой прокатки с использованием термоциклирования. Но лабораторные исследования показывают высокую эффективность этих видов термической и термомеханической обработки. Основным препятствием для их промышленного внедрения является отсутствие необходимого оборудования и падение производительности при производстве листа.

15.7. Особенности расчета режима обжатия на толстолистовом стане

Скоростной режим прокатки на толстолистовом стане, как на любом реверсивном стане, включая блюминг, характеризуется треугольной или трапециoidalной диаграммой (рис. 15.30). В общем случае здесь присутствует пять участков, как на блюминге. Задача полосы в валки производится во время разгона двигателя, а выброс — на участке его замедления. Соответственно по методике расчета на блюминге вычисляются моменты на валу двигателя на каждом из участков и осуществляется проверка режима прокатки по отключающему и эквивалентному моментам. Аналогичным образом варьируются максимальная скорость прокатки n_{\max} в диапазоне паспортных скоростей n_1 и n_2 .

Однако в методике расчета режима обжатия на толстолистовом стане есть существенные отличия, связанные с особенностями технологии прокатки листа.

1. На толстолистовом стане в общем случае существуют четыре группы пропусков — вертикальные, протяжные, уширительные (или поперечные) и продольные. В каждой из них решаются свои задачи, поэтому каждую группу необходимо рассчитывать отдельно по разным критериям. Конечно, предварительно необходимо назначить или рассчитать пограничные толщины раската, разделяющие группы.

2. В вертикальной клети число пропусков нечетно. Число пропусков в протяжных и уширительных пропусках желательно иметь четным, так как формоизменение переднего и заднего концов раската зависит от направления прокатки. Но количество пропусков в каждой группе определяется, прежде всего, необходимостью заканчивать прокатку в каждой клети на задней стороне клети. Суммарное количество протяжных, уширительных и продольных пропусков должно быть четным, поскольку они выполняются в двух клетях, а в каждой клети количество пропусков нечетное. Таким образом, необходимо правильно разметить, какие пропуски будут осуществляться в черновой и чистовой горизонтальных клетях. Протяжные пропуски всегда приходятся на черновую клеть. Чаще всего в этой же клети проходят уширительные пропуски. Продольные пропуски, как правило, проводятся в чистовой клети. Однако часть этих пропусков может быть выполнена в черновой клети.

3. Отношение коэффициентов вытяжки в протяжных пропусках к вытяжке в ушири-

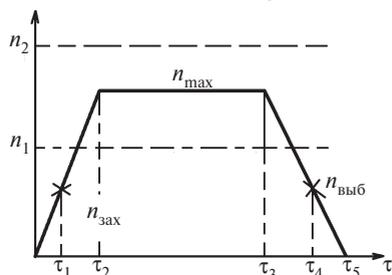


Рис. 15.30. Диаграмма скоростей в горизонтальных клетях толстолистового стана

тельных пропусках должно быть близким к 1. С другой стороны, отношение вытяжки в продольных пропусках к вытяжке в уширительных пропусках должно быть в пределах 1,5–1,9. Этого можно добиться подбором размеров сляба. Однако эти требования не всегда выполнимы, поэтому не строго обязательны. Невыполнение их приведет к ухудшению геометрии листа в плане.

4. Расчет режимов обжатия на толстолистовом стане производят для каждой группы пропусков отдельно. Число протяжных пропусков $n_{\text{п}}$ задается, а обжатия в них назначаются близкими к максимально возможному значению по традиционным ограничениям: максимальному углу захвата (не более 20°), максимальному усилию (записанному в паспорте стана) и отключающему моменту.

Число уширительных пропусков $n_{\text{у}}$ определяется необходимостью получения раската заданной ширины. Поэтому первоначально с максимальными обжатиями набирают количество пропусков, следя за шириной полосы (в уширительных пропусках это длина раската). По такой методике во всех уширительных пропусках, кроме последнего, обжатия будут максимальными. В последнем пропуске толщина $h_{\text{у}}$ определяется необходимостью получения требуемой длины раската. Последнее обжатие может быть значительно меньше максимально возможного, поэтому можно выравнивать обжатия по всем уширительным пропускам, не изменяя толщину $h_{\text{у}}$ и количество уширительных пропусков $n_{\text{у}}$.

Число продольных пропусков $n_{\text{пр}}$ определяется заданным суммарным обжатием ($h_{\text{у}} - h_{\text{д}}$). Выбирать обжатия в этих пропусках можно по той же методике, что и для уширительных. Необходимо отметить также, что общее число пропусков ($n_{\text{п}} + n_{\text{у}} + n_{\text{пр}}$) должно быть четным или нечетным с учетом замечаний в п. 2.

5. Если на блюминге основным фактором, ограничивающим обжатие за пропуск, был максимальный угол захвата, то на толстолистовом стане он редко выходит на передний план. Более значимыми ограничениями являются максимально допустимая сила прокатки $[P]$ или отключающий момент $M_{\text{отк}} = kM_{\text{ном}}$. Тем не менее удобно вычислять первоначально допустимое обжатие по углу захвата, положив его равным $[\alpha] = 18-20^\circ$:

$$\Delta h_{\text{max}} = D(1 - \cos[\alpha]).$$

После расчета силы прокатки и моментов производится корректировка обжатия.

Как видно, расчет режима обжатия на толстолистовом стане сложнее, чем на блюминге, поэтому легче осуществлять его на ЭВМ по соответствующей программе и лучше всего в диалоговом режиме.

6. Расчет режима обжатия на толстолистовом стане, как и на других станах, является оптимизационным процессом. Это значит, что рассчитанный режим должен удовлетворять максимуму или минимуму какого-то критерия. В качестве критерия может выступать производительность стана, свойства металла, расход энергии и др. Дополнительным требованием является равенство временной загрузки черновой и чистовой горизонтальных клетей, которое сводится к следующему критерию:

$$\left[\sum_{n_1} (t_{i \text{ маш}} + t_{i \text{ всп}}) - \sum_{n_2} (t_{i \text{ маш}} + t_{i \text{ всп}}) \right]^2 \rightarrow \min,$$

где n_1, n_2 — число пропусков в черновой и чистовой клетях.

Суммирование машинного и вспомогательного времени осуществляется по всем соответствующим пропускам.

Очень важным для толстолистовой прокатки является критерий расхода энергзатрат на прокатку.

15.8. Поперечная и продольная разнотолщинность листа

Введем понятие разнотолщинности листа. Оно распространяется на все виды листовой продукции — толстый, тонкий горячекатаный и холоднокатаный лист. Если по ширине или длине листа фактическая толщина в разных точках с номерами $i = 1, 2, \dots, n$ равна h_i , то абсолютной разнотолщинностью в этих точках называют отклонение по абсолютной величине:

$$\Delta_i = |h_i - h_{cp}|,$$

где средняя толщина листа $h_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$.

$$\text{Средняя разнотолщинность листа } \Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i.$$

Нельзя путать среднюю толщину листа h_{cp} с номинальной h и разнотолщинность Δ — с допуском на толщину δ . Номинальная толщина h служит товарной характеристикой данного листа, лист такой толщины покупает потребитель. Она в общем случае не совпадает со средней толщиной h_{cp} . ГОСТом определены минусовый ($-\delta$) и плюсовый ($+\delta$) допуски как допустимые отклонения толщины листа от номинальной. Минусовый допуск почти всегда больше плюсового. В зависимости от толщины и класса точности листа они колеблются от $\pm 0,1$ мм (для листов толщиной 4–10 мм по 2-му классу точности) до $\pm 2,5$ мм (для листов толщиной > 100 мм по 7-му классу точности). Для наиболее распространенных толстых листов допуск составляет $+0,4-0,6$ мм. Фактическая толщина прокатанного листа h_i в любом месте, в том числе в точках с максимальной и минимальной разнотолщинностью, должна укладываться в допускаемые отклонения от номинала:

$$h - \delta \leq h_i \leq h + \delta.$$

Различают продольную и поперечную разнотолщинность листа. Соответственно, для определения продольной или поперечной разнотолщинности измеряемые точки i располагаются вдоль или поперек листа.

На толстых листах имеют место оба вида разнотолщинности. Они определяют планшетность листа. И оба вида разнотолщинности закладываются в основном в поперечных пропусках. В связи с этим более актуальным является вопрос о формировании поперечной разнотолщинности.

На практике поперечную разнотолщинность определяют иначе, потому что измерять толщину в n точках по ширине сложно; измеряют ее только в трех точках — в середине h_c и на расстоянии 40–60 мм от боковых кромок h_{k1} и h_{k2} . Последние два показания усредняют и поперечной разнотолщинностью считают разность значений среднего по кромкам и в середине листа:

$$\Delta = |h_c - 0,5(h_{k1} + h_{k2})|. \quad (15.1)$$

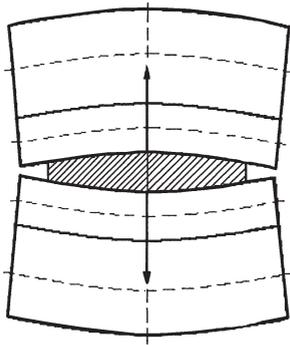


Рис. 15.31. Прогиб валков кварто при прокатке листа

Поперечная разнотолщинность зависит от следующих основных факторов.

1. Прогиб валков. Если предположить, что рабочие и опорные валки клетки кварто строго цилиндрические и в ненагруженном состоянии образуют равный зазор между валками по всей ширине, то после приложения нагрузки в результате упругого изгиба валков щель станет чечевицеобразной (рис. 15.31). Решение задачи о совместном прогибе рабочего и опорного валков при неравномерном распределении нагрузки вдоль валков связано с большими трудностями. В Донниичермете такую задачу решили на ЭВМ для многих действующих толстолистовых станов. Получили, что прогиб f по длине валков (или по ширине

полосы) распределяется по сложной кривой. Лишь в первом приближении ее можно заменить параболой.

Чтобы компенсировать прогиб валков и выровнять щель по длине валка при прокатке, один рабочий валок профилируют, т. е. делают бочкообразным с профилем, соответствующим эпюре распределения прогиба f . Максимальный прогиб по середине валков f_{\max} и распределение прогиба вдоль образующей зависят от длины валков, ширины прокатываемой полосы, силы прокатки P и других факторов. При прокатке различных листов на валках с имеющейся профилировкой прогиб компенсируется только при одном наборе этих факторов. При других значениях факторов необходимо вводить корректировку прогиба валков. Для этого все станы имеют автоматическую систему регулирования изгиба валков. Под подушки опорных и рабочих валков установлены гидронажимные устройства, которые при отклонении силы P и других технологических параметров от заданных значений дополнительно автоматически изгибают валки, воздействуя на шейки валков. На рис. 15.32 показаны основные схемы регулирования прогиба рабочих и опорных валков. Наиболее рациональной по комплексу показателей признана система регулирования по схеме *б*, хотя каждая имеет определенные достоинства и недостатки. Некоторые заводы отдают предпочтение схеме *а*. Автоматические системы дополнительного изгиба валков в процессе прокатки называют также системами противоизгиба.

2. Температурный профиль валков. При горячей прокатке валки разогреваются за счет контакта с металлом и за счет превращения работы деформации в тепло. Охлаждение валков происходит путем отвода тепла охлаждающей водой и отдачи тепла деталям стана и в окружающую среду. При длительной и стабильной прокатке устанавливается стабильный тепловой перепад по длине валка, который и определяет тепловой профиль валка, точнее, его тепловую выпуклость. Если температура шеек валков всегда близка к 20°C , то на среднем участке валков, протяженностью примерно $2/3$ ширины раската, она устанавливается на уровне $70\text{--}85^\circ\text{C}$. Измерения и расчеты показывают, что максимальная разница в диаметре валка посередине и на концах находится в пределах $0,08\text{--}0,20$ мм. При профилировании необходимо учитывать тепловой профиль валка: в каждой точке по длине валка от изгибной составляющей, увеличиваю-

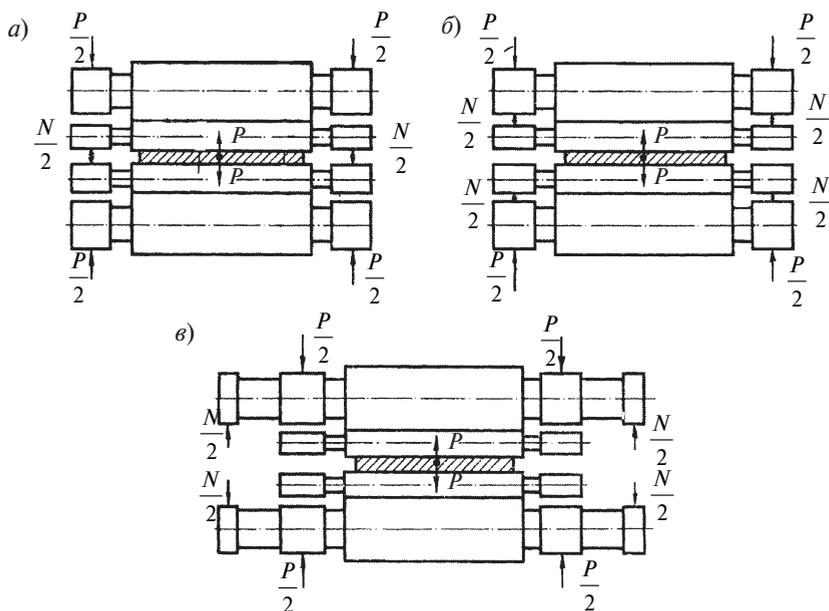


Рис. 15.32. Схемы регулирования профиля валков:

N — сила противоизгиба рабочих и опорных валков; P — сила прокатки

щей диаметр к середине, следует вычесть тепловую составляющую, требующую уменьшения диаметра. Суммарный профиль валка будет достаточно сложным.

3. *Износ валков.* Поперечный профиль листа во многом определяется характером износа рабочих валков в процессе эксплуатации. На рис. 15.33 приведены заводские данные, полученные на некоторых станах, по исходной профилировке валков и изменению их профиля за одну кампанию работы валков от установки на стан до перевалки на перешлифовку. Видно, что поперечная разнотолщинность имеет место уже при установке валков на стан, что связано с начальной профилировкой валков. По мере износа валков разнотолщинность возрастает. Износ валков зависит от эпюры распределения давления по ширине листа и по длине валков происходит неравномерно. На всех заводах в начале кампании прокатываются широкие, а затем, по мере износа валков, более узкие полосы. Так продлевают срок службы валков до полного их износа. Суммарный износ за всю кампанию по середине бочки валка выше, чем по краям.

Износ рабочих валков вносит основную долю в общую разнотолщинность. Она составляет 0,1–0,5 мм. Чем шире лист и больше длина валков, тем больше поперечная разнотолщинность.

Примерно такой же характер износа наблюдается на опорных валках, хотя их износ значительно меньше. Результаты исследования на многих станах показывают, что за одну кампанию износ опорных валков достигает 0,15–0,30 мм и неравномерность их износа вносит в общую разнотолщинность долю, равную 0,05–0,15 мм.

Износ валков при прокатке учитывается в работе автоматизированной системы дополнительного изгиба валков путем введения соответствующих кор-

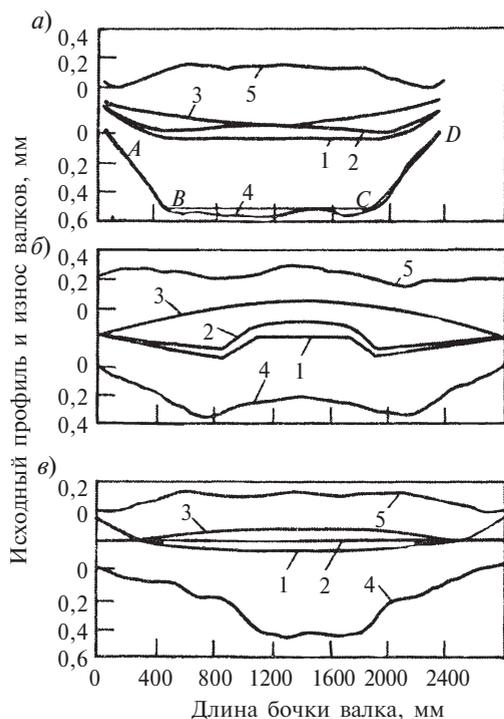


Рис. 15.33. Профиль после перешлифовки рабочего валка (1), рабочего валка с учетом тепловой выпуклости (2), опорного валка (3) и профиль после износа рабочего (4) и опорного (5) валков на станах 2300 Донецкого металлургического завода (ДМЗ) (а), 2800 Коммунарского металлургического завода (б), 2800 ОАО "Северсталь" (в)

это устойчивое удержание раската точно на середине бочки валков, чтобы сила прокатки поровну распределялась на оба нажимных винта. В противном случае лист будет иметь разную толщину по левой и правой боковым кромкам за счет разной упругой деформации деталей левой и правой подушек. Несимметричное распределение усилий опасно также тем, что полоса при прокатке еще больше смещается от середины в сторону более толстого края и может попасть в станину. Для надежного удержания полосы в валках на середине бочки рабочие валки делают вогнутыми, т. е. с уменьшением диаметра к середине бочки. В этом случае силы нормального давления P , действующие на полосу, имеют горизонтальную составляющую P_x , направленную внутрь к оси прокатки, и полоса автоматически всегда смещается на середину бочки (рис. 15.34).

Такая профилировка валков прямо противоположна той, которая рекомендуется для компенсации упругого прогиба валков. В связи с этим на толстолистовых станах применяют самые разнообразные профилировки рабочих

ректировок в модель в зависимости от количества прокатанного металла или от количества израсходованной энергии с начала кампании. Однако, как видно, сложный характер износа полностью скорректировать изгибом валков не удастся.

4. Профилировка валков. Профилировка валков выполняется не только для того, чтобы устранить или свести к минимуму поперечную разнотолщинность полосы. Сама по себе поперечная разнотолщинность неопасна, ее стремятся уменьшить только для обеспечения равномерности деформации по ширине полосы и для получения высокой планшетности листа, особенно при прокатке тонких листов (из сортамента толстолистовой продукции). С помощью профилировки валка обеспечивают также устойчивость полосы в валках при прокатке. Желательно также добиться равномерного распределения давления на рабочие и опорные валки по ширине их контакта, чтобы добиться равномерности износа валков. Такой широкий набор требований определяет разные подходы к профилировке валков. Поэтому на разных заводах применяются различные исходные профилировки валков.

Устойчивость полосы в валках —

и опорных валков, от вогнутых до выпуклых с различной формой профиля образующей. Единого подхода к выбору оптимальной профилировки нет.

На рис. 15.35 приведены профилировки рабочих и опорных валков, применяемые на некоторых толстолистовых станах. На приведенных рисунках для рабочего валка показана профилировка начальная и скорректированная за счет теплового расширения (тепловая добавка заштрихована). Исследования показали, что для устойчивого удержания полосы рабочие валки должны быть вогнутыми только на крайних участках бочки. Средние же участки можно сделать либо цилиндрическими, либо выпуклыми, что снижает поперечную разнотолщинность листа. Такая профилировка рабочих валков в сочетании с выпуклой профилировкой опорного валка (б, ж, з) позволяет обеспечить практически равномерное распределение межвалкового давления по длине валков и равномерность их износа. Чтобы эта равномерность сохранялась при прокатке дольше, предложено на концах рабочих валков делать скосы длиной $l = 0,5(L - B_{\min})$, где L — длина бочки валка, B_{\min} — минимальная ширина полосы, прокатываемой на стане.

Чисто вогнутые профилировки валков применяются на ряде старых заводов, однако они нежелательны. При прокатке на таких валках получается чечевицепоподобная форма листа с высокой поперечной разнотолщинностью. Чтобы ее снизить, на стане последние пропуски осуществляют практически без обжатий. Эти пропуски называются проглаживающими. При обжатиях, близких к 0, резко снижается прогиб валков, и полоса выравнивается по ширине, разнотолщинность снижается. Однако механические свойства металла снижаются. Из диаграммы рекристаллизации металла (см. рис. 1.11) следует, что при малых обжатиях в районе критических значений получается очень крупное зерно, что губительно для ударных характеристик листа. Кроме того, проглаживание полосы требует дополнительного времени, и производительность стана падает.

Таким образом, оптимальная профилировка валков по всем критериям невозможна, каждый завод разрабатывает собственную профилировку на основе своего сортамента листов, особенностей стана, условий прокатки и пр.

Необходимо отметить также, что на толстолистовых станах с помощью про-

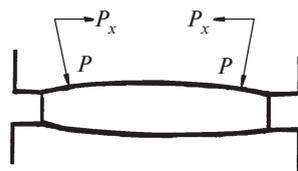


Рис. 15.34. Профилировка валков для устойчивости полосы при прокатке

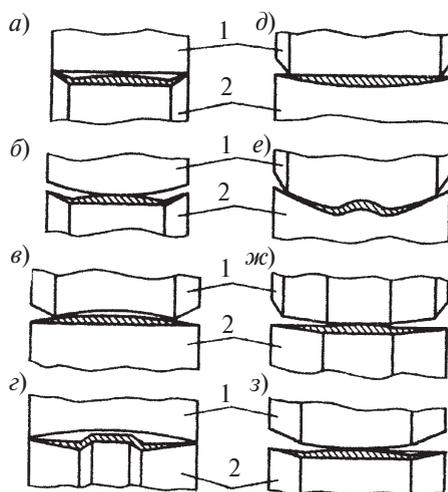


Рис. 15.35. Профилировки опорных (1) и рабочих (2) валков толстолистовых станов:

а — 2250 КМЗ; б — 2300 ДМЗ; в — 2800 ОХМК (старая); г — 2800 КМЗ; д — ж — 2800 ОАО “Северсталь” (старая, промежуточная и новая); з — 2800 ОХМК и 3600 завода “Азовсталь” (новые, предложенные Донни-черметом)

филировки валков можно решать проблему управления шириной листа. Представим себе, что при соответствующей профилировке валков или под действием гидроцилиндров системы изгиба валков в последнем уширительном пропуске получена чечевицеподобная полоса. На станах с длиной бочки валков 4500–5500 мм при прокатке толстых и широких листов (более 4000 мм) можно получить разность толщины в середине и по краям до 2,8–3,8 мм. Если дальше такую полосу прокатывать в чистовой клети, имеющей равномерную щель между валками, то деформация полосы по ширине будет очень неравномерна. Средние по ширине слои будут получать большее обжатие, чем по кромкам. За счет взаимодействия средних и крайних слоев последние будут принудительно вытягиваться в длину и утягиваться по ширине. Опыты показывают, что, повторив таким образом несколько раз такую прокатку в черновой и в чистовой клетях, можно уменьшить ширину широких листов на 20–60 мм.

Меняя усилие противоизгиба в процессе прокатки в последнем уширительном пропуске, можно изменять поперечную разнотолщинность (размеры чечевицы) по длине раската. После разворота полосы и прокатки в продольном направлении мы получим разную утяжку ширины листа по его длине. За счет этого можно приблизить форму листа в плане к прямоугольной. Получается что-то похожее на MAS-прокатку, но не за счет изменения высоты полосы при прокатке, а за счет изменения формы щели между валками. На существующих толстолистовых станах предлагаемый способ регулирования ширины полосы пока не применяется, он находится в стадии проработки.

5. *Сила прокатки.* На поперечный профиль листа и его планшетность большое влияние оказывает распределение давления на валки по ширине листа. Оно зависит от исходной профилировки, износа валков, а также от других факторов. Напомним, что на узких очагах максимум давления приходится на середину полосы по ширине. На широких полосах неравномерность давления сосредоточена в прикромочных областях (см. рис. 5.3 и 5.4). Особенно важны рассматриваемые эффекты при прокатке сравнительно тонких листов. Для их снижения пригодны все мероприятия, за счет которых снижается сила прокатки, — повышение температуры прокатки, уменьшение коэффициента трения и т. д. Для этой же цели на толстолистовых станах применяют несимметричную прокатку. Совместные исследования завода “Азовсталь”, Донничермет, ДПИ и НКМЗ показали, что на толстолистовом стане при прокатке листов 8–14 мм полезно рассогласование скоростей валков стана на 3–4 %. При несимметричной прокатке (см. разд. 4.4) в середине очага деформации, помимо обычных зон опережения и отставания по обоим валкам, появляется зона, в которой по одному валку силы трения соответствуют зоне опережения, а по другому — зоне отставания, т. е. направлены навстречу друг другу. Это приводит к уменьшению удельного давления в центре очага деформации и, следовательно, к общему снижению силы прокатки. Важнее то, что снижение пика давлений в середине очага обеспечивает более равномерное распределение давления по ширине полосы, отчего снижается разнотолщинность, улучшается планшетность листа и уменьшается неравномерность износа валков.

15.9. Производство толстого биметаллического листа

Химическая промышленность, атомное и энергетическое машиностроение, судостроение, трубная промышленность и другие отрасли применяют биметаллический толстый лист. Такие листы состоят из двух слоев. Основной слой изготовлен из сравнительно дешевой углеродистой или низколегированной стали, а плакирующий — из дорогого легированного металла со специальными свойствами. Плакирующий слой должен обеспечить эксплуатационные свойства биметалла при работе в экстремальных условиях, а основной несет силовую нагрузку. Реже применяются триметаллические листы, в которых два плакирующих слоя располагаются по обе стороны от основного.

Толщина плакирующего слоя на толстых биметаллических листах обычно колеблется в пределах 5–7 мм, а толщина основного слоя может быть практически любой. Применение биметаллических листов дает большую экономию затрат у потребителя. Например, емкость, изготовленная для целлюлозно-бумажной промышленности из биметалла, содержащего плакирующий слой из кислотоупорной нержавеющей стали, значительно дешевле такой же емкости, полностью изготовленной из кислотоупорной стали. Биметаллический лист с плакирующим слоем из титана обеспечивает очень длительный срок службы обшивки корабля в агрессивной морской воде. Биметаллические трубы значительно продлили бы жизнь магистральных газопроводов.

Основными поставщиками толстого биметаллического листа на мировой рынок являются Япония, Германия, США и другие страны. В России потребность в таком листе непрерывно растет, и возможно, она станет главным потребителем такого листа. Однако пока его производство не столь развито, как требуют перспективные планы развития основных отраслей промышленности, потребляющих биметаллический лист. На данном этапе становления нашего народного хозяйства при сравнительно небольших объемах потребления часто предприятию выгоднее купить некоторое количество таких листов на мировом рынке, чем налаживать производство на своих толстолистовых станах. Однако и у нас в стране на ОХМК, Ижорском и других заводах разработана технология производства толстого биметаллического листа. На Украине такой лист производит КМЗ.

На существующих толстолистовых станах биметаллические листы могут производиться при наличии специализированного участка для подготовки биметаллических слябов и при дополнительном оборудовании для контроля качества продукции, его дополнительной обработки и испытания.

При производстве биметаллических листов основной проблемой является изготовление биметаллического сляба. Существует несколько технологических схем производства биметаллических слябов, служащих заготовкой для прокатки биметаллического листа. Самой простой является наплавка плакирующего слоя на основной (рис. 15.36). По первому способу (см. рис. 15.36, а) в изложницу помещают сляб из основного металла (в твердом состоянии) и доливают в нее расплав легированного плакирующего металла. При сплавлении слоев получается биметаллический сляб, который в дальнейшем по технологии плакирующего металла нагревается в методических печах и прокатывается по обычной технологии. При производстве таких слябов необходимо предотвратить окис-

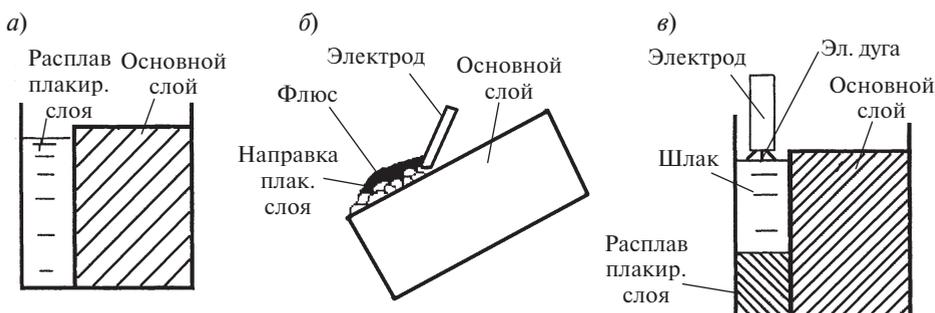


Рис. 15.36. Изготовление биметаллических слябов методами расплавления плакирующего слоя:

a — заливка; *б* — наплавка; *в* — ЭШП

ление поверхностей металлов в месте их соединения, например, путем применения инертных газов, вакуумирования, использования шлаков и пр.

Более надежен способ наплавки плакирующего слоя сварочными электродами под слоем флюса (см. рис. 15.36, *б*). Более высокое качество сварки обеспечивает способ электрошлакового переплава (ЭШП), когда капли расплавленного электрода из плакирующего материала проходят слой специально наведенного шлака, очищающего и защищающего металл (см. рис. 15.36, *в*).

Методы, основанные на расплавлении плакирующего слоя, применяются, например, при получении биметаллических листов с плакирующим слоем из меди, никеля и пр. Однако такие методы во всех разновидностях имеют существенные недостатки. Очень трудно защитить плоскости контакта слоев от окисления. Кроме того, при контакте расплавленного плакирующего металла с основным углеродистым металлом происходит их взаимодействие. Если сплавляемые металлы неограниченно растворимы, то соединение достигает высокой прочности и пластичности. Это наилучшее сочетание металлов плакирующего и основного слоев. Если же металлы образуют хрупкие химические соединения или эвтектики, то промежуточный слой, а с ним и весь биметаллический лист будут иметь низкие механические свойства. Например, титан со сталью при температуре 1050 °С образуют эвтектику, которая имеет практически нулевую пластичность и прочность, поэтому методы расплавления не пригодны для получения биметаллических слябов титан—сталь.

При контакте основного и расплавленного плакирующего металлов интенсивно протекают диффузионные процессы. Например, при производстве биметалла сталь — нержавеющая сталь углерод диффундирует из слоя стали в плакирующий слой, а легирующие элементы (Cr, Ni, Ti и др.) — в обратном направлении. На границе соединения со стороны нержавеющей стали образуется прослойка хрупких карбидных соединений с металлами плакирующего слоя (хрома, титана и пр.). В основном слое образуется дополнительная прослойка из обезуглероженного металла. Таким образом, на границе соединения формируется переходная зона, состоящая из двух слоев — карбидного и обезуглероженного. Механические свойства всего биметаллического листа определяются свойствами промежуточной зоны: предел его текучести будет таким же невысоким, как у обезуглероженного слоя, а пластичность низкой, как у кар-

бидного слоя. Методы расплавления технологически просты, но применяются сравнительно редко, поскольку обеспечивают невысокие свойства листа.

Метод наплавки плакирующего слоя под слоем флюса применяется на стане 2000 ОАО “Северсталь” при производстве тонких горячекатаных биметаллических листов сталь — нержавеющая сталь. При деформации от толщины исходного сляба 280 мм до конечной толщины 2 мм промежуточная зона раскатывается, превращается в отдельные, не связанные между собой островки, которые мало влияют на свойства готового листа.

Для получения толстых листов из упомянутых металлических пар с высокими механическими свойствами применяют пакетные методы изготовления биметаллических слябов. Существует несколько конструкций пакетов. В самом простом пакете (рис. 15.37, а) плакирующий металл в виде пластины приваривается к основному слою по периметру. В таком виде пакет нагревается в методической печи и затем прокатывается на стане, как обычный сляб. Чтобы произошла сварка слоев по контактной поверхности, необходимо на их границе достигнуть определенной и достаточно высокой прорабатываемости (суммарной степени деформации).

Сварка будет прочнее и надежнее, если в процессе подготовки и нагрева пакета сохранить чистые поверхности слоев. Для этого перед сборкой пакета все поверхности тщательно зачищаются и промываются ацетоном или спиртом, а после окончательной сборки из пакета откачивается лишний воздух, чтобы полностью предотвратить окисление.

Представленный пакет прост, но при его изготовлении (при сварке) по периметру металл расплавляется, поэтому после прокатки значительную часть биметаллического листа приходится отправлять в обрезь. Более сложный пакет содержит крышку, закрывающую плакирующую плиту от окисления и загрязнения (рис. 15.37, б). Сварка по периметру осуществляется через стальные промежуточные прокладки, поэтому плакирующий слой в периферийных слоях не расплавляется. Это наиболее применяемый пакет. Здесь также все детали перед сборкой зачищаются и промываются, а после сборки пакет вакуумируется.

Недостатком обоих пакетов является различие сопротивления деформации металла по верхнему и нижнему валку при прокатке. В результате обжатие мягкого слоя больше, чем твердого, из-за неравномерности деформации между слоями происходит взаимодействие. При прокатке сляб изгибается в сторону твердого слоя (как правило, плакирующего). После сварки слоев их дефор-

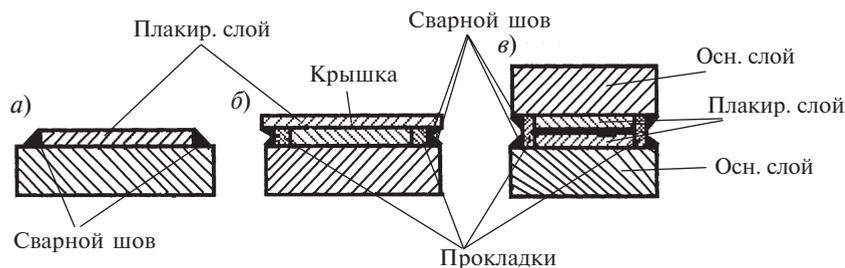


Рис. 15.37. Типы пакетов для прокатки биметаллических листов

мация выравнивается, однако сохраняется высокая неравномерность, а за счет взаимодействия слоев в них формируются большие остаточные напряжения, значительно снижающие механические свойства листа в целом. Возможно даже расслоение. Чтобы выровнять деформацию на обоих валках, необходимо прокатывать симметричный пакет (рис. 15.37, в). Важным преимуществом является также то, что так прокатываются сразу два биметаллических листа, производительность возрастает. Недостатком является слабая прорабатываемость пакета в месте сварки слоев. Толщина сляба в этом случае почти в два раза больше, чем в предыдущем, поэтому при прокатке высока вероятность попадания в область высокого очага деформации, когда деформация не проникает в центральные слои. Необходимы высокие суммарные обжатия, чтобы обеспечить сварку плакирующего слоя с основным, что возможно при прокатке сравнительно тонких слябов или мощного прокатного оборудования.

Проблема надежной приварки плакирующего слоя к основному металлу по всей контактной поверхности является главной при пакетной прокатке биметалла. Для улучшения свариваемости при пакетной прокатке применяют тонкие промежуточные прослойки. С одной стороны, промежуточные прослойки предотвращают образование хрупких карбидных прослоек и обезуглероженного слоя, с другой — при соответствующем подборе материала прослоек удается снизить прорабатываемость, при которой слои привариваются друг к другу. Из теории сварки давлением известно, что лучше всего (при меньшем давлении) свариваются однородные металлы, имеющие близкие атомные радиусы. Так, хорошо свариваются железо (сталь) с никелем, свинец с оловом и т. д. Труднее свариваются одинаковые металлы, например сталь со сталью. И чем больше различие в атомных радиусах, тем труднее металл сваривается. Сталь с титаном свариваются очень трудно, так как эти металлы имеют далеко различные атомные радиусы (при наличии эвтектики сварка вообще невозможна).

Таким образом, для производства биметаллических листов сталь — нержавеющая сталь в пакет между слоями необходимо заложить прослойку из никеля. На КМЗ такую прослойку наносят гальваническим путем на плакирующую плиту. На многих заводах (например, на стане 5000) прослойка представляет собой тонкий лист, сваренный из отдельных никелевых лент. На участке сборки пакетов имеется сварочное оборудование, позволяющее закрепить никелевые ленты на основном слое. Конечно, ленты предварительно зачищают и промывают, а собранный пакет вакуумируют. Прочность сцепления основного и плакирующего слоев при наличии ленточной прослойки выше, чем при гальваническом нанесении промежуточного слоя. Еще более сложная прослойка необходима для производства биметалла титан—сталь. Такого металла, который имеет близкий атомный радиус к железу и титану, не существует. Поэтому необходимы двойные и даже тройные прослойки, например ванадий-ниобиевые, никель-ванадий-ниобиевые и др., которые обеспечивают постепенный переход от железа к титану.

При пакетной прокатке одна из проблем состоит в том, чтобы правильно подобрать соотношение толщин плакирующего и основного слоев до прокатки $H_{пл}/H_{ос}$ для обеспечения требуемого соотношения после прокатки $h_{пл}/h_{ос}$. До момента сварки слоев каждый из слоев деформируется независимо друг от друга и соотношение обжатий подчиняется закономерности

$$\frac{\Delta h_{\text{пл}}}{\Delta h_{\text{ос}}} = \frac{\sigma_{\text{ос}}^2}{\sigma_{\text{пл}}^2},$$

где $\sigma_{\text{ос}}$, $\sigma_{\text{пл}}$ — предел текучести металла основного и плакирующих слоев (см. рис. 5.11).

Однако после сварки слоев до конца прокатки оба слоя должны деформироваться более равномерно, поскольку вытяжки их выравниваются. Таким образом, трудно рассчитать начальное соотношение толщин листов, чтобы попасть в требуемое соотношение после прокатки.

Все отмеченные выше трудности почти полностью исчезают, если изготавливать биметаллический лист методом взрыва (рис. 15.38). Готовый лист получается без нагрева и последующей прокатки сразу за одну операцию. На основную плиту под углом накладывается плакирующий лист. Размеры плит равны размерам готового биметаллического листа. На плакирующий лист наносится ровным слоем взрывчатое вещество. Затем производится направленный взрыв, и плакирующий лист слева направо с большой силой и скоростью устремляется к основной плите. Удельные давления при этом очень велики, движение фронта волны взрыва формирует в обоих слоях зубцы, по форме напоминающие гребни прибрежной морской волны при шторме. Форму и высоту их можно регулировать. Происходит надежное приваривание поверхностей. Лист, полученный методом взрыва, обеспечивает наибольшую прочность соединения листов. Здесь нет промежуточной диффузионной зоны, не образуются химические соединения и прочие фазы. Микроисследования показывают, что граница слоев представляет собой чистую тонкую поверхность зубчатой формы.

Понятно, что взрывная технология требует строительства специально оборудованных полигонов и соответствующей подготовки персонала. Производительность также не идет ни в какое сравнение с предыдущими технологиями. На ОХМК накоплен определенный опыт производства биметаллических листов, полученных взрывом. Имеется также лабораторный опыт в различных исследовательских коллективах. Широкого применения такая технология не получила, но вполне допустима для производства уникальных листов.

В литературе имеются сведения о лабораторных опытах по механическому соединению слоев при пакетной прокатке. Для этого перед сборкой пакета на свариваемых поверхностях обоих пластин прострагивают канавки в виде ласточкина хвоста. При прокатке выступы одной пластины входят в зацепление

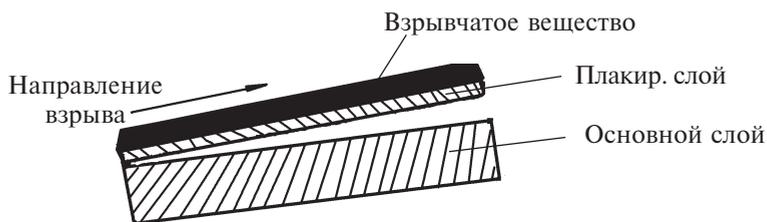


Рис. 15.38. Получение биметаллического листа методом взрыва

с выступами другой, образуя прочное механическое соединение, как при взрыве. Очевидно, такой способ получения биметаллических листов будет значительно дешевле и технологичнее, чем способ взрыва.

Глава 16

ПРОИЗВОДСТВО ЛИСТА НА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНАХ

16.1. Сортамент и общая технология

Тонкий горячекатаный лист производится на непрерывных, полунепрерывных и реверсивных станах горячей прокатки. Анализ марочного сортамента российских и европейских станов горячей прокатки тонкого листа показывает, что 76,2 % приходится на мягкие стали для холодной прокатки и штамповки, 10,5 % — на свариваемые конструкционные стали, 6,4 % — на микролегированные мелкозернистые стали для труб, 1,7 % — на высокоуглеродистые, 3,3 % — на коррозионностойкие и 1,9 % — на высококремнистые электротехнические стали.

На непрерывных широкополосных станах (НШПС) производят 80–90 % горячекатаного листа толщиной 1,2–16,0 мм. Доля листов толщиной менее 4 мм составляет до 60 % в сортаменте стана. Подавляющее количество горячекатаного листа имеет толщину свыше 1,7 мм, так как при производстве более тонкого листа в горячем состоянии быстро падает температура металла и не удастся получить требуемую температуру конца прокатки. Повышение скорости прокатки для поднятия этой температуры также невозможно, так как современные моталки не обеспечивают надежный захват полосы при скоростях выше 10–12 м/с.

Как известно, листы толщиной свыше 4 мм по ГОСТу относятся к толстолистовой продукции, однако толстые листы толщиной до 16 мм выгодно производить на НШПС, которые более производительны, более экономичны и обеспечивают большую точность прокатки, чем толстолистовые станы. При производстве листов толщиной 4–16 мм затраты по переделу на НШПС на 25–28 % ниже, чем на толстолистовых станах. Широкополосные станы производят до 10 % толстого листа. Листы толще 16 мм на НШПС не прокатывают потому, что не хватает мощности моталок, на которые сматывается полученный лист после прокатки. Однако в отечественной и зарубежной практике имеются тенденции к увеличению толщины до 25–27 мм.

Ширина горячекатаного листа определяется длиной бочки валков, и на наиболее распространенных станах 1700 и 2000 она соответственно не превышает 1520 и 1850 мм. Горячекатаный лист первоначально получается в виде рулонов, масса которых может колебаться в зависимости от конструкции стана от 5 до 40 т. Большое количество рулонов затем поступает в цех холодной прокатки и перекачивается в холоднокатаный лист. Требования к качеству

и точности этой части горячекатаной продукции полностью диктуются требованиями к холоднокатаному листу, и они выше, чем требования к готовому горячекатаному листу, который отправляется непосредственно потребителю — в машиностроение и строительство. Однако лишь небольшое количество потребителей этих отраслей промышленности могут использовать лист в рулонах, так как не имеют оборудования для их размотки, правки и резки. Основная часть готового горячекатаного листа поставляется в виде карточек длиной от 2000 до 6000 мм, набранных в пакеты массой до 36 т (масса 36 т определена грузоподъемностью железнодорожной платформы, на которую загружаются два пакета для равномерной загрузки). Основная доля горячекатаного листа имеет на поверхности слой окалина толщиной до 30–40 мкм. Горячекатаный лист, освобожденный от окалины, называется декапированным. Снятие окалины осуществляют в цехах холодной прокатки, поэтому декапированный лист относят к их сортаменту.

Исходной заготовкой для производства горячекатаного листа являются литые или катаные слябы. История развития широкополосных станов шла по пути повышения качества листа и увеличения производительности стана. Повышение производительности достигается в значительной мере за счет увеличения массы литого сляба. Современные станы четвертого поколения имеют производительность до 6 млн. т в год и используют слябы длиной до 18 м, высотой до 280 мм и массой до 36–45 т. При увеличении толщины сляба выше 280 мм заметно снижается качество металла и производительность нагревательных печей. Максимальная ширина B сляба, отливаемого для современных станов, равна 2640 мм. Оптимальное соотношение размеров сляба B/H по условию устойчивости при прокатке близко к 6 и в общем случае не превышает 10. Кроме того, экспериментальным путем определено оптимальное соотношение веса сляба к его ширине: $G/B < 25$ т/м, так как с ростом этого отношения растут капитальные затраты на НШПС. Эти соотношения на НШПС полностью реализованы.

Рассмотрим технологию прокатки на одном из лучших российских станов четвертого поколения — стане 2000 ЧерМК конструкции НКМЗ (рис. 16.1). Стан предназначен для горячей прокатки листа шириной 900–1830 мм и толщиной 1,2–16,0 мм из литых слябов шириной 950–1850 мм, толщиной 150–280 мм, длиной 10,5 м и массой от 4,0 до 36 т. Максимальная скорость прокатки по паспорту 27 м/с, но фактически 22,5 м/с, производительность — до 6 млн. т в год. Стан имеет 65 локальных систем автоматического управления технологией производства, начиная от нагрева и кончая маркировкой полос.

Исходный литой сляб загружается на приемный стол одной из четырех нагревательных печей, где производится его взвешивание, идентификация и ввод исходных данных в компьютерную систему слежения и управления технологией (АСУ ТП и АСУ П). Печи имеют шагающие балки, и при загрузке сляба в печь вся садка перемещается на один шаг. При этом последняя нагретая заготовка выдается из печи на транспортный рольганг стана с помощью специального устройства, имеющего подъемный стол и привод перемещения слябов. Далее прокатка осуществляется сначала в черновой, а затем в чистовой группах клетей, работающих в нереверсивном режиме. Первая клеть в черновой группе вертикальная, в ней на основных гранях при обжатии разрыхляется окалина.

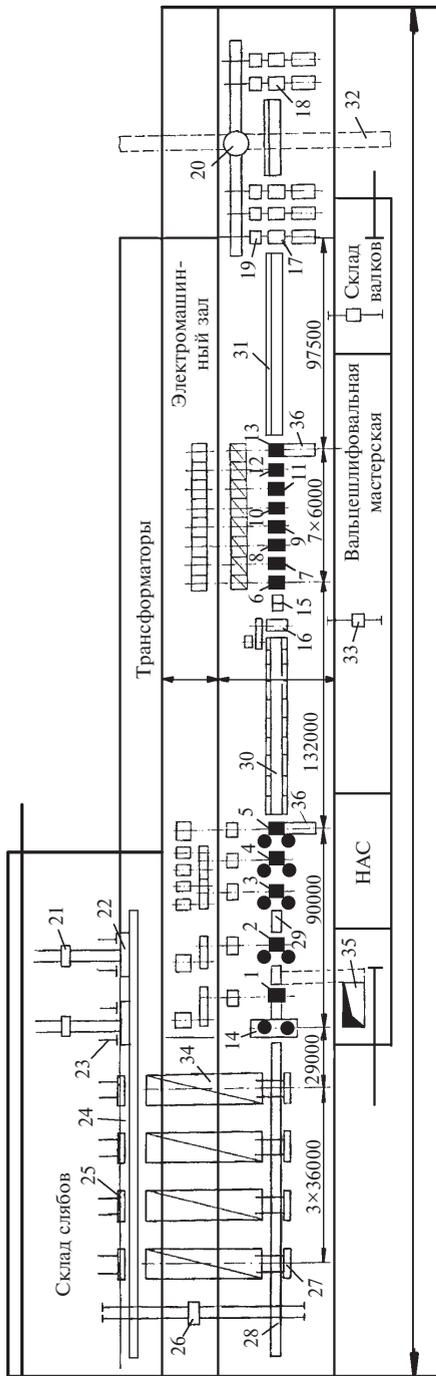


Рис. 16.1. План расположения оборудования цеха горячей прокатки с непрерывным широкополосным станом 2000: рабочие черновые клети: 1 — 2-валковая; 2 — универсальная 4-валковая; 3–5 — непрерывная 3-клетевая группа универсальных 4-валковых клетей;

рабочие чистовые клети: 6–13 — непрерывная чистовая группа; 14 — вертикальная черновая 2-валковая клеть — окалиноломатель; 15 — чистовой окалиноломатель; 16 — летучие барабанные ножницы; 17 — моталки для полосы толщиной 1,2–4,0 мм; 18 — моталки для полосы толщиной 4–16 мм; 19 — тележка с кантователем рулонов; 20 — поворотный стол для рулонов; 21 — тележка для слябов; 22 — подъемный стол; 23 — сталкиватель слябов; 24 — печной загрузочный ролянг; 25 — толкатель печные; 26 — тележка для передачи слябов; 27 — приемник слябов из печи; 28 — печной разгрузочный ролянг; 29 — ролянги черновых клетей; 30 — промежуточный ролянг; 31 — отводящие душирующие ролянги; 32 — транспортеры рулонов; 33 — передаточные тележки; 34 — нагревательные печи с шагающими балками; 35 — яма для сбора окалины; 36 — устройство для комплектной смены валков

После клетки установлен гидросбив, с помощью которого водой под давлением до 150 атм (15 МПа) окалина сбивается. На линии стана расположено всего четыре гидросбива — помимо упомянутого (№ 1) еще в черновой группе после вертикальной 2-валковой клетки (№ 2) и после второй универсальной клетки кварто (№ 3). Последний гидросбив (№ 4) находится перед чистовой группой клеток после чистового окалиноломателя. Поэтому достаточно полно удаляется как первичная (печная), так и вторичная (образующаяся при прокатке) окалина.

Черновая группа клеток содержит одну 2-валковую и четыре универсальные 4-валковые клетки. В отличие от ранее установленных НШПС, например стана 2000 НЛМК, на череповецком стане три последние черновые универсальные клетки собраны в непрерывную группу, что позволило уменьшить длину черновой группы, уменьшить стоимость оборудования и самого здания цеха, улучшить температурный режим прокатки.

Чистовая группа клеток состоит из семи непрерывных клеток кварто (восьмая клетка не установлена). Перед ними расположен чистовой окалиноломатель, имеющий две пары прижимных роликов, обжимающих полосу с усилием 100 кН. Образующаяся в процессе прокатки окалина разламывается и затем сбивается гидросбивом № 4, установленным за окалиноломателем. При прокатке в чистовой группе между клетями существует натяжение полосы. Для поддержания и регулирования натяжения в момент прохождения между клетями полоса перегибается через поднимающийся над уровнем рольганга ролик, усилие на который зависит от натяжения. Это усилие является сигналом для регулирования натяжения. После прохождения полосы ролик регулятора натяжения утапливается ниже уровня рольганга и не препятствует заправке в валки следующей полосы.

На станах первого и второго поколения в черновой группе клеток предусматривался реверсивный режим прокатки, на некоторых станах присутствовали уширительные пропуски. Это давало возможность получать листы разной ширины, но резко сдерживало производительность. В погоне за более высокой производительностью пришлось отказаться от уширительных пропусков. На современном НШПС ширина листа полностью определяется шириной исходного сляба. Есть ограниченные возможности изменить ее за счет регулирования обжатия в вертикальных клетях черновой группы и за счет увеличения парка кристаллизаторов на установке непрерывной разливки. Отсутствие возможностей широкого и гибкого регулирования ширины полосы является основным недостатком современных НШПС. Этот недостаток пытаются устранить различными средствами, например, на ЧерМК имеется проект установки после печей двух редуционных клеток (см. рис. 15.16). Ранее отмечалось, что на одном из японских станов имеется отдельно стоящий редуционный стан. На трех японских станах установлены прессы после вертикальных клеток, которые, во-первых, регулируют ширину сляба в значительных пределах, во-вторых, уменьшают наплывы, образующиеся при прокатке в вертикальных или редуционных клетях.

После прокатки лист охлаждается от температуры конца прокатки до требуемой температуры смотки на душирующей установке. После смотки рулоны направляются либо по подземному конвейеру в цех холодной прокатки листа,

либо в отделение отделки цеха НШПС. В этом отделении на агрегате поперечной резки (АПР — рис. 16.2) листы разматываются, правятся, затем дрессируются (прокатываются) с обжатием 1–5 % в клетки кварто дрессировочного стана, правятся на роликоправильной машине, затем разрезаются на карточки на барабанных ножницах, сортируются, маркируются и собираются в пакеты. Пакеты затем обвязываются и консервируются для длительного хранения (подвергаются антикоррозийной обработке и упаковываются).

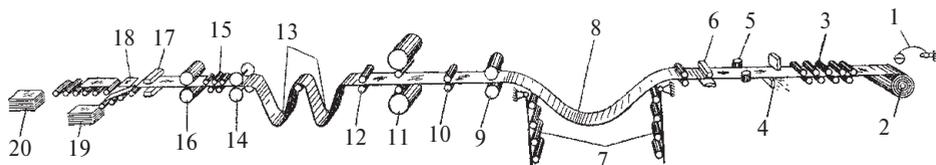


Рис. 16.2. Схема агрегата поперечной резки полосы из рулонов:

1 — отгибатель; 2 — разматыватель; 3 — правильная машина; 4 — устройство для чистки от грязи; 5 — центрирующие ролики; 6 — летучий микрометр; 7 — откидные рольганги; 8 — петлевая яма; 9, 12 — тянущие ролики; 10 — ограничитель натяжения; 11 — дрессировочная клетка; 13 — петлевые ямы; 14 — дисковые ножницы для обрезки кромок; 15 — роликоправильная машина; 16 — барабанные ножницы; 17 — механический маркировщик; 18 — карман для бракованных листов; 19 — пакетировщик бракованных листов; 20 — пакетировщик годных листов

Благодаря обжатию в дрессировочной клетке и знакопеременному изгибу на правильной машине лист частично освобождается от окалины и упрочняется, поэтому свойства горячекатаного листа в пакете выше, чем в рулоне.

16.2. Улучшение качества поверхности листа

За последние годы значительно выросли требования к качеству поверхности горячекатаных полос. Дефекты, имеющиеся на горячекатаном металле, в значительной мере сохраняются на холоднокатаном листе.

Качество поверхности листа определяется:

- качеством поверхности сляба;
- химическим составом стали, способом ее выплавки и разливки;
- режимами прокатки и способами отделки готового листа;
- свойствами окалины, зависящими от ее химсостава, температурных режимов нагрева, прокатки и смотки, а также режимов охлаждения после прокатки.

Вкатанная окалина является одним из основных видов брака горячекатаного листа. Чтобы снизить его, увеличивают давление воды в гидросбивах до 20 МПа, применяют, как на стане 2000 ЧерМК, чистовые окалиноломатели роликового типа. Радикальным способом является использование дрессировочной клетки в составе агрегата поперечной резки, которая появилась только на станах последнего поколения (на стане 2000 ММК, 2000 НЛМК, 2000 ЧерМК). В Японии есть цеха с отдельно стоящими дрессировочными станами.

На многих широкополосных станах контроль качества поверхности осуществляется визуальным осмотром полосы при разматке ее и прохождении на медленных скоростях на отдельно стоящих перемоточных агрегатах. Дальней-

шим шагом стало внедрение на этих установках или в линии АПР технических средств автоматического обнаружения поверхностных дефектов и автоматизация операции контроля и сортировки листа по качеству его поверхности. На АПР одного из японских станов установлен фотоэлектрический датчик, с помощью которого на скорости 16,7 м/с выявляются поры минимального диаметра 0,1 мм и царапины шириной 0,05 мм. Такие же установки в сочетании с измерителями толщины полосы и средствами для сортировки листов получают широкое распространение в мире, в том числе в России.

16.3. Температурный режим прокатки на НШПС

Одним из основных параметров, определяющих качество металла при прокатке на НШПС, является температура металла. Распределение температуры по линии стана определяет микроструктуру металла и механические свойства листа после прокатки. Температурой определяются также энергосиловые параметры прокатки.

Нагрев металла производится в соответствии с диаграммой железо—углерод (см. рис. 10.6) до температуры на 50–100 °С ниже линии солидуса, и для основного марочного сортамента стана, включающего низкоуглеродистые марки стали, температура нагрева составляет 1250–1280 °С. Для сталей, микролегированных ниобием и ванадием, низкий нагрев (до 1150 °С) не применяется, как на толстолистовых станах, потому что выгодно растворить в аустените карбонитриды этих элементов полностью и после прокатки при быстром охлаждении более эффективно использовать их выделение для упрочнения зерен феррита.

Температура конца прокатки также определяется диаграммой состояния. Низкоуглеродистые стали с содержанием углерода от 0,1 до 0,7 % необходимо прокатывать в однофазном состоянии аустенита и заканчивать прокатку выше линии A_{c3} , т. е. при 950–850 °С в зависимости от содержания углерода. Для этих сталей деформация в двухфазной области температур вредна, так как механические свойства готового металла снижаются.

Для сталей с содержанием углерода менее 0,1 %, наоборот, выгодно заканчивать деформацию при температурах фазовых превращений. В сталях с содержанием углерода 0,02–0,10 % в межфазной области образуется феррит и обедненный углеродом аустенит. Прокатка в этой области позволяет упрочнить и размельчить феррит и продеформировать аустенит, подготовив его структуру для получения оптимальных свойств продуктов его распада после прокатки. Особенно полезны такие температуры конца прокатки для низкоуглеродистых сталей, микролегированных ниобием (или ванадием и ниобием), так как выпадающие микрочастицы карбидов и карбонитридов этих элементов способствуют измельчению и упрочнению зерен феррита без потери пластичности.

При содержании углерода менее 0,02 % (сверхнизкоуглеродистые стали) аустенит распадается на феррит и третичный цементит. Если температура конца прокатки выше начала распада аустенита, то участки цементита располагаются на границах зерен феррита и блокируют их. При холодной деформации

свойства такого металла не пригодны для последующей холодной прокатки или штамповки. Путем деформации металла в двухфазной области цементит дробится и располагается внутри ферритных зерен, при этом металл упрочняется, а пластичность ферритной основы не снижается.

Для заэвтектоидных сталей (с содержанием углерода более 0,7 %) также заканчивают прокатку при температурах ниже начала распада аустенита, т. е. в области фазового перехода. Выделяющийся при распаде аустенита цементит располагается в виде сплошной сетки вокруг зерен перлита. Такие зерна становятся хрупкими, поэтому необходимо путем деформации в двухфазной области раздробить сетку хрупкого цементита и расположить его внутри зерен перлита.

Таким образом, для каждой марки стали температура конца прокатки металла после 12-й клетки стана строго задана. Температура на других участках стана тоже меняется в узких пределах. После черновых клетей температура должна быть равной примерно 1100 °С, толщина поката при этом равна 28–35 мм. Перед чистовой прокаткой температура должна приближаться 1000–1050 °С. Если прокатываются листы толщиной выше 5,0 мм, то заданная температура перед чистовой прокаткой достигается путем подстуживания раската на промежуточном рольганге. На НШПС промежуточный рольганг (на стане 2000 ЧерМК длиной 132 м, а на стане 2000 НЛМК — 200 м) — это не только транспортное средство, но и технологический агрегат для регулирования температурного режима прокатки. Время выдерживания раската для каждой толщины определяется статистическим путем.

При прокатке тонких листов в интервале толщин 2,0–1,2 мм температура перед чистовой прокаткой при естественном охлаждении оказывается ниже требуемой. Чтобы поднять ее, на промежуточном рольганге устанавливают дополнительные экраны, которые отражают лучистую энергию обратно на движущийся лист, замедляя его остывание. Таким способом можно поднять температуру раската на 70 °С.

Как видно, на современном стане при широком сортаменте производимой продукции выдерживать заданный температурный режим прокатки довольно сложно. Видимо, правы те специалисты, которые считают, что существующие и вновь строящиеся прокатные станы необходимо специализировать. Одни станы должны производить листы толщиной 1,2–6,0 мм, эти станы требуют средств по сохранению тепла при прокатке и должны быть оборудованы специальными стационарными экранами, установленными на промежуточном рольганге. На таких станах важной задачей будет снижение минимальной толщины полосы до 1,0–0,8 мм. Другие станы, прокатывающие лист толщиной от 6 до 16 мм, необходимо оборудовать специальными средствами для охлаждения раската на промежуточном рольганге. При увеличении мощности моталок можно увеличить максимальную толщину до 20–25 мм.

Требуемую температуру конца прокатки на существующих станах можно достигать путем регулирования температуры, степени и скорости деформации по клетям стана. Расчеты показывают, что перераспределение обжатий в чистовой группе клетей наиболее эффективно влияет на температуру конца прокатки. Но практические возможности изменения обжатий в чистовых клетях ограничены, хотя, как показывают расчеты, снижение обжатий в первых

и увеличение в последних чистовых пропусках существенно увеличивают температуру конца прокатки. На практике, наоборот, стремятся стабилизировать обжатия в чистовой группе клетей, а также температуру и скорости по клетям, чтобы обеспечить постоянные и высокие свойства листов внутри партии рулонов.

Все регулировки осуществляются в основном в черновой группе клетей. Температуру конца прокатки можно регулировать прежде всего за счет изменения режимов прокатки в этих клетях. Понятно, что с увеличением скорости прокатки в черновых клетях увеличивается температура раската, поступающего на промежуточный рольганг. Режим деформации в черновых клетях также влияет на эту температуру. Если ослабить обжатия в первых и увеличить в последних клетях черновой группы, то за счет дополнительного тепла, образующегося при переходе энергии деформации в тепловую, можно поднять температуру промежуточного раската. При обратном распределении обжатий можно сбросить “лишнюю” температуру. Меняя режим обжатия в черновых клетях, управляют температурой на промежуточном рольганге и температурой конца прокатки в пределах до 40 °С. Соответственно, изменяя толщину исходного сляба, поступающего в черновые клетки, можно управлять как режимом обжатия в черновых клетях, так и температурой промежуточного раската (до 70 °С).

Наличие непрерывной черновой группы на стане 2000 ЧерМК обеспечивает температуру раската за последней клетью на 40–60 °С выше, чем на стане 2000 НЛМК, что позволяет увеличить толщину подката перед чистовой группой на 5–10 мм. На стане 2000 НЛМК опытной прокаткой полос толщиной 1,5–2,5 мм показано, что увеличение толщины промежуточного раската с 25–27 до 32–36 мм дает прибавку к температуре конца прокатки на 20–40 °С. В Японии при прокатке полос толщиной выше 6 мм увеличивают эту толщину до 45–50 мм. При прокатке более тонких полос толщина промежуточного раската снижается.

Для регулирования температуры конца прокатки на стане 2000 ЧерМК применяют принудительное регулируемое охлаждение полосы при прокатке в чистовой группе клетей. На этом стане действует современная установка межклетевого ускоренного охлаждения (МКО), состоящая из системы струйных сопел, расположенных перед и после каждой чистовой клетки. Режим подачи воды на полосу рассчитывается на ЭВМ с использованием дифференциального уравнения теплопроводности по конкретным расчетным значениям температуры по клетям. Принудительное межклетевое охлаждение проката при заданной температуре конца прокатки при прокатке толстых полос (выше 5 мм) увеличивает производительность стана на 3–6 %, на более тонких полосах точнее осуществляется регулировка температуры. Применение АСУ ТП при использовании режима ускорения стана и принудительного межклетевого охлаждения позволяет стабилизировать температуру по длине раската, между полосами одной партии, температуры начала и конца прокатки и смотки. Эксплуатация системы показала, что на сталях 09Г2С, 17ГС, 10Г2С1 и др., которые должны иметь температуру конца прокатки не более 820–830 °С, колебания ее не превышают ±15 °С. Применение принудительного межклетевого охлаждения, а также общее повышение температуры металла в связи с применением непрерывной группы черновых клетей позволяют на стане 2000 ЧерМК

использовать толщину промежуточного раската на 3–5 мм выше, чем на аналогичном стане 2000 НЛМК.

На станах, применяющих технологическую смазку в чистовых клетях, также появляется возможность увеличить толщину промежуточного раската за счет как снижения давления на валки и увеличения обжатия во всех клетях, так и снижения тепловых потерь при контакте металла с валками. Однако применение смазки при прокатке на НШПС связано с организационными трудностями. Необходимо соответствующее оборудование, соответствующая система подачи смазки в очаг деформации и утилизации отработанной смазки, необходима компьютеризованная система управления этими системами. На рассматриваемом стане смазки применяются сравнительно редко, хотя опыты по прокатке со смазками разного состава проводились и показали высокую эффективность. Имеется богатый зарубежный опыт по разработке составов технологических смазок и использованию их при горячей прокатке листа на НШПС.

Большое количество исследований посвящено возможности управлять температурой конца прокатки с помощью гидросбивов. Установлено, что количество подаваемой воды на гидросбивах в черновых клетях (№ 1–3) практически не влияет на температуру раската на промежуточном рольганге и, следовательно, на температуру конца прокатки. Но режим подачи воды на гидросбиве после чистового окалиноломателя существенно отражается на температуре конца прокатки. Эти возможности используют, но они ограничены, так как есть опасность получить бракованную поверхность листа по окалине.

Листы сматываются на моталки при температурах ниже A_{c1} , после полного выделения избыточного феррита из переохлажденного аустенита. Если выделение феррита будет продолжаться в рулоне, то при разной скорости охлаждения наружных и внутренних витков рулона получится разная структура металла по длине листа. Конечные механические свойства металла сильно зависят от температуры смотки, поскольку она определяет кинетику распада аустенита после прокатки. Для сталей аустенитного класса температура смотки равна 800 °С, для мартенситных сталей — 700 °С, для ферритных — 650 °С. Требуемая температура смотки достигается путем регулирования на ламинарной душирующей установке, расположенной в виде трех блоков на отводящем рольганге стана, количества подаваемой воды на верхнюю и нижнюю поверхности листа и путем изменения скорости прокатки (скорости обдувания воздухом) листа.

Необходимо отметить, что температурный режим прокатки на стане можно выдержать только на базе автоматизированной системы управления прокаткой (АСУП) с помощью системы ЭВМ. На стане 2000 ЧерМК введена комплексная система управления технологическими параметрами прокатки, разработанная фирмой “Сименс” и позволяющая в автоматическом режиме или в режиме советчика осуществлять управление температурой, скоростью и обжатиями по клетям стана, при этом контролируются и другие параметры прокатки (усилия, моменты, токи якоря двигателей и пр.), осуществляется диагностика состояния оборудования. Имеются ЭВМ, управляющие режимами нагрева, охлаждения проката на душирующей установке, режимами смотки и пр. На станах предыдущих поколений установлены только локальные системы управления температурой прокатки, температурой смотки и другими технологическими параметрами.

16.4. Продольная разнотолщинность листа

Требования по точности горячекатаного листа, поставляемого в пакетах и в рулонах, отражены в ГОСТ 19903–74. По точности листы подразделяются на две группы: листы повышенной и нормальной точности (соответственно группы А и В). В зависимости от толщины и ширины они имеют различные допуски по толщине. Так, листы толщиной 1,8–2,0 мм при ширине 1500–2000 мм имеют допуски по толщине при повышенной точности $\pm 0,17$ мм и при обычной — $\pm 0,20$ мм. По требованию заказчика точность может быть повышена до $\pm 0,11$ мм. Естественно, с увеличением толщины и ширины листа допуски увеличиваются. Эти допуски отражают состояние технологии и возможности систем стабилизации параметров прокатки.

Очень высокие требования к горячекатаному листу предъявляются по продольной разнотолщинности (определения продольной разнотолщинности, допусков по разнотолщинности и допусков по толщине дано в разд. 15.8). На современных станах допускается продольная разнотолщинность $\pm 0,05$ мм на 80 % длины листа, что значительно жестче требований по ГОСТ 19903–74. При производстве электротехнического листа требования по продольной разнотолщинности могут быть более жесткими. На станах второго-третьего поколения продольная разнотолщинность достигает 0,1–0,2 мм (данные получены на станах 1680 завода “Запорожсталь” и стане 1700 завода им. Ильича в Мариуполе, Украина). С увеличением ширины полосы и по мере износа валков продольная разнотолщинность возрастает.

Рассмотрим основные факторы, определяющие продольную разнотолщинность при прокатке на НШПС.

16.4.1. Колебания натяжения

На станах третьего поколения и более ранних станах непрерывной была только чистовая группа клетей. Но при увеличении развеса сляба до 40 т количество черновых клетей увеличилось, и они также были собраны в непрерывную группу. Прокатка в непрерывных группах клетей проводится в следующем режиме натяжения полосы. Когда передний конец проходит через клетки, петлерегуляторы должны быть утоплены под рольгангом. Затем они поднимаются, образуя требуемый перегиб петли, и по силе, действующей на ролик петлерегулятора, устанавливается требуемое натяжение полосы. Аналогично при прохождении заднего конца листа через клетки петлерегуляторы убираются, и натяжение не регулируется. Таким образом, только около 80 % длины полосы прокатывается при регулировании натяжения, поэтому только на этой длине оговариваются жесткие и стабильные требования по продольной разнотолщинности.

При непрерывной прокатке необходимо соблюдать условие постоянства секундного объема в каждой клетке

$$V_i F_i = \text{const},$$

в чистовой группе клетей, когда уширением можно пренебречь:

$$h_i V_i = \text{const} = h_n V_n,$$

где h_i , V_i — соответственно толщина полосы и скорость прокатки в i -й клетке; n — номер последней чистовой клетки.

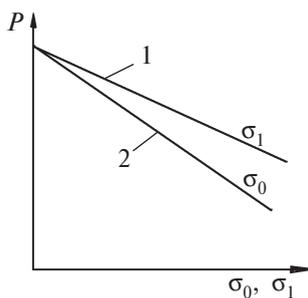


Рис. 16.3. Зависимость силы прокатки от переднего σ_1 и заднего σ_0 натяжения

Практически всегда h_n и V_n известны, и следовательно, определяется значение const. Так как прокатка ведется с небольшим натяжением, то константа точно не соблюдается, и каждая следующая клеть имеет скорость на 1–3 % больше, чем следует по значению const.

Известно, что с повышением натяжения полосы давление на валки и сила прокатки снижаются, причем заднее натяжение σ_0 более эффективно снижает давление, чем переднее σ_1 (рис. 16.3). Толщина полосы, выходящей из i -й клетки, связана с силой прокатки P уравнением Головина—Симса

$$h_i = S_i + \frac{P_i}{M_{ki}},$$

где S — зазор между валками; M_k — жесткость клетки.

Продифференцировав последнее уравнение, получим

$$dh_i = dP_i / M_k.$$

Сила прокатки P зависит от многих факторов. В данном случае нас интересует ее зависимость от переднего и заднего натяжения, которую можно записать в параметрическом виде:

$$P = f(\sigma_0, \sigma_1).$$

Продифференцировав это уравнение, получаем

$$dP = \frac{\partial P}{\partial \sigma_0} d\sigma_0 + \frac{\partial P}{\partial \sigma_1} d\sigma_1.$$

Частные производные $\frac{\partial P}{\partial \sigma_0}$ и $\frac{\partial P}{\partial \sigma_1}$ выражаются тангенсами наклона кривых 2 и 1. Колебания натяжения при прокатке $d\sigma_0$ и $d\sigma_1$ приводят к соответствующему изменению силы dP и толщины полосы dh . Чтобы стабилизировать натяжения, все современные НШПС снабжены системой автоматизированного регулирования натяжения (САРН), которое поддерживается в заданных пределах. Когда натяжение в одной клетке выходит за пределы допуска, следующая (или предыдущая) клетка начинает изменять скорость прокатки, чтобы вернуть натяжение к заданному значению. Следовательно, даже при наличии самой совершенной САРН натяжение полосы между клетями всегда изменяется в каких-то пределах. За счет этого поле допуска на продольную разнотолщинность перекрывается примерно на 20 %.

16.4.2. Температурный клин

Температурным клином называется изменение толщины полосы в результате того, что в i -й клетке прокатка от головы к хвосту полосы протекает в разное время. При идеально равномерном распределении температуры по

длине полосы перед прокаткой в момент прохождения через i -ю клеть температура головной части выше, чем хвостовой. По ходу прокатки температура в очаге деформации снижается, следовательно, растет сила прокатки, и по формуле Головина—Симса от головы к хвосту толщина полосы возрастает. Следует еще раз обратить внимание на следующее определение: температурным клином называется изменение толщины полосы, а не изменение температуры металла в очаге, хотя эти параметры между собой функционально связаны.

Чем длиннее полоса и меньше ее толщина, тем больше температурный клин и продольная разнотолщинность. Если не предпринимать мер борьбы с ней, то допуск на продольную разнотолщинность будет превышен в несколько раз. Поэтому на современных станах предусмотрено несколько возможностей устранить температурный клин.

Самым простым способом, применяемым на некоторых станах предыдущих поколений, является “косой” нагрев заготовки в печи. Если хвостовую часть сляба нагреть в печи выше, чем головную, причем правильно подобрать закон распределения температуры по длине сляба, то можно компенсировать температурный клин. Однако практическое использование этой идеи, например на стане 2500 ММК, показало, что в силу статистического разброса технологических параметров нагрева и прокатки температурный клин не всегда совпадает с характеристиками “косого” нагрева. Такой метод ненадежен.

Более надежно обрабатывает температурный клин система автоматизированного регулирования толщины, точнее, зазора между валками (САРТ). По формуле Головина—Симса при снижении температуры по ходу прокатки увеличивается слагаемое P/M_k , следовательно, для постоянства толщины h необходимо по такой же закономерности уменьшать зазор S между валками.

На станах третьего и четвертого поколения температурный клин обрабатывают за счет ускорения прокатки в чистой группе клетей. На стане 2000 ЧерМК в режиме ускорения может работать также черновая непрерывная группа клетей. При увеличении скорости прокатки сокращаются время контакта металла с валками и деталями стана, а также время излучения, что уменьшает потери тепла между пропусками и падение температуры конца прокатки металла.

С другой стороны, работа деформации, переходящая в тепло, способствует увеличению температуры металла между пропусками. За счет увеличения скорости прокатки от момента захвата до выхода полосы из валков можно разогреть хвостовую часть полосы и выравнять температурный клин. На современных станах за счет ускорения стана создают даже обратный температурный клин, т. е. обеспечивают такой тепловой баланс, когда при прохождении через последнюю клеть температура хвостовой части на 20–30 °С выше температуры головы. Такое распределение температур обеспечивает более равномерную температуру смотки листа на моталку и более равномерные конечные механические свойства его по длине.

Режим ускорения стана применяется после того, как передний конец полосы надежно захватывается моталками на заправочной скорости (не выше 10 м/с), поэтому фактический скоростной график прокатки в последней клетке стана достаточно сложен. Как минимум, на нем содержатся два участка (рис. 16.4) — участок прохождения переднего конца полосы на заправочной скорости от последней клетки до моталки и участок разгона стана до макси-



Рис. 16.4. Изменение скорости прокатки листа в последней клетке стана

мальной скорости V_{\max} с ускорением a , равным тангенсу наклона кривой разгона к горизонтали. Среднее ускорение стана $a = \operatorname{tg} \alpha = 0,04-0,07 \text{ м/с}^2$. Опыты и расчеты показывают, что для полной компенсации температурного клина необходимо переменное во времени ускорение, увеличивающееся к концу прокатки.

При прокатке тонких полос есть опасность того, что задний конец полосы при высоких скоростях будет сильно колебаться и при ударах о детали рольганга разлохмачиваться и даже разрываться. Поэтому к концу прокатки скорость прокатки снижают с некоторым замедлением: $b = \operatorname{tg} \beta$. При прокатке толстых полос участок замедления скорости отсутствует.

При прокатке тонких полос есть опасность того, что задний конец полосы при высоких скоростях будет сильно колебаться и при ударах о детали рольганга разлохмачиваться и даже разрываться. Поэтому к концу прокатки скорость прокатки снижают с некоторым замедлением: $b = \operatorname{tg} \beta$. При прокатке толстых полос участок замедления скорости отсутствует.

Заметим, что фактически наблюдаемые графики прокатки на реальном стане по разным причинам могут быть значительно сложнее. Но даже при самом сложном скоростном графике прокатки система автоматического регулирования натяжения должна обеспечивать стабильное натяжение между клетями, т. е. синхронное увеличение или замедление всех клетей непрерывной группы стана, чтобы поддерживать разнотолщинность полосы в жестких допусках.

Опыт показал, что частично температурный клин можно снизить за счет регулирования подачи воды на чистовом гидросбиве. По ходу прокатки температура в очаге деформации падает, поэтому необходимо снижать количество подаваемой воды от головы к хвосту раската. Однако возможности такого регулирования ограничены, так как необходимо обеспечить надежное удаление окалины с поверхности листа, поэтому расход воды на чистовом гидросбиве всегда близок к максимальному.

Оригинальным и эффективным способом устранения температурного клина является применение койлбокса. Койлбокс — это мощная напольная моталка, на которую сматывается промежуточный раскат толщиной 28–35 мм после черновой группы клетей. Затем с моталки лист задним концом подается в чистовую группу клетей. При такой технологии прокатки температурный клин, появившийся в черновой группе клетей, компенсируется обратным температурным клином в чистовой группе. Койлбокс интересен также тем, что позволяет значительно укоротить промежуточный рольганг и длину всего цеха. При этом уменьшается стоимость стана и здания. Кроме того, намотанный на моталку металл меньше теряет температуру, поэтому по температурному режиму проходит прокатка более тонких листов, чем на стане с длинным промежуточным рольгангом. Не требуются дополнительные экраны на промежуточном рольганге.

Койлбокс, установленный на стане 2800/1700 комбината ЧерМК, показал высокую эффективность его работы. Впервые койлбокс установлен в 1984 г. на ШПС 2000 в Канаде. Применение койлбокса на этом стане позволило сократить длину цеха на 40–60 м, уменьшить капитальные затраты на 6 %, энергетические затраты за счет отказа от режима ускорения — до 40 %, применить

более тяжелые слябы, увеличить температуру конца прокатки. Однако прокатка с койлбоксом снижает общую скорость прокатки и увеличивает цикл прокатки, поэтому на станах с большой производительностью, таких как стан 2000 ЧерМК, койлбоксы применять не рекомендуется.

16.4.3. Неравномерность температуры по длине раската

Рассмотренный выше температурный клин не связан с неравномерной температурой металла по длине раската. Неравномерность температуры по длине сляба возникает при нагреве металла. С одной стороны, возможен произвольный “косой” нагрев, который образуется при неправильном расположении горелок в печи или при неправильном тепловом режиме их работы, с другой — причиной неравномерного нагрева могут служить конструктивные особенности нагревательной печи. Например, при прохождении сляба в печи по глассажным трубам, охлаждаемым изнутри водой, на нем остаются захлаженные участки — “глассажные метки”. Естественно, при прокатке этих участков полоса будет толще, чем на остальной длине, поскольку сила прокатки выше. Такое утолщение пройдет по всем клетям стана, так как обжатие и сила прокатки на утолщенных участках повышаются, и по формуле Головина—Симса разнотолщинность полосы останется во всех клетях. При этом, как показали исследования, относительная разнотолщинность Δ_i/h_i по клетям остается примерно постоянной.

На готовом листе “глассажные метки” могут давать разнотолщинность до 0,05–0,08 мм. Чтобы избавиться от “глассажных меток”, с одной стороны, необходимо совершенствовать конструкцию печи. Например, полезно расположить глассажные трубы в шахматном порядке, тем самым распределив “глассажные метки” по всей поверхности сляба. В методических печах с шагающими балками, как на стане 2000 ЧерМК, “глассажных меток” не бывает.

Разнотолщинность, вызванную неравномерностью температуры по длине сляба, на современных станах устраняют также с помощью системы автоматического регулирования зазора между валками (САРТ).

16.4.4. “Всплывание” подшипников

В клетях кварто опорные валки имеют подшипники жидкостного трения, которые принципиально состоят из двух колец (рис. 16.5). На шейку валков надето внутреннее кольцо подшипника, наружное кольцо закреплено в подушке. В зазор между кольцами подается под давлением смазка, обозначенная серым цветом. Когда скорость валков мала, то под силой P слой смазки продавливается, и кольца соприкасаются (см. рис. 16.5, а). С увеличением скорости смазка увлекается в клиновидный зазор между кольцами, и давление в этом слое возрастает. При определенной скорости оно превосходит давление металла на валки, валки “всплывают”, и кольца перестают касаться друг друга (см. рис. 16.5, б). При этом расстояние между валками и толщина полосы уменьшаются. Поскольку скорость вращения валков при прокатке постоянно меняется, то за счет “всплывания” валков на полосе появляется

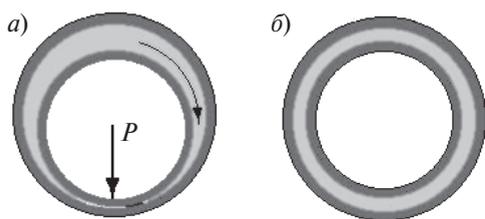


Рис. 16.5. Зазор между кольцами подшипника при малой (а) и большой (б) скоростях прокатки

ко толщиной масляной пленки в подшипниках, но и изменениями условий трения, сопротивления деформации металла и силы прокатки.

16.4.5. Биение валков

При перешлифовке валков их шейки вращаются в так называемых люнетах. На самых точных вальцешлифовальных станках точность настройки люнетов равна $\pm 0,05$ мм. Следовательно, на такую величину могут не совпадать центры окружностей бочки и шейки валка при шлифовке (рис. 16.6). Такие валки при прокатке за один оборот создают синусоидальную разнотолщинность с амплитудой до $\pm 0,05$ мм.

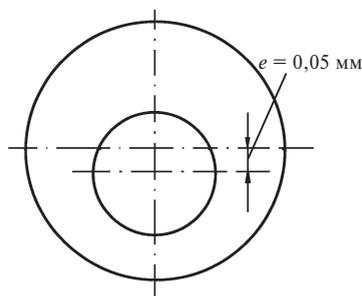


Рис. 16.6. Эксцентриситет при перешлифовке валков

При прокатке в нескольких клетях эти синусоиды накладываются друг на друга, создавая сложную картину изменения разнотолщинности по длине полосы. Для всех рассмотренных выше причин разнотолщинности найдены эффективные решения их устранения, и с помощью систем САРТ и САРН, а также системы ускорения стана разнотолщинность практически устраняется полностью. Но эффективных методов борьбы с разнотолщинностью, создаваемой биением валков, не найдено. Техническими условиями, по существу, зафиксировано данное состояние вопроса о разнотолщинности: на листах, предназначенных для дальнейшей холодной прокатки, на которых на 80 % длины допускается продольная разнотолщинность $\pm 0,05$ мм, это значение определяется в основном биением валков.

16.4.6. Режимы прокатки и регулирования толщины

На продольную разнотолщинность влияет режим прокатки металла. Исследования, проведенные на ряде станов, показали, что максимальная продольная разнотолщинность наблюдается в первых клетях непрерывной группы, в последних клетях она выравнивается. Уменьшение обжатий в последних и увеличение в первых клетях способствуют выравниванию полосы по длине.

Увеличение суммарного обжатия в чистовой группе также способствует снижению разнотолщинности, но возможности варьирования обжатиями здесь ограничены, так как связаны с температурой конца прокатки.

Большую долю в общую разнотолщинность вносят концевые участки полосы. Так как передний и задний концы полосы длиной 80–100 м прокатываются без натяжения, то толщина их на 0,15–0,25 мм выше, чем середины. Температура прокатки заднего конца при работе без ускорения бывает на 60 °С и более ниже температуры переднего конца, при этом продольная разнотолщинность может достигать даже 0,5 мм (данные стана 1700 КарМК). Эти участки должны прокатываться при дополнительном поджатии валков с помощью САРТ.

Разнотолщинность полосы зависит также от принципа работы САРТ полосы. Наиболее простым является программное, т. е. жесткое, автоматическое регулирование толщины. Такое регулирование проводят либо по всей полосе, либо только при прокатке концов, прежде всего заднего. Система опробована на действующих станах и позволила значительно снизить продольную разнотолщинность. Однако работа по жесткой программе ненадежна.

Институтом проблем управления была разработана более гибкая система регулирования толщины по самоустанавливающейся программе. В основу работы системы положен следующий принцип. Кривую разнотолщинности полосы можно представить как сумму двух функций, первая из которых характеризует закономерную составляющую продольной разнотолщинности, а вторая — случайную составляющую, обусловленную случайными отклонениями от штатной технологии. Программа также состоит из двух частей. Первая жестко отрабатывает закономерную часть кривой, которая строится на основании статистической обработки кривых разнотолщинности многих полос, а вторая ее корректирует. Команды на корректировку обжатий могут поступать от различных датчиков.

В качестве датчика может выступать измеритель температуры металла. Перед клетью измеряется фактическая температура металла, и по определенным формулам вычисляется толщина полосы на выходе из клетки и формируется управляющий сигнал на нажимные винты. Такая система была применена на стане 1450 ММК, однако она оказалась малоэффективной и сложной. Более надежным сигналом является сила прокатки. Системы, работающие в функции от силы прокатки, чаще всего и применяются в САРТ. Недостатком такого датчика является то, что измеренная сила, полученная в i -й клетке, может быть использована для регулировки зазора только в $(i + 1)$ -й клетке. При таком запаздывании системы не всегда следуют точные установочные зазоры по клетям. Лучше было бы использовать в САРТ данные измерения толщины перед каждой клетью, однако надежных толщиномеров, способных работать в пространстве между клетями, не существует. На их работе сказывается температура прокатки, наличие охлаждающей жидкости между клетями, сложная работа петлерегуляторов и т. д. На станах горячей прокатки толщиномер установлен лишь за последней клетью, и сигнал его используется только для корректировки моделей, заложенных в основу работы САРТ.

16.5. Поперечная разнотолщинность листа

Определение поперечной разнотолщинности приведено в разд. 15.8. Там же указано, что на практике поперечную разнотолщинность определяют не так, как требуется по теории статистики, а по формуле (15.1).

Требования к горячекатаному листу по поперечной разнотолщинности еще выше, чем по продольной. Они исходят от требований к холоднокатаному листу, для которого исходной заготовкой являются рулоны горячекатаного листа. Современные НШПС обеспечивают поперечную разнотолщинность в пределах $\pm 0,03 \dots \pm 0,05$ мм. На станах предыдущего поколения (стан 1700 КарМК и др.) фактическая поперечная разнотолщинность достигает 0,07–0,08 мм, что и зафиксировано в ГОСТ 19903–74.

При горячей прокатке на НШПС с поперечной разнотолщинностью связаны такие виды брака, как волнистость и коробоватость, которые вместе образуют неплоскостность листа. На рис. 16.7 показаны статистические данные по видам брака экспортного листа, прокатанного на стане 2000 ЧерМК за 9 мес. 2002 г. Видно, что брак по неплоскостности является основным.

Волнистость возникает при прокатке в последних чистовых клетях, т. е. при толщинах полосы ниже 5–6 мм. Если на некотором участке по ширине полоса получает большее обжатие, чем соседние участки, то этот участок больше вытягивается, и “лишний” металл собирается в виде гофров, полоса приобретает волнистость по длине. Волнистость может располагаться как посередине листа, так и по кромкам. По длине листа волнистость может иметь постоянную амплитуду и постоянный шаг. Однако нередко по длине волна либо затухает, либо, наоборот, возрастает.

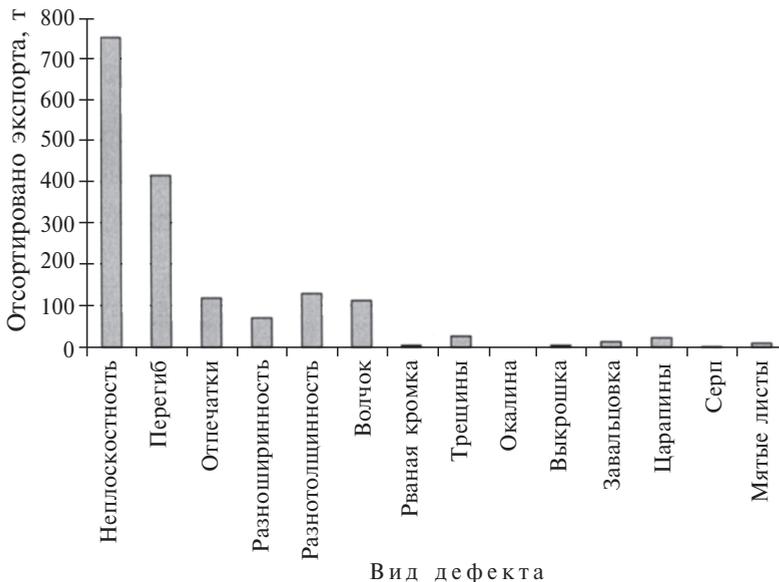


Рис. 16.7. Статистические данные по видам брака на стане 2000 ЧерМК

Коробоватость можно рассматривать как особую разновидность волнистости. Короб — это одновременно продольная и поперечная волна на некотором участке листа. Неровный участок, обычно эллиптической формы в плане, выпучивается над остальной поверхностью листа. Коробоватость периодически повторяется по длине листа, чередуясь с нормальными планшетными участками. Обычно коробоватость располагается посередине листа. Часто расстояние между “коробами” небольшое, поэтому иногда трудно отличить коробоватость от волнистости. На практике часто любую волнистость посередине листа называют коробоватостью, а по кромкам — волнистостью. Во избежание волнистости и коробоватости высотная деформация листа по ширине должна быть одинаковой, щель между валками при прокатке — равномерной.

Ранее мы установили основные факторы, определяющие форму щели при прокатке. При прокатке на НШПС эти факторы те же самые: прогиб валков, температурный профиль валка, износ валков и профилировка валков. Как и на толстолистовых станах, общий прогиб определяется прогибом опорных валков. Станочная профилировка валков, формируемая на шлифовальном станке, компенсирует прогиб и температурное расширение валков при прокатке. Так как изгиб валков зависит от силы прокатки, а последняя непостоянна при прокатке листов разных размеров, то в каждом пропуске изгиб корректируется с помощью автоматической системы изгиба, осуществляющей дополнительный изгиб рабочих и опорных валков в зависимости от силы прокатки. Для стабилизации температурного профиля валков перед завалкой в клеть их разогревают в специальных печах по закону, который устанавливается при стабильной прокатке, т. е. при 70–80 °С в средней части валка и 20 °С на концах длиной 200 мм. При простоях стана остывшие валки разогревают с помощью специальных горелок.

Существенное влияние на разнотолщинность оказывает износ валков. Компенсировать его полностью с помощью системы изгиба не удастся, поэтому через определенное количество прокатанного металла валки меняют и отправляют на перешлифовку. На разных станах частота смены валков устанавливается на основе статистического анализа износа. На стане 1680 Запорожстали рабочие валки меняют через каждые 4–6 ч, на многих заводах смену валков приурочивают к пересменкам (через 8 ч), когда осуществляется планово-предупредительный осмотр стана. Опорные валки изнашиваются значительно медленнее, их переваливают примерно два раза в месяц. Как и при толстолистовой прокатке, для равномерности износа по длине бочки прокатку широких полос планируют на начало кампании валков, по мере накопления износа ширина проката уменьшается.

Фактический профиль валка в процессе прокатки определяется не только станочной профилировкой, но и износом валков. При тонколистовой прокатке на форму щели между валками оказывает влияние также ряд факторов, роль которых при толстолистовой прокатке была незначимой. Это упругие составляющие профиля валков. Пусть конфигурация щели между валками, определяемая станочной профилировкой, описывается некоторой функцией S , изменяющейся по ширине валка. Упругие составляющие деформации валков на ширине прокатываемой полосы складываются из дополнительных деформаций изгиба рабочих валков $y_{\text{изг}}$ (не учтенных станочной профилировкой), совместного уп-

ругого сжатия рабочих и опорных валков в месте их контакта $y_{сж}$ и упругого сплющивания рабочих валков в зоне их контакта с полосой $y_{спл}$. Если суммарный профиль полосы по ширине представить функцией y , то он описывается выражением

$$y = S + И + y_{изг} + y_{сж} + y_{спл}. \quad (16.1)$$

На новых валках (после перешлифовки), когда износ $И = 0$, неравномерность деформации по ширине при горячей прокатке тонких полос обычно не превышает 5 %, поэтому можно пренебречь неравномерностью упругого сжатия валков $y_{сж}$. Кроме того, при горячей прокатке неравномерность по ширине упругого сплющивания рабочих валков также невелика, и само упругое сплющивание проявляется только при прокатке тонких полос (менее 2 мм). Можно считать $y_{спл} = 0$. Подавляющая часть величины $y_{изг}$ обычно компенсируется исходной профилировкой валков, а также системой дополнительного изгиба валков. Нескомпенсированная часть составляет не более 5 %. Таким образом, на новых после перешлифовки валках все упругие составляющие незначительны, и поперечная разнотолщинность практически полностью определяется составляющей станочной профилировкой S , которая выполнена с учетом составляющей $y_{изг}$.

Но на изношенных валках (рабочих или опорных) картина резко меняется. Сам износ валков $И$ может вносить до 25–35 % в суммарную поперечную разнотолщинность. Кроме того, резко изменяется эпюра распределения давления по ширине полосы и по длине валков в месте их контакта. За счет этого резко увеличиваются упругие составляющие деформации валков $y_{изг}$, $y_{сж}$ и $y_{спл}$. Суммарная поперечная разнотолщинность будет складываться из станочной профилировки S , всех упругих составляющих и кривой износа валков. Если посчитать разнотолщинность без учета упругих составляющих, то ошибка может достигать 50 %. По той же причине на валках, имеющих непрямолинейную конфигурацию бочки исходных (новых) валков, разнотолщинность выше, чем на цилиндрических валках.

Большое влияние на поперечный профиль полосы оказывает положение полосы в валках при прокатке. Смещение раската от середины валков приводит к разной толщине полосы по кромкам. Толще та кромка, куда смещается полоса при прокатке. Исследования, проведенные на стане 1700 завода им. Ильича, показывают, что смещения достигают 50 мм и превышение толщины одной кромки над другой достигает 0,07 мм. Смещение полосы наибольшее на концах полосы, которые проходят через клетки при отсутствии натяжения. Эта часть полосы может попасть в станину. Неравномерное смещение по длине полосы опасно также тем, что при смотке полосы в рулон возникает такой брак, как телескопичность.

Для уменьшения бокового смещения полосы при прокатке применяют центрирующую профилировку валков, т. е. профилировку, обеспечивающую в момент прокатки вогнутую форму активной образующей рабочих валков. После прокатки в таких валках полоса будет иметь толщину в середине больше, чем по кромкам. Такая форма полосы напоминает чечевицу, а абсолютная поперечная разнотолщинность, характеризующая превышение размера полосы посередине к размерам по кромкам, называется чечевицей. Чечевица измеряется в милли-

метрах. На НШПС 2000 допустима конечная чечевица до 0,05 мм, следовательно, такая же вогнутость активной образующей валков допустима в последней n -й клетки стана. В остальных клетях чечевица вычисляется из условия равенства вытяжек по ширине полосы. Допустим, в i -й клетки чечевица равна δ_i , тогда толщина полосы в середине и по кромкам листа равна соответственно $h_i + \delta_i$ и h_i . В $(i + 1)$ -й клетки должно выполняться условие равенства вытяжек:

$$\frac{h_{i+1} + \delta_{i+1}}{h_i + \delta_i} = \frac{h_{i+1}}{h_i}.$$

Путем несложных преобразований, учитывая, что без учета уширения отношение высот равно вытяжке полосы, можно получить два равенства:

$$\frac{\delta_{i+1}}{h_{i+1}} = \frac{\delta_i}{h_i} \quad (16.2)$$

и

$$\delta_i = \delta_{i+1} \lambda_{i+1}. \quad (16.3)$$

Из первого равенства следует, что условием планшетности листа при прокатке является равенство относительной разнотолщинности по всем клетям стана. Отклонение от этого условия вызывает непланшетность листа. Второе равенство показывает закономерность изменения допустимой абсолютной разнотолщинности по клетям. Если в последней клетке допустима разнотолщинность $\delta_n = 0,05$ мм, то в предыдущих клетях чечевица δ_i возрастает пропорционально вытяжкам, вогнутость валков от последней клетки к первым быстро нарастает.

Таким образом, от рассмотренной выше станочной профилировки валков перед началом перешлифовки необходимо отнять составляющую δ_i . Это позволит уложиться в требуемые допуски по разнотолщинности конечной полосы и обеспечить устойчивость при прокатке во всех клетях. Суммарный станочный профиль вала i -й клетки описывается функцией

$$W_i = S_i - \delta_i.$$

Суммарная профилировка валков при этом, как правило, оказывается отрицательной, т. е. вогнутой.

Такую концепцию профилировки валков впервые реализовали на стане 1700 завода им. Ильича (г. Мариуполь). В настоящее время ее используют на всех станах. Обычно профилируют только один рабочий валок, второй оставляют цилиндрическим. Иногда профилируют оба рабочих валка. Например, на стане 2000 ЧерМК в черновой группе клетей оба рабочих валка имеют вогнутый профиль $-0,1$ мм. В чистовой группе профили верхних рабочих валков таковы: $-0,55$; $-0,5$; $-0,35$; $-0,25$; $-0,25$; $-0,35$; $-0,25$, а профили нижних валков $-0,55$; $-0,5$; $-0,35$; $-0,25$; $0,00$; $0,00$; $0,00$. Как видно, рабочие валки во всех клетях вогнутые, кроме нижних в трех последних клетях. Такая профилировка обеспечивает на новых валках центрирование полосы при прокатке и не выводит полосу из допусков по разнотолщинности. Следует учесть, что на станах обычно валки чистовой группы клетей меняют не все сразу, а по соответствующему графику. Следовательно, в каких-то клетях остаются частично изношенные валки, для которых составляющая $(И + y_{изг} + y_{сж} + y_{спл})$ существенна.

16.6. Изменение ширины полосы при прокатке

Ширина полосы при горячей прокатке на НШПС может как увеличиваться за счет уширения, так и уменьшаться за счет неравномерной высотной деформации и утяжки. В черновой группе на уширение оказывают влияние поперечный и продольный профиль исходного сляба, режим обжатия в горизонтальных и вертикальных валках, профилировка валков и другие условия прокатки.

Катаные слябы, полученные на слябингах, имеют, как мы знаем, непрямоугольную форму. По боковым кромкам имеются наплывы, т. е. утолщения, составляющие 15–18 % от общей толщины. Обычно они находятся в пределах 8–18 мм, но в отдельных случаях могут достигать 30 мм. Кроме того, из-за износа валков слябинга слябы могут иметь утолщение в средней части по ширине на 3–4 мм (данные слябинга завода им. Ильича, г. Мариуполь). С ростом ширины сляба боковые наплывы уменьшаются, а поперечная разнотолщинность к середине возрастает. На рис. 16.8 приведена форма поперечного сечения реального сляба, произведенного на указанном слябинге. Такая форма сляба не может ни сказываться на условиях деформации на НШПС. Заметим, что при использовании литых слябов в первой вертикальной клетке НШПС, предназначенной для разрыхления окалины, также образуются наплывы, поэтому в общих чертах после вертикальных пропусков литые и катаные слябы имеют примерно одинаковую форму.

При прокатке слябов с наплывами в черновой группе клетей наблюдается большая неравномерность деформации по ширине. Это усугубляется также профилировкой и износом валков черновых клетей. Получая повышенное обжатие, наплывы устремляются в ширину, создавая вынужденное уширение. Дополнительное уширение при этом по сравнению с уширением плоских слябов примерно равно высоте наплывов. Но наряду с вынужденным уширением при прокатке в черновой группе клетей может протекать прямо противоположный процесс — утяжка полосы по ширине. Если сляб прокатывается на сильно изношенных валках слябинга, то средняя часть сляба имеет значительное утолщение. При прокатке утолщенных в середине слябов более высокая степень обжатия на среднем участке вызовет утяжку полосы по ширине.

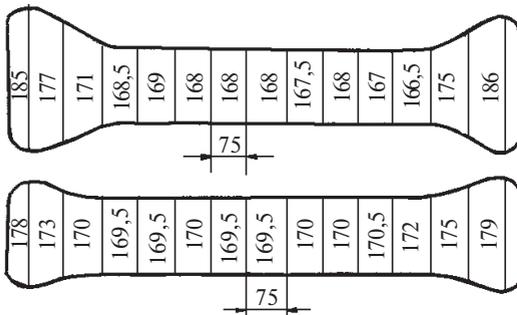


Рис. 16.8. Форма поперечного сечения катаного сляба

Такая же ситуация может возникнуть и при прокатке на широкополосном стане. Так как на стане назначают разное время перевалки валков черновой группы, то возможна ситуация, когда черновая клеть, например № 2, имеет изношенные, а следующая клеть № 3 — новые валки. Тогда после второй клетки полоса приобретет чечевицеподобную форму, прокатка которой в следующей клетке приведет к утяжке полосы. Таким образом, в черновых клетях воз-

можны различные сочетания этих процессов, и в результате прокатки в черновых клетях сляб может как ушириться, так и заузиться. На стане 1700 завода им. Ильича наблюдали оба процесса. По мере утонения полосы эти процессы затухают, и в чистовой группе клетей они почти отсутствуют.

На широкополосных станах ширина конечной полосы непостоянна по ее длине. Известно, что на широких полосах в черновых клетях концы расширяются в силу отсутствия “жесткого” конца с одной стороны. В чистовых клетях причиной уширения концов может быть отсутствие натяжения при прохождении их через клетки. По данным стана 1700 уширение концов при прокатке без натяжения может составлять 3–5 мм, иногда достигать 10 мм по сравнению с серединой. Колебания натяжения, связанные с работой петлерегуляторов, также сказываются на ширине полосы. Колебания ширины полосы возможны также между листами в пределах одной партии проката. Они могут достигать 10–15 мм.

Некоторые клетки черновой группы выполнены универсальными, т. е. имеют вертикальные валки. На таких станах обычно рекомендуют выбирать ширину сляба примерно равной ширине готового листа. При прокатке широких листов ширина сляба может быть больше ширины листа на 10–20 мм. Но с увеличением обжатия в вертикальных валках образуются наплывы. Кроме того, обжатия в вертикальных валках ограничены из-за уширенных концов раската. Обычно обжатия в вертикальных валках находятся на уровне 2 %, которых недостаточно для выравнивания ширины полосы по длине.

Пути стабилизации ширины полосы при прокатке на НШПС вытекают из изложенного. В чистовой группе клетей необходимо совершенствовать работу системы регулирования натяжения. В черновой группе клетей разноширинность можно регулировать за счет выбора оптимальных размеров сляба, установления правильного графика перевалки валков, назначения правильной профилировки черновых рабочих валков, а также выбора оптимального режима обжатия в горизонтальных и вертикальных валках.

16.7. Контролируемая прокатка на НШПС

подавляющее количество горячекатаного листа производится из низкоуглеродистых и низколегированных (малоперлитных) марок стали. Большинство из них реализуют свои максимальные эксплуатационные свойства только после контролируемых режимов прокатки и охлаждения.

Значительные усовершенствования конструкции НШПС, оснащение их мощными моталками, усовершенствование системы подачи воды на промежуточном рольганге, в межклетевом пространстве и на душирующей установке позволили приступить к прокатке высокопрочных сталей, в том числе для газопроводных труб большого диаметра. В России и за рубежом для таких сталей используют также режимы контролируемой прокатки.

ТМО получила особенно широкое распространение в Японии. Существуют две разновидности ТМО: в линии широкополосного стана и вне ее. После ТМО горячекатаная полоса толщиной менее 1,5 мм практически не уступает по механическим свойствам холоднокатаному листу, предназначенному для штамповки и глубокой вытяжки. После снятия окалина такие листы могут

заменить значительное количество дорогого холоднокатаного листа. Толстые листы (более 6 мм), полученные на ШПС с применением режимов ТМО, имеют пониженную стоимость, более высокое качество поверхности и обеспечивают более высокую производительность по сравнению с листами, полученными по традиционной технологии на толстолистовом стане.

Японская фирма Nippon Kokan предложила добавить в линию стана после чистовых моталок оборудование для ТМО. Оно включает размотыватель рулонов, установку для механической очистки поверхности листа от окалины, проходную печь с безокислительной атмосферой для нагрева листа до 600–1000 °С, 4-валковый стан горячей прокатки, установку для регулируемого охлаждения со скоростью до 40 °С/с, роликовую правильную машину, установку для охлаждения до температур ниже 500 °С, дрессировочный стан и моталку — в сущности, дополнительный дорогостоящий прокатный комплекс. После прокатки в чистовой группе основных клетей температура конца прокатки 910 °С и после смотки 600 °С. В дополнительных клетях возможна теплая прокатка листа при 600 °С с последующим рекристаллизационным отжигом при 850 °С в течение 5 мин и режимным охлаждением ниже 500 °С. Для сталей типа 09Г2СФБ на дополнительном оборудовании можно применять самые разнообразные режимы контролируемой прокатки (например, температура конца прокатки в чистовых клетях 900 °С, прокатка в дополнительных клетях с обжатием не менее 40 % при температуре 730 °С с последующим режимным охлаждением).

Лабораторные исследования, проведенные в России (в МИСиС и др.), показывают, что теплая прокатка при температуре 400 °С с обжатиями 40 % и выше значительно повышает механические свойства сталей типа 08кп и 08Ю, а после отжига такого листа штампуемость выше, чем у холоднокатаного листа.

Фирма Sumitomo (Япония) предложила процесс, совмещающий контролируемую прокатку с последующей термической обработкой листа. Для малоperlитных сталей осуществляется первая горячая прокатка на промежуточный размер, затем ускоренное охлаждение до температур ниже 500 °С, после чего следует повторный нагрев до температуры $A_{c3} + (30–50)$ °С и прокатка на заданный размер при окончании прокатки в двухфазной области с последующим охлаждением на воздухе. При такой обработке реализуются четыре эффекта: измельчение зерна, дисперсионное упрочнение, наклеп и упрочнение за счет фазовых превращений. Первый из них способствует получению высокой вязкости, остальные три используются для упрочнения стали. Листовая сталь, %: С 0,06, Si 0,26, Mn 1,46, Nb 0,03, V 0,08, обработанная по данной технологии, помимо высокой вязкости при низких температурах, обладает повышенной однородностью свойств, высокой свариваемостью и достаточно дешева.

Малоperlитные стали типа 09Г2СФ, 08Г2СФБ, 10Г2Ф и др. используются и в России, в основном для производства труб, работающих в северных широтах. Для спиралешовных труб диаметром 1420 мм производят лист повышенной вязкости и хладостойкости на станах 2000 НЛМК и ЧерМК из стали 09Г2СФ. Рекомендуются температура конца прокатки 850–820 °С и температура смотки 550–580 °С. Однако при таких режимах увеличивается расход энергии на 30 % и падает производительность на 15–30 %, а также ухудшаются показатели по планшетности листа по сравнению с обычными режимами прокатки.

На ОАО “Северсталь” разработана технология контролируемой прокатки трубных сталей класса прочности К60. Рассмотрим ее подробнее.

Современная металлургическая концепция производства высокопрочных хладостойких трубных сталей сводится к снижению содержания углерода, дополнительному легированию хромом, никелем, медью и молибденом, а также к микролегированию ванадием и ниобием. Снижение углерода до 0,04–0,07 % улучшает свариваемость и формуемость труб, обеспечивает повышение ударной вязкости, уменьшает нагрузки на оборудование. Но при уменьшении углерода прочность стали снижается, поэтому ее необходимо повысить за счет легирования элементами Cr–Ni–Cu. При этом также повышается устойчивость аустенита, и при его распаде (охлаждении) образуется ферритно-бейнитная структура вместо ферритно-перлитной (рис. 16.9). Легирование ниобием расширяет диапазон контролируемой прокатки, повышая температуру начала рекристаллизации. После смотки рулона выпадают мелкодисперсные частицы карбонитридов ниобия, упрочняющие зерна и их границы.

Таким образом, контролируемая прокатка трубных сталей на НШПС представляет сочетание следующих операций:

Нагрев до максимальных температур 1220–1250 °С для полного растворения карбонитридов микролегирующих элементов, которые полностью будут использованы после их выпадения в процессе смотки.

Черновая прокатка аустенита с большими обжатиями, в результате чего измельчается зерно аустенита. Наличие Nb в количестве 0,06–0,08 % повышает температуру торможения рекристаллизации T_p до 1020–1040 °С, поэтому тем-

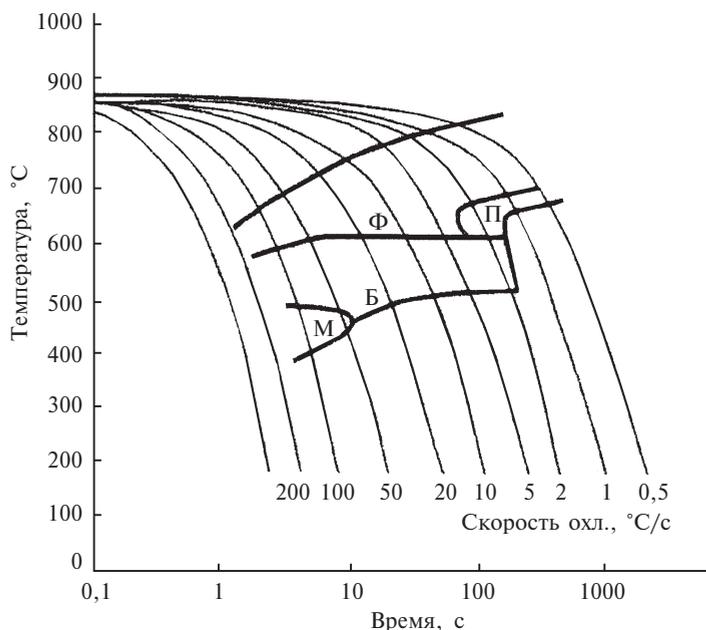


Рис. 16.9. Термокинетическая диаграмма распада аустенита после деформации стали, %: С 0,6, Мн 1,6, Мо 0,2, Nb 0,07

пература конца черновой прокатки должна быть не ниже этих температур. Торможение рекристаллизации осуществляется также другими элементами, находящимися в твердом растворе (Ti, Mo, V). Основная цель черновой прокатки — заложить основу мелкозернистой равномерной структуры и обеспечить полную рекристаллизацию металла.

Чистовая прокатка должна обеспечить такую структуру. Здесь при сравнительно низких температурах — близких к T_p — необходимо обеспечить высокую степень деформации (> 70 %) нерекристаллизованного аустенита. При этом зерна аустенита приобретают оладеобразную форму и имеют полосы деформации в зернах, что позволяет получить большое число центров зарождения зерен феррита. При высокой скорости прокатки, характерной для НШПС, карбонитриды полностью сохраняются в аустените в виде раствора, что играет важную роль в торможении рекристаллизации аустенита. При хорошей проработке нерекристаллизованного аустенита образуется много центров новой фазы и, как следствие, обеспечивается высокая ударная вязкость при низких температурах и возрастает доля волокнистой составляющей на образцах при испытании падающим грузом (ИПГ или DWTT). Но при низкой температуре начала прокатки в чистовых клетях из раствора частично выделяются карбонитриды Nb, что снижает их эффективность при смотке. Температура конца прокатки во всех случаях должна быть в аустенитной области для обеспечения равномерности механических свойств по длине и ширине листа.

Операции душирования и смотки играют решающую роль при формировании конечных свойств металла. Правильный выбор температуры конца прокатки $T_{к.п}$, температуры начала душирования, режима душирования и температуры смотки $T_{см}$, а также график распределения $T_{см}$ по длине полосы в рулоне позволяют добиться требуемой задержки начала превращения и образования мелкозернистого бейнита и феррита. Такая структура вместе с дисперсионным упрочнением карбонитридами Nb обеспечивает высокую прочность и пластичность стали. Увеличение скорости охлаждения на отводящем рольганге способствует измельчению зерна, повышению прочности и вязкости стали. Путем изменения $T_{см}$ можно получать самую разную конечную структуру металла — ферритно-перлитную, ферритно-перлитно-бейнитную или ферритно-бейнитную — в соответствии с термокинетической диаграммой (см. рис. 16.9).

Размер карбонитридных выделений V и Nb влияет на свойства стали. Оптимальный размер выделений составляет 2–5 нм, они получаются при $T_{см} = 500–600$ °С. При более высоких температурах происходит огрубление и уменьшение дисперсности частиц. При более низких температурах процесс их выделения затормаживается. В обоих случаях прочность стали снижается. Для стали класса К60 выбрана $T_{см} = 530–580$ °С. Конкретная температура назначается в зависимости от класса прочности, толщины полосы и температурных границ фазовых превращений. Максимальные значения прочностных характеристик были достигнуты на стали с 0,22 % Мо и имевшей структуру игольчатого феррита. Введение 0,2 % Ni (при низкой температуре задачи полосы в чистовые клетки) обеспечивает высокую ударную вязкость и высокую хладостойкость (на образцах KCV при $T = -20$ °С доля вязкой составляющей при ИПГ составляет 100 %). Добавление 0,2 % Cr увеличивает долю бейнита, устраняет площадку текучести и уменьшает отношение σ_{02}/σ_B , что важно для штампуемых сталей.

Сильное измельчение зерна имеет один недостаток — приводит к увеличению отношения σ_{02} / σ_B . Этого можно не допустить при мягкой ферритной фазе за счет расширения прочной бейнитной области на термокинетической диаграмме — путем легирования стали элементами Cr + Ni + Cu в количестве до 0,6 % (суммарно), Mo в количестве 0,2–0,3 % и повышением содержания Nb.

На НЛМЗ методом планируемого эксперимента выбрали оптимальные температуры конца прокатки и смотки для получения максимальных прочностных характеристик листов разной толщины из стали 09Г2С при высоком уровне пластичности. На стане 2000 ЧерМК проведена опытная прокатка ряда низколегированных марок стали по различным технологическим вариантам в целях изучения вклада каждого из технологических параметров в формирование прочности, пластичности и вязкости. Установлено, что наиболее высоким уровнем ударной вязкости и низким порогом хладноломкости обладают малоперлитные стали с ниобием и ванадием типа 08Г2Б и 08Г2ФБ. Снижение температуры конца прокатки с 870 до 760 °С повышает предел текучести на 60–80 МПа, а порог хладноломкости смещает на 40–50 °С в сторону минусовых температур при том же уровне ударной вязкости. Снижение температуры конца прокатки приводит к общему измельчению ферритного зерна и уменьшению перлитной полосчатости. Увеличение суммарной степени деформации в последних клетях стана с 25 до 40 % при температурах около 800 °С увеличивает предел текучести на 20–30 МПа и снижает критическую температуру хрупкости на 20–25 °С. Понижение температуры смотки с 670 до 550 °С вызывает повышение предела текучести стали 08Г2ФБ до 600 МПа при высоком уровне ударной вязкости (0,15–0,20 МДж/м²). При этом вместо грубопластинчатого перлита наблюдается активно протекающий процесс дробления цементитных пластин, и сам перлит более дисперсен. Кроме того, идет интенсивное выделение дисперсных карбонитридных фаз ниобия и ванадия.

В то же время выявлено, что существующее оборудование широкополосных станов не позволяет в полной мере использовать возможности контролируемой прокатки. Прочность и жесткость клетей и мощности привода не дают возможности применять большие обжатия при низких температурах.

В этом плане заслуживает внимания последний непрерывный широкополосный стан 2000 конструкции НКМЗ, установленный на ММК в начале 2000-х гг. Стан является одним из важных объектов плана глубокой реконструкции комбината, затрагивающей кислородно-конвертерное производство и листовую комплекс, включающий станы горячей прокатки 2000 и 2500 и цех холодной прокатки со станом 2000.

По схеме расположения оборудования НШПС 2000 горячей прокатки выполнен точно таким же, как и его предшествующий аналог — стан 2000 ЧерМК. Но стан ММК содержит в черновой группе дополнительную отдельно стоящую клеть кварто, имеющую вертикальные валки. Кроме того, значительно усовершенствованы конструктивные параметры клетей и технология прокатки. Это позволило повысить обжатия в черновой группе, использовать слябы большей толщины, увеличить разнообразие прокатываемых марок стали, в том числе за счет труднодеформируемых и высокопрочных. После черновой группы клетей имеется шлеппер, по которому стан может выпускать из черновой группы клетей товарный толстый лист толщиной 40–100 мм. На нем можно

применять более гибкие и разнообразные технологические схемы прокатки тонкого листа, оптимизировать деформационные и температурно-скоростные параметры прокатки. Стан предназначен для проведения контролируемых режимов прокатки, обеспечивая температуру конца прокатки в пределах 830–900 °С и температуру смотки 500–650 °С. Стан снабжен экранами и охлаждающей установкой на промежуточном рольганге. Он производит горячекатаные листы толщиной 1,2–16,0 мм и шириной до 1850 мм с повышенной точностью. Продольная разнотолщинность ограничена пределами 0,05–0,07 мм, поперечная — 0,03–0,05 мм, разноширинность — не более ± 6 мм на 95 % длины и неплоскостность — не более 5 мм/м.

Интересен также спроектированный (но не построенный) стан, представленный на рис. 16.10, предназначенный специально для контролируемой прокатки (проект НПО “Черметавтоматика”). Стан предназначен для прокатки толстого листа 6–30 мм. Чистовая группа клеток разбита на две подгруппы,

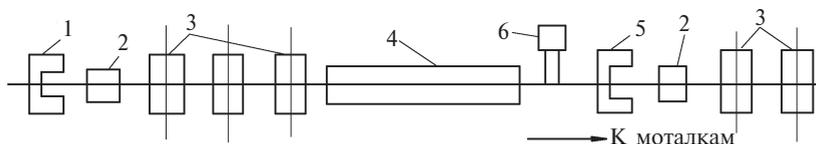


Рис. 16.10. Схема чистовой группы клеток ШПС для прокатки толстого листа по режимам контролируемой прокатки:

- 1 — летучие ножницы для обрезки концов листов толщиной 6–12 мм; 2 — чистовой окалиноломатель; 3 — чистовые клетки; 4 — удлиненный рольганг с охлаждающим устройством; 5 — летучие ножницы для обрезки концов листов толщиной 12–30 мм; 6 — пирометр

разделенные удлиненным межклетевым промежутком с устройством для регулирования скорости охлаждения металла. Толщина раската на этом участке в два-три раза меньше, чем на промежуточном рольганге обычного стана, поэтому охлаждение по сечению будет равномернее, скорость процесса увеличивается. Мощные клетки позволяют осуществлять значительную деформацию при пониженных температурах, что способствует получению мелкозернистой структуры, высоких механических и вязких свойств при отрицательных температурах.

16.8. Пути развития производства горячекатаного листа

Представленные станы 2000 ОАО “Северсталь” и ММК находятся на уровне современных зарубежных станом. Со строительством подобных станом почти исчерпываются возможности дальнейшего совершенствования традиционного развития производства тонкого листа. В мире идут поиски иных решений, которые позволили бы производить столь же высококачественный лист более дешевыми способами, пусть с меньшей производительностью. Развивается строительство мини-заводов для производства горячекатаного листа.

Одним из новых решений является использование станом Стеккеля (рис. 16.11) вместо чистовой группы клеток. Прокатка в черновой группе клеток осуществляется по традиционной технологии. На НЛМЗ в черновой группе

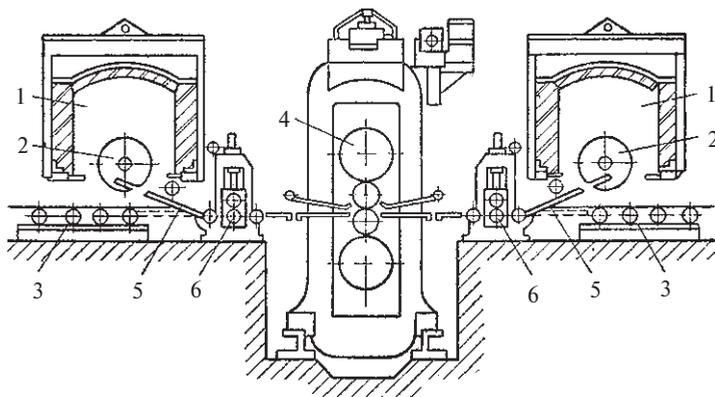


Рис. 16.11. Схема стана Стеккеля с моталками в печи:

1 — колпаковая печь; 2 — печная моталка; 3 — рольганг;
4 — чистовая клетка кварто; 5 — проводки; 6 — тянущие ролики

клетей установлена клетка с вертикальными и горизонтальными валками, в которых прокатка ведется в реверсивном режиме. После черновой прокатки раскат проходит через разведенные валки стана Стеккеля (стана с моталками, расположенными в печи) и наматывается на правую моталку. При обратной перемотке на левую моталку расстояние между валками уменьшается на заданное обжатие.

После нескольких реверсивных пропусков на стане получается требуемый прокат толщиной 1,2–2,0 мм в виде рулона, который дальше поступает в цех холодной прокатки. Станы Стеккеля предназначены в основном для специальных марок стали (например, электротехнических), поэтому производительность их значительно меньше и состав оборудования проще, чем традиционных ШПС. Благодаря стабильным температурным условиям прокатки на полосе отсутствует температурный клин. Легко обеспечиваются стабильные условия натяжения полосы между клетью и моталками. Разнотолщинность в продольном и поперечном направлении минимальна и не превышает 0,03 мм, что очень важно для электротехнических сталей. Недостатком стана являются низкая производительность и тяжелые условия работы моталок, расположенных в печи, разогретой до температуры прокатки (1100–1150 °С).

Имеются решения по новой компоновке традиционного оборудования стана, сокращающей площади цеха и упрощающей некоторые агрегаты. Одна из фирм США предложила противопоточную схему расположения черновой и чистовой группы, представленную на рис. 16.12. Стан занимает промежуточное положение между станом Стеккеля и ШПС. На стане используются слябы толщиной 230 и 285 мм. Сортамент листа — от 1 до 19 мм. Подкат для чистовой группы одной из трех толщин — 45, 32 и 19 мм — сматывается на промежуточные напольные моталки, затем передается на разматыватель, установленный в чистовой линии стана. Барабан моталки в черновой группе нагрет до 900–1000 °С. Ножницы перед чистовой группой клетей не только обрезают передний конец, но и регулируют длину полосы, поступающей на чистовую моталку. Это позволяет для всех листов использовать сляб максимального

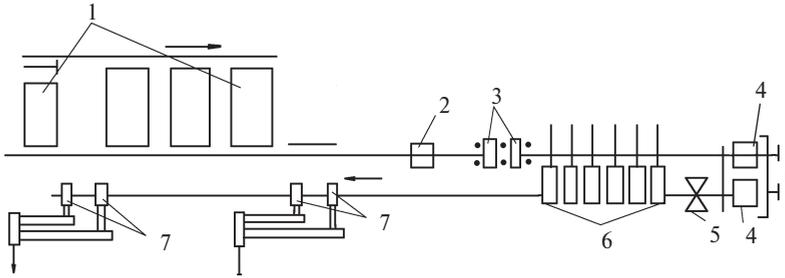


Рис. 16.12. Схема НШПС с противопоточным расположением черновой и чистовой групп клетей:
 1 — нагревательные печи; 2 — напольные моталки; 3 — черновая группа клетей; 4 — моталка-разматыватель; 5 — ножницы; 6 — чистовая группа клетей; 7 — моталки чистовые

развеса и увеличить производительность стана. Чистовые клетки имеют системы автоматического регулирования толщины и профиля полосы. Длина всего цеха 230 м (длина обычного ШПС — более 500 м), капиталовложения ниже на 14 %, текущие затраты — на 28 %. Производительность стана 1 млн. т/год.

Более основательную разработку в русле указанных тенденций выполнила австрийская фирма “Фест-Альпине”. Ею построен в г. Линце реверсивный компактный широкополосный стан, содержащий одну вертикальную и одну (в других вариантах — две, иногда — три) горизонтальную клетки кварто с подогреваемыми моталками с обеих сторон (рис. 16.13). Слябы толщиной 250 мм прокатывают в реверсивном режиме сначала в первой (черновой) горизонтальной клетки при разведенных валках чистовой клетки. Затем несколько пропусков осуществляют одновременно в обеих клетях. Чистовые пропуски до толщины 2 мм заканчивают только в чистовой клетки при разведенной черновой клетки. Полоса поочередно наматывается на одну из моталок. Барабаны моталок нагревают до температуры 900–1000 °С с помощью индукторов. В 3-валковом варианте дополнительная клетя кварто с черновым окалиноломателем установлена перед 2-валковой группой. Она предназначена для увеличения производительности комплекса. Примерно такой же ШПС 1420 производительностью 500 тыс. т/год уста-

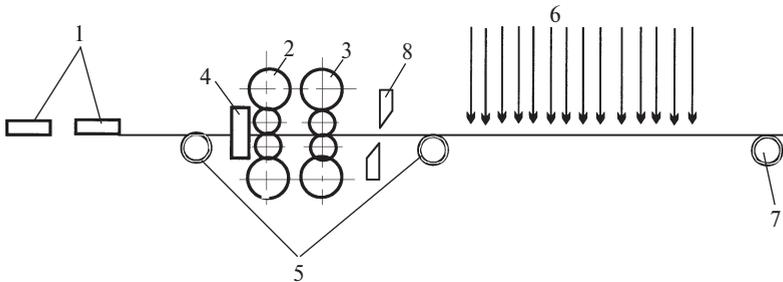


Рис. 16.13. Схема 2-клетевого стана с подогреваемыми моталками:
 1 — нагревательные печи; 2, 3 — клетки кварто; 4 — клетя дуо;
 5 — подогреваемые моталки; 6 — душирующая установка;
 7 — моталка; 8 — ножницы

новлен в Канаде. В черновой группе клетей расположены две реверсивные клети, в которых толщина сляба может быть уменьшена со 150 до 10 мм. Последние пропуски осуществляются с намоткой полосы на подогреваемые моталки. Дальнейшая прокатка проходит в чистовой группе по обычным режимам.

В мировой практике большое внимание уделяется проблемам совмещения машин непрерывного литья слябов (МНЛС) с широкополосными станами. На рис. 16.14 приведена схема первой одноручьевой установки (литейно-прокатный агрегат — ЛПА), построенной в США в 1989 г. и включающей МНЛС и промежуточную печь длиной 40 м для накопления слябов и выравнивания их температуры по сечению. При отливке слябов толщиной 50 мм черновая группа клетей не требуется, и прокатка производится только в чистовой группе клетей, имеющей гидросбив и четыре клети кварто. В целом резко сокращается длина комплекса, уменьшается суммарная стоимость установок литья и прокатки, затраты на нагрев слябов для прокатки. Но такие комплексы имеют низкую производительность, так как скорость отливки на порядок ниже, чем традиционные скорости прокатки. На представленном стане она равна 0,23 м/с, поэтому скорость выхода полосы из последней клети стана не превышает 4,6 м/с.

Для увеличения производительности в США и Японии построен ряд установок с двумя МНЛЗ (рис. 16.15). Скорость на выходе увеличена до 6,5 м/с

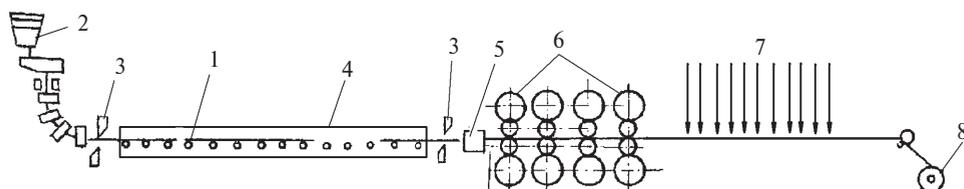


Рис. 16.14. Одноручьевая установка:

1 — сляб; 2 — ковш; 3 — ножницы; 4 — подогревательная печь; 5 — задающее устройство; 6 — непрерывный стан с клетями кварто; 7 — душирующее устройство; 8 — моталка

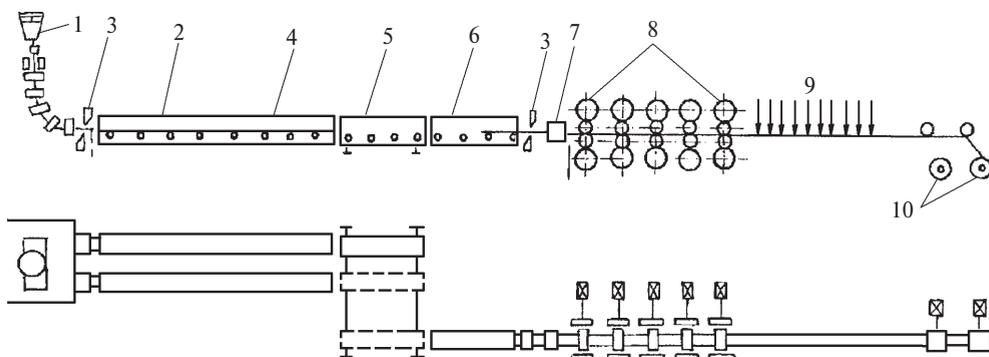


Рис. 16.15. Двухручьевая установка:

1 — кристаллизатор; 2 — ножницы; 3, 4 — печь подогрева; 5 — транспортное и распределительное средство; 6 — печь; 7 — задающее устройство; 8 — непрерывный стан с клетями кварто; 9 — душирующее устройство; 10 — моталки

толщине полосы 2,5 мм). Производительность возрасла до 1,5 млн. т в год. Это существенно меньше, чем производительность традиционного НШПС. Чтобы полнее использовать возможности прокатного оборудования в литейно-прокатных комплексах, необходимо увеличивать скорость разливки. Для этого уменьшают толщину отливаемого сляба. Если на слябах толщиной 50–80 мм достигнуты скорости 3–7 м/мин, то на слябах толщиной 20–40 мм она может быть увеличена до 15 м/мин. Применение тонких литых слябов приводит к полному изменению состава оборудования листопрокатного комплекса. При этом резко сокращается количество прокатного оборудования, уменьшаются капитальные затраты и себестоимость продукции. В перспективе возможна отливка полос толщиной 1–8 мм со скоростью до 60 м/мин и выше с минимальными затратами на прокатку. Необходимо, однако, обеспечить соответствующую мелкозернистую структуру металла со свойствами, присущими катаному металлу, и, конечно, требуемую разнотолщинность и плоскостность полосы.

Обычно ЛПА входят в состав мини-заводов. По сравнению с действующими НШПС ЛПА имеют почти в два раза меньшие затраты на передел и существенно более низкую себестоимость тонкого листа, хотя по качеству, сортаменту (особенно марочному) и объему выпускаемой продукции они значительно уступают (0,8–1,4 против 6 млн. т/год). Зато затраты на сооружение таких станов значительно ниже и составляют для одноручьевого устройства всего 18 %, а для двухручьевого — 27,5 % от НШПС.

Хорошее сочетание скоростей непрерывной разливки и прокатки достигается при использовании планетарных станов. Такой комплекс разработан, например, фирмой “Крупп” в Дуйсбурге (рис. 16.16). Непрерывный сляб толщиной 80 мм выходит из литейной машины со скоростью 1,5–4,0 м/с и поступает в проходную печь длиной 30 м. Затем с помощью задающих валков, обжатие в которых не превышает 10–20 %, металл подается в планетарную клетку, в которой за один проход толщина уменьшается сразу до 2 мм. После выравнивания толщины полосы в продольном направлении в прогладочной клети дуо, установленной за планетарной клетью, полоса сматывается в рулон. Конструкция планетарной клети видна из приведенной схемы.

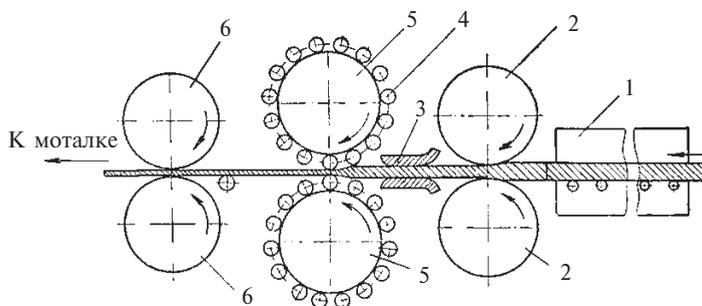


Рис. 16.16. Схема установки с планетарным станом:
 1 — проходная печь; 2 — задающие валки; 3 — проволочки;
 4 — рабочие планетарные валки; 5 — опорные валки (барбаны);
 6 — прогладочные валки

Рабочие валки малого диаметра собраны в сепаратор в виде беличьего колеса и опираются на приводной барабан большого диаметра. При вращении барабана в направлении прокатки рабочие валки за счет трения быстро вращаются в обратном направлении. В очаге деформации каждый из рабочих валков захватывает и обжимает небольшую порцию металла (рис. 16.17). Суммарная же деформация при этом может быть очень большой и достигать за один проход 90–98 %. Более совершенный планетарный стан имеет два ряда планетарных валков. Промежуточные валки вращаются против направления прокатки, а рабочие — в направлении прокатки, что облегчает работу задающих валков и стабилизирует процесс.

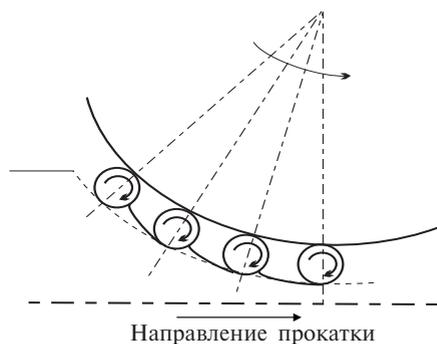


Рис. 16.17. Схема деформации металла при планетарной прокатке

Площадь цеха вместе со сталеплавильными установками составляет 145×40 м, годовая производительность комплекса 450–900 тыс. т в зависимости от ширины полосы. Таких установок много в европейских странах и в США, но в промышленном исполнении в России их нет. Причина в том, что планетарная прокатка имеет два существенных недостатка. Первый состоит в том, что полоса после прокатной клетки имеет большую продольную разнотолщинность, связанную с особенностью планетарной прокатки: каждый валок, заканчивая прокатку, оставляет после себя некоторый утолщенный участок, периодичность этих участков соответствует расстоянию между рабочими валками планетарной клетки. Следующая клетка дуо не полностью выправляет разнотолщинность. Вторым недостатком связан с конструкцией планетарного стана: рабочие валки и сепаратор очень ненадежны по прочностным характеристикам и часто выходят из строя.

Фирма Sendzimir (США) разработала типовой мини-завод на 400–500 тыс. т/год, в состав которого входят: две дуговые 100-тонные плавильные печи, одноручьева МНЛЗ криволинейного типа для отливки заготовки толщиной 230 мм и шириной 800–1050 мм, туннельная печь для выравнивания температуры на уровне 1100 °С и прокатный стан. Стан имеет черновую группу клетей, включающую вертикальную клетку, две нереверсивные клетки дуо и планетарный стан, на выходе из которого прокатка осуществляется в двух чистовых клетях кварто до конечной толщины 2 мм. Комплекс способен реализовать режимы бесконечной и послябовой прокатки.

В целом видно, что новые технологические схемы прокатки тонкого горячекатаного листа не вытесняют прокатку на непрерывных широкополосных станах, которые прокатывают 80–90 % тонкого горячекатаного листа. Мини-заводы занимают свою технологическую нишу.

16.9. Проблемы прокатки сверхтонкого листа

Одной из устойчивых тенденций в производстве горячекатаного листа является увеличение доли сверхтонких полос толщиной менее 1,5 мм. Американские специалисты считают, что 30–40 % холоднокатаной стали из диапазона

толщин 0,7–1,2 мм по требованиям потребителей можно заменить более дешевой горячекатаной с большой экономией средств (до 20–30 дол./т). Но на традиционных НШПС при этом резко снижается производительность и возрастает себестоимость. Кроме того, для завершения прокатки полос толщиной 1,1 мм и меньше в аустенитной области требуется скорость прокатки на НШПС выше 15 м/с, что не позволяют моталки.

При прокатке тонких полос первостепенное значение приобретает вопрос регулирования плоскостности листа. На толстых листах волнистость и коробоватость также имеют место, но значимость их существенно меньше, чем на тонких листах. При прокатке тонких листов необходимо обязательно измерять плоскостность и иметь технические средства для автоматического регулирования поперечного профиля полосы в процессе прокатки. На стане 2000 ОАО “Северсталь” установлен измеритель плоскостности проката ИП-4 отечественной разработки (рис. 16.18). Осветитель прибора, закрепленный под потолком справа от полосы, формирует на полосе поперечный блик, который улавливается ТВ-камерой, закрепленной под потолком слева от раската. Далее этот сигнал обрабатывается следующим образом. Полоса по ширине разбивается на 40–250 полос, и вычисляется удлинение каждой полоски Δl , которое соответствует наблюдаемой волнистости. Отношение $\Delta l/l$ в единицах измерения I ($1 I = 10$ мкм/м) служит характеристикой разнотолщинности каждой полоски. Это значение используется либо для регулирования процесса, либо для сортировки проката, либо в диагностических целях для анализа технологического процесса. Заметим, что вычисленное отношение $\Delta l/l$ не является гостовской величиной неплоскостности. По ГОСТу неплоскостностью называется превышение в миллиметрах неровного места над остальной плоскостью листа, и оно не должно превышать 5–15 мм/м. Пересчет неплоскостности в единицы I позволяет измерять ее более точно.

Описываемый прибор имеет более высокую чувствительность (измеряет неплоскостность на уровне 0,01 I в диапазоне 0,1–600,0 I) и большее пространственное разрешение (до 250 точек по ширине), чем зарубежные аналоги. Измеряемая неплоскостность на нижней границе указанного диапазона значи-

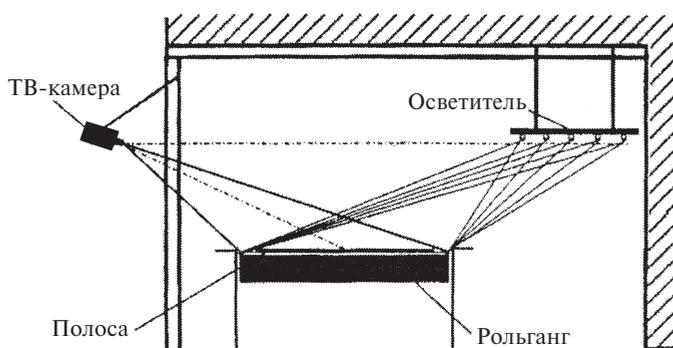


Рис. 16.18. Схема размещения автоматического измерителя плоскостности листа ИП-4 на стане 2000

тельно меньше той, которую может зафиксировать человеческий глаз. В требованиях ГОСТа заложены гораздо большие значения, чем способен уловить прибор. Прибор обеспечивает устойчивую работу при скоростях до 25 м/с и выдает результаты измерения с частотой до 1 Гц.

В процессе прокатки плоскостность регулируют разными способами, на стане 2000 ЧерМК регулировку осуществляет вальцовщик, воздействуя на систему дополнительного изгиба валков. На многих станах для регулировки плоскостности применяется автоматическая система SVC. Валки, имеющие S-образную профилировку (рис. 16.19), в процессе прокатки имеют возможность перемещаться в осевом направлении, изменяя поперечный профиль полосы. За счет изменения обжатия по ширине можно добиться требуемой поперечной разнотолщинности и плоскостности. Датчики плоскостности и S-образные валки образуют ядро автоматизированной системы управления плоскостностью SVC. В зависимости от сигнала система вычисляет выдвижение валков и автоматически реализует уставки. Такая система установлена на двух последних чистовых клетях стана 2000 НЛМК, на некоторых японских и других станах.

Для более тонкой регулировки плоскостности сверхтонких полос при прокатке необходимо иметь также систему управления температурным профилем рабочих валков путем дозированного разогрева отдельных участков валков или, наоборот, путем охлаждения других участков валков с помощью дозированного количества подаваемой эмульсии (система САПЭ).

Для производства горячекатаных сверхтонких полос разработано несколько новых технологических решений. Фирма Kawasaki Steel в 1996 г. впервые реализовала непрерывную прокатку свертонкого листа на действующем ШПС, установив на промежуточном рольганге койлбокс и стыкосварочную машину. Позже такой же процесс реализован на НШПС № 1 завода фирмы Nippon Steel (г. Оита, Япония). На выходе из печи нагретые слябы свариваются между собой встык, обеспечивая бесконечный режим прокатки. Возможна также поштучная прокатка слябов. На этом стане при скорости прокатки 20 м/с можно прокатывать полосу толщиной выше 0,8 мм. Все чистовые клетки приводятся от малоинерционных двигателей переменного тока, которые отличаются меньшими габаритами, стоимостью, дешевле в обслуживании, чем традиционные двигатели постоянного тока. На выходе из четырех последних клеток установлены рентгеновские толщиномеры. Клетки рассчитаны на максимальные усилия 50 МН (5000 т). Для сравнения: максимальное усилие в чистовых клетях стана 2000 ЧерМК не превышает 3500 т. На рассматриваемом стане установлены быстродействующие гидронажимные устройства (ГНУ), обеспечивающие точное и быстрое управление дополнительным изгибом валков. Для автомати-

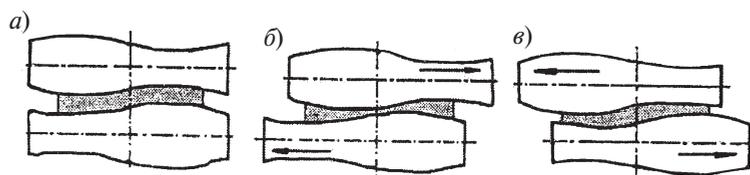


Рис. 16.19. Положение валков в системе SVC

ческого регулирования планшетности применяется система осевого перемещения валков SVC. Для тонкой настройки планшетности установлена автоматическая система регулировки теплового профиля валков и поворота (скрещивания осей) валков (при скрещивании валков увеличивается толщина полосы по боковым кромкам). Все это позволяет укладываться в допуск на поперечную разнотолщинность $\pm 0,03$ мм на 99,5 % длины полосы. Но бесконечные станы не всегда оправданы, поскольку сложны, дороги и трудноперестраиваемы, поэтому предусматривается поштучный режим прокатки.

Сверхтонкие горячекатаные полосы можно получать из низкоуглеродистых сталей также на традиционных НШПС, если прокатывать металл в состоянии феррита после полного выделения его из аустенита (режим теплой прокатки). Традиционные представления о том, что температура конца прокатки должна быть в аустенитной области, неприменимы для полос толщиной меньше 1,8 мм; такие температуры недостижимы из-за больших потерь тепла. Кроме того, для сталей с содержанием углерода менее 0,02 % (IF и др.) повышена температура фазовых превращений. При ферритной (теплой) прокатке снижают температуру нагрева также для уменьшения количества поверхностных дефектов. При таких температурах прокатки меньше растворяются дисперсные фазы легирующих элементов и частицы соединений V и Nb, которые уменьшают зерно аустенита и при его распаде ускоряют рекристаллизацию феррита. При теплой прокатке уменьшается неплоскостность из-за отсутствия внутренних напряжений, которые возникают при аллотропических превращениях при охлаждении. Кроме того, уменьшается количество воды при межклетевом охлаждении, снижается износ валков по сетке разгара и т. д. Давление металла на валки, конечно, возрастает, но несущественно. Ферритную прокатку ведут обязательно со смазками, поэтому она по энергосиловым параметрам свободно проходит на действующих НШПС.

Известны три технологии прокатки металла в состоянии феррита. При толщинах выше 1 мм ферритная прокатка стали ведется при температурах, гарантирующих полное протекание рекристаллизации металла в рулоне, при которых наклеп снимается. При меньших толщинах и меньших температурах наклеп частично сохраняется. Металл нуждается в дополнительном отжиге после прокатки (вторая технология). По третьей технологии предусматривается последующая холодная прокатка тонкой полосы по традиционной схеме производства холоднокатаного листа.

Фирма VAI (Австрия) для ферритной прокатки сверхтонких полос (до 0,8 мм) предложила использовать дополнительную, отдельно стоящую клеть (Pony Mill). После аустенитной прокатки по традиционной технологии до толщины 1,5 мм прокатка ведется в этой клетке в ферритной области с обжатием 50 % со смазкой на скорости 20 м/с. Затраты на установку дополнительной клетки в 10 раз ниже, чем переход на бесконечную прокатку, при этом технологические возможности стана значительно расширяются.

На НЛМК на стане 2000 проблему прокатки тонких полос (менее 1,5 мм) решили путем внедрения автоматической системы управления скоростью транспортировки полосы на выходном рольганге, обеспечивающей высокую скорость прокатки и необходимую температуру конца прокатки без применения дополнительного дорогостоящего оборудования. Было установлено, что при

прохождении полосы от последней клетки до моталки существует два опасных участка, которые и определяют скорость надежного захвата при смотке. На выходе из чистовой клетки передний конец встречается с первым роликом рольганга и отгибается вверх. При высоких скоростях он за счет потока воздуха увеличивает отгиб и может сложиться так, что захват моталками станет невозможным. Чтобы увеличить скорость поступления металла на моталку, предложена автоматизированная система управления, которая резко затормаживает головную часть полосы на выходе из последней клетки; появляющиеся при этом инерционные силы предотвращают отгиб и складывание полосы. С этой же целью передний конец полосы на МКО охлаждаются несколько больше, чем остальную полосу. После прохождения через чистовую клетку первых 20–30 м полоса быстро ускоряется, но за 15–20 м до тянущих роликов моталки происходит второе, причем резкое, торможение полосы до скорости, необходимой для захвата полосы моталкой. Обычно она превышает традиционные значения 10–11 м/с, так как надежному захвату способствуют инерционные силы, возникающие при торможении. После намотки на моталку двух–трех витков скорость полосы вновь возрастает до максимального значения. Последние метры полосы прокатываются также в режиме торможения, чтобы предотвратить удары конца полосы о рольганг. Как видно, скоростной режим прокатки значительно сложнее, чем представлено на рис. 16.4, и без системы автоматического управления не может быть реализован.

Одна из мировых тенденций в производстве тонких горячекатаных полос — применение тонких слябов (толщиной 25–50 мм вместо традиционных 200–250 мм). При использовании тонких слябов строят единый агрегат, совмещающий операции литья и прокатки (ЛПА). Первый ЛПА был введен в 1989 г. американской фирмой Nicor Corp (см. рис. 16.13). С этого времени фирмой SMS Demag (Германия) построено 25 ЛПА общей производительностью 35 млн. т тонкой и сверхтонкой листовой стали в год. Перспектива получения по технологии ЛПА листов толщиной до 0,7 мм со свойствами холоднокатаного листа весьма заманчива.

16.10. Расчет режимов обжатия на НШПС по температуре

Расчет режимов обжатия на НШПС организован как оптимизационный процесс, т. е. построен на минимизации или максимизации некоторого технико-экономического или технологического критерия. В качестве критериев выступают те же показатели, что и на других станах, — суммарный расход энергии, расход энергии на тонну продукции, равномерность загрузки оборудования, показатели качества продукции, такие как продольная и поперечная разнотолщинность, планшетность и др. Производительность же стана не может быть критерием, так как на всех непрерывных станах выполняется условие постоянства секундного объема $F_i V_i = \text{const}$, т. е. секундная производительность всегда одинакова в каждой i -й клетке. При любом распределении обжатий по клеткам производительность стана будет определяться только скоростью V_n вращения валков последней n -й клетки. По последней клетке определяется значение const , поэтому для остальных клеток при любом режиме обжатия (при заданных зна-

чениях F_i) определяются скорости прокатки V_i , которые должны укладываться в заданные паспортные пределы:

$$V_{i \min} < V_i < V_{i \max}.$$

Для широкополосного стана важнейшим является температурный режим прокатки. Важна как температура после черновых и чистовых клетей, так и внутри непрерывной группы. Оптимизация по остальным критериям не столь необходима, как обеспечение требуемых температурных условий прокатки.

Чтобы построить режим обжатия, оптимальный по распределению температуры по клетям стана, необходимо точно рассчитывать температуру металла после каждой клетки, т. е. достаточно точно вычислить потери тепла за счет излучения, конвекции, контакта металла с валками, охлаждения жидкостью и рольгангом, а также поступление тепла за счет деформации металла и реакции окисления железа с образованием окалины.

В общем случае температура металла после i -й клетки

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_{\text{изл}} - \Delta t_{\text{конв}} - \Delta t_{\text{к}} - \Delta t_{\text{охл}} + \Delta t_{\text{деф}} + \Delta t_{\text{ок}}.$$

На каждом стане эти составляющие вносят разный вклад в общее падение температуры. Каждую составляющую вычислить трудно, чаще невозможно, поэтому предпочитают на каждом стане экспериментально строить закономерность остывания металла по клетям. Эти кривые строятся путем статистической обработки данных в зависимости от толщины и начальной температуры раската, условий охлаждения и скорости прокатки.

В учебных расчетах в первом приближении можно считать, что приращение тепла за счет деформации и образования окалины компенсируется потерями от контакта с валками, охлаждения валков водой и конвекции. Подлежат учету только потери тепла за счет излучения. Для их расчета возможна, например, формула Иванцова

$$\Delta t_i = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{1000}{(T_{i-1}/100)^3} + 0,055 \frac{\tau}{h_i}}},$$

где T_{i-1} — температура, К; τ — время излучения, равное времени движения полосы от $(i-1)$ -й до i -й клетки.

Многие авторы склоняются к тому, что необходимо учитывать не только потери от излучения, но и приращение тепла за счет деформации.

Разогрев металла за счет деформации определяется формулой Железнова

$$\Delta t_{\text{деф}} = 4,12 p_{\text{ср}} \lg(h_{i-1}/h_i).$$

Если требуется посчитать все потери точнее, то следует обратиться к справочнику “Расчет параметров листовой прокатки” (авт. Ю.В. Коновалов и др.). Приблизительно можно считать, что потери температуры за счет конвекции составляют примерно 1,5 % от потерь за счет излучения, потери от контакта с валками и охлаждения полосы водой, подаваемой для охлаждения валков, составляют 10–18 % от тех же потерь. Следует заметить, что приведенные потери на охлаждение полосы водой не учитывают принудительного охлаждения

полосы в установке межклетевого охлаждения в чистовой группе валков при автоматическом регулировании температуры конца прокатки.

Однако, как показала экспериментальная проверка на конкретных НШПС, точность расчета при учете всех составляющих увеличивается незначительно по сравнению с расчетом, учитывающим только $\Delta t_{\text{изл}}$ и $\Delta t_{\text{деф}}$. Более того, расчеты по теоретическим формулам не могут учесть всех факторов и всех особенностей прокатки на конкретном стане. Статистическая модель (формула), полученная на самом стане, работает всегда надежнее, чем теоретическая. Для некоторых станов такие модели опубликованы.

По температурным параметрам прокатки можно строить различные режимы прокатки. В качестве примера можно сформулировать следующие задачи.

1. Заданы исходная толщина сляба H и конечная толщина h_k листа. Заданы также температуры начала T_0 и конца прокатки T_k . Необходимо построить оптимальный режим обжатия по клетям, т. е. уложиться в заданные требования по температурному режиму прокатки и обеспечить минимум или максимум какого-нибудь критерия. Самостоятельной задачей может быть построение любого режима обжатия, обеспечивающего заданные требования по температурному режиму. Рассмотрим задачу в такой постановке.

Расчет черновой группы клетей производим по ходу прокатки. Назначаем обжатия в каждой клетке (максимальные по ограничивающим параметрам или более низкие). После последней черновой клетки получим раскат толщиной h_1 с температурой T_1 . Эти параметры должны укладываться в интервал, рекомендованный для данного стана.

Чистовую группу рассчитываем против хода прокатки. Зная суммарное обжатие $(h_1 - h_k)$, назначаем обжатия в каждой клетке, которые не должны превышать допустимые значения по ограничениям. Далее рассчитываем температуру металла перед каждой клетью. Окончательно получаем толщину раската перед чистовым окалиноломателем, которая должна совпадать со значением h_1 , и температуру T_q , не совпадающую в общем случае с T_1 .

Если $T_1 > T_q$, то на промежуточном рольганге необходимо выдержать полосу некоторое время t_b , чтобы охладить раскат до требуемой температуры. По значению $(T_1 - T_q)$ можно вычислить время подстуживания t_b .

Если $T_1 < T_q$, то температуры раската на промежуточном рольганге t_1 не хватает, чтобы в чистовой группе клетей получить заданную температуру конца прокатки. Либо следует устанавливать тепловые экраны, либо признать прокатку листа толщиной h_k невозможной.

2. Необходимо рассчитать минимально возможную толщину прокатываемого листа при заданных размерах исходного сляба. Естественно, температура нагрева сляба и температура конца прокатки полосы заданы, известны также марка прокатываемого металла, ширина листа и все ограничения на стане.

Расчет ведем по ходу прокатки в обеих группах клетей. В каждом пропуске в черновой и чистовой группах клетей задаем предельные обжатия по углу захвата (не более 20°), максимально допустимой силе прокатки и номинальному моменту двигателя. По приведенной выше методике рассчитываем температуру металла после каждого пропуска. На промежуточный рольганг необходимо выйти с температурой и толщиной раската, которые укладываются в интервал рекомендованных значений для обеспечения требуемых свойств

металла. Полагаем, что на промежуточном рольганге время подстуживания равно времени транспортировки полосы при максимальной скорости рольганга. Можно вычислить температуру металла перед чистовой группой клетей и сравнить с рекомендованной для данного стана. Продолжая расчет в чистовой группе клетей также по предельно допустимым обжатиям, получаем конечную толщину листа h_k и расчетную температуру конца прокатки T_p . Последняя в общем случае не будет совпадать с требуемой T_k . Поскольку во всех клетях были назначены максимально возможные обжатия, то обязательно получим минимальную конечную толщину h_k . Если при этом $T_p < T_k$, то необходимо ослабить режим обжатия в чистовой, а может быть, и в черновой группе клетей и повторить расчет, выйдя на большую конечную толщину h_k и большую конечную температуру T_p . Искомая толщина проката h_k соответствует равенству $T_p = T_k$. Если $T_p > T_k$, что маловероятно, то можно добиться равенства температур за счет снижения скорости движения промежуточного рольганга.

Как видно, расчет осуществляется методом перебора различных вариантов, поэтому полезно написать программу расчета на ЭВМ. Необходимо еще раз заметить, что наиболее удобны человеко-машинные программы, в которых выбор режимов обжатия осуществляет человек, а ЭВМ проводит рутинные расчеты.

3. Обратная задача: рассчитать максимальную толщину и ширину сляба для получения листа заданных размеров.

Очевидно, задача решается по тому же алгоритму, что и в предыдущей постановке, но в обратной последовательности — от готового листа к заготовке. Первичный просчет выполняется также по максимально возможным обжатиям. В результате получим некоторую толщину сляба и температуру его нагрева, которые позволят наметить стратегию корректировки просчитанного режима. Если толщина сляба получается больше, чем можно отлить на УНРС, то следует ослабить режим обжатия в некоторых клетях, лучше всего в последних черновых или первых чистовых пропусках. Если расчетная температура нагрева сляба получается ниже требуемой, то избыточную температуру будем снижать на промежуточном рольганге. Вычислим время подстуживания промежуточного раската. В том варианте, когда расчетная температура нагрева металла превысит требуемую, необходимо устанавливать на промежуточном рольганге теплоизоляционные экраны или согласиться с тем, что по тепловому режиму заданную толщину полосы прокатать невозможно, необходимо увеличить рассчитываемую толщину.

4. Заданы исходная толщина сляба и конечная толщина листа. Необходимо построить оптимальный режим обжатия по клетям по одному из критериев оптимизации. Критерием в данном случае может быть, например, расход энергии на прокатку. В число ограничений войдут требования по температурному режиму прокатки — температура на промежуточном рольганге и температура конца прокатки. В связи с тем что температура раската по клетям должна укладываться в достаточно узкие рамки, большого разнообразия вариантов прокатки не будет. Достаточно получить несколько возможных вариантов и по предложенному критерию выбрать лучший. Он будет почти оптимальным, т. е. близким к оптимальному. Точно оптимальный режим может быть найден только при использовании сложных математических методов поиска оптимальных решений, но в данном случае поиск оптимума становится неоправданным.

Таким образом, решаем задачу методом последовательных приближений. На первом просчете строим один из возможных режимов обжатия по алгоритму задачи 1, на втором — задаем другой режим обжатий. Если такой вариант прокатки оказался лучше, то в этом же направлении просчитываем следующий вариант. По ограничениям пройдет немного вариантов, поэтому почти оптимальное решение находится всего за три-четыре просчета.

Во всех задачах расчет температуры металла следует вести по головной части листа. Температуру хвостовой части регулируем за счет ускорения прокатки в чистовых клетях. Среднее ускорение a в чистовой группе клетей вычисляем методом последовательных приближений по последней чистовой клетке. На первом шаге ускорение равно 0. По известной длине листа при заправочной скорости прокатки в последней клетке определяем время начала прокатки хвостовой части относительно головной. Этого достаточно, чтобы вычислить дополнительные потери тепла на хвостовой части и разность температур обеих частей полосы ($T_r - T_x$). На следующем шаге зададим небольшое ускорение a . Головная часть полосы длиной, равной расстоянию от чистовой клетки до моталки (плюс два витка) проходит по-прежнему без ускорения. Остальная длина полосы позволит вычислить скорость выхода из последней клетки и все временные характеристики прокатки хвостовой части листа. При более высокой скорости прокатки хвостовая часть металла теряет меньше тепла (например, за счет излучения) при том же поступлении тепла за счет деформации. Необходимо рассмотреть несколько режимов ускорения и подобрать такое ускорение a , при котором либо устраняется температурный клин, либо создается обратный температурный клин в $20\text{ }^\circ\text{C}$ для равномерной температуры смотки.

16.11. Автоматизация управления производством и технологией производства

Современный широкополосный стан имеет хорошо развитую системы управления производством и технологическими операциями на базе комплекса ЭВМ различной мощности и других технических средств, связанных в единую сетевую структуру. На примере стана 2000 ЧерМК рассмотрим основные задачи, решаемые этими системами.

Главной задачей системы управления производством (АСУП) является обеспечение выполнения заказов потребителей в установленные сроки в полном объеме и с наименьшими затратами. На основе квартального и месячного портфеля заказов рассчитывается стоимостная оценка заказов, определяется потребность в слябах, формируются графики и планы прокатки на месяц и более короткие периоды времени, в том числе на ближайшие сутки, и т. п. В рамках АСУП также осуществляется учет металла по агрегатам, по маркам стали, ведется учет брака, оценивается состояние складов и т. д. Отдельную группу составляют задачи сравнения текущего и планового производства, корректировки недельных и суточных планов (а также планов на более длительные периоды), формирования для всех служб требуемой документации, в том числе отчетной.

Технические средства автоматизации управления технологией производства (АСУТП) — машина класса ЕС ЭВМ, включающая семейство программ-

но-совместимых вычислительных машин третьего поколения, — размещены в главном вычислительном центре и его филиалах, находящихся в цехах. На стане 2000 управление производством осуществляют на базе системы малых (СМ) и микроэлектронных ЭВМ и УВМ фирмы “Сименс”.

Структура АСУТП, функционирующая на стане 2000, состоит из двух систем. Система АСУТП 1 предназначена для решения технологических задач управления нагревом слэбов в методических печах. Система АСУТП 2 управляет прокаткой в черновой и чистовой группах клетей, а также технологией охлаждения листа и смотки. На каждом из этих участков осуществляется слежение и информационное сопровождение полосы, расчет и настройка параметров, управление температурным и деформационным режимом прокатки и охлаждения, управление локальными системами автоматизации, которые установлены на отдельных механизмах, а также адаптация математических моделей, заложенных в основу управления.

АСУТП 2 представляет собой трехуровневую иерархическую систему. Нижний уровень охватывает измерительные устройства и датчики технологического контроля. Средний уровень обеспечивает сбор и обработку информации от датчиков, информационное сопровождение проката на отдельных участках, а также регулирование технологических параметров прокатки и качественных характеристик листа. На верхнем уровне осуществляется расчет и реализация настройки стана на прокатку полосы заданного размера и марки стали, расчет коррекции при отклонении параметров прокатки от расчетных, диагностика механического и электрического оборудования, информационное сопровождение проката, адаптация моделей управления, а также связь с системами АСУТП 1 и АСУП.

Опыт эксплуатации АСУТП 2 показал, что в условиях интенсивного насыщения воздуха паром и пылеобразной окалиной надежность датчиков снижается до 80 %. В связи с этим дублирование датчиков и замена их на более совершенные, а также улучшение логики их работы нескольких последних лет составляли основное направление совершенствования системы, что позволило довести надежность системы слежения и управления до 99,7 %.

В составе АСУТП 2 действует восемь локальных систем автоматизации черновой группы клетей, которые принимают от центральной УВМ С-306 уставки на все исполнительные механизмы. Уставки могут быть введены также вручную. Основная задача УВМ С-306 — расчет базового распределения обжатий по пропускам с выходом на заданные толщину и температуру металла на выходе из черновой группы, а также коррекция фактических параметров прокатки путем введения в базовый режим адаптивных коэффициентов коррекции. Эти коэффициенты автоматически уточняются (адаптируются) путем сравнения расчетных и фактических данных. В непрерывной группе черновых клетей используется прямое измерение сил натяжения между клетями.

Основными функциями управления чистовой группы клетей являются распределение обжатий по клетям, определение скоростей и ускорения клетей, распределение температур в целях получения полосы с заданной толщиной и температурой, а также с заданной планшетностью. Управление чистовыми клетями производится по трем режимам, последовательно расширяющим возможности регулирования процесса прокатки. В режиме предварительной на-

стройки происходит настройка клетей на расчетный режим прокатки по параметрам раската, находящегося на промежуточном рольганге. В режиме коррекции производится уточнение настройки по результатам прокатки в первых двух клетях. Далее на основе дополнительных расчетов осуществляется окончательная настройка клетей. Как и в черновых клетях, используются адаптивные модели и уравнения, заданные в неявном виде относительно определяемого параметра.

Точность проката по длине обеспечивается системой автоматического регулирования толщины (САРТ) полосы фирмы “Сименс”. Система воздействует на электропривод нажимных винтов. Она включает в себя регуляторы зазора между валками и устройство выработки корректирующего сигнала по показаниям выходного толщиномера. Регуляторы зазора работают по принципу непосредственного измерения зазора между валками по числу оборотов нажимных винтов и шагу винтов. Особое место в системе занимает система автоматического регулирования межклетевого натяжения (САРН), созданная на базе электромеханических петледержателей с безредукторным приводом, которые являются приоритетной разработкой фирмы “Сименс”. Особенность стана 2000 состоит в том, что при большой длине раскатов применяются более высокие ускорения и повышенная скорость прокатки, чем на аналогичном стане 2000 НЛМК. Но при этом повышается температура конца прокатки. Чтобы сохранить ее на уровне требуемой, введена первая в России система межклетевого регулируемого охлаждения полосы. Применение этой системы позволило повысить скорость прокатки на 1,5–2,0 м/с (до 21,5 м/с) и ускорение чистовой группы довести до 0,20–0,25 м/с².

Глава 17

ПРОИЗВОДСТВО ХОЛОДНОКАТАНОГО ЛИСТА

17.1. Сортамент

По назначению холоднокатаный лист делят на следующие виды: автомобильный (или конструкционный) лист толщиной 0,35 мм и выше (в основном до 5 мм), предназначенный для автомобильной промышленности и любой другой отрасли машиностроения, где путем холодной штамповки, вытяжки, вырубки и других операций получают машиностроительные детали; в машиностроении используют значительную долю листа с антикоррозийным покрытием в виде цинка, цинковых сплавов, алюминия, пластмасс и т. п., отдельную группу составляет лист из легированных, в основном нержавеющей, марок стали, применяемых для производства бытовых приборов и других изделий;

жесть толщиной 0,18–0,50 мм и шириной до 1000 мм, предназначенная для использования в пищевой и перерабатывающей промышленности, производстве консервной тары и пр., значительная часть жести используется с ан-

тикоррозийным покрытием оловом (белая жечь), для покрытия жести используют также пищевые лаки, пластмассы и пр.;

кровельный лист 0,4–0,8 мм, употребляемый в строительстве;

электротехнический лист толщиной выше 0,2 мм, предназначенный для набора сердечников роторов, статоров электрических машин, сердечников трансформаторов, реле и т. п.;

декапированный лист; выше отмечалось, что такая продукция представляет собой горячекатаный лист, поверхность которого освобождена от окалины, лист предназначен для штамповки различных емкостей и посуды с последующим нанесением различных видов покрытия, например горячей эмали; здесь мы упоминаем этот вид листовой продукции только потому, что декапированный лист выпускают цеха холодной прокатки, поскольку в цехах горячей прокатки нет средств для травления металла; остальные требования к такому листу такие же, как на горячекатаную продукцию.

К каждому виду холоднокатаного листа предъявляются свои требования, связанные с областью их применения. Однако имеется ряд общих требований, закрепленных в ГОСТ 19904–90 на прокат листовой холоднокатаный шириной $b > 500$ мм и толщиной 0,35–5,00 мм. Лист поставляется заказчику в виде отдельных карточек, собранных в пакеты, или в виде рулонов массой до 36 т.

По точности изготовления по толщине, ширине и длине листы имеют маркировку:

БТ, АТ и ВТ;

БШ, АШ и ВШ;

БД, АД и ВД,

соответствующую нормальной (Б), повышенной (А) и высокой (В) точности.

Например, приведем допуски на отклонения по толщине для листа шириной 1000–1500 мм (табл. 17.1).

По плоскостности листы маркируются ПН, ПУ, ПВ и ПО, что обозначает нормальную, улучшенную, высокую и особо высокую плоскостность. Плоскостность измеряется как превышение в миллиметрах неровного места над плоскостью листа. Для листа шириной 1000–1500 мм допускаемая неплоскостность составляет (в порядке указанной выше маркировки): 15, 12, 8 и 5 мм соответственно.

Для листа оговаривается также серповидность, которая не должна превышать 10 мм на 3 м длины.

По характеру кромки листы бывают:

с обрезной кромкой — маркировка буквой “О”;

с необрезной кромкой — маркировка “Н”.

Таблица 17.1

Требования по точности на толщину листа, мм

Толщина листа	ВТ	АТ	БТ
0,35–0,40	±0,03	±0,04	±0,05
0,9–1,2	±0,06	±0,09	±0,11
1,5–1,8	±0,09	±0,12	±0,15
4,0–5,0	±0,18	±0,20	±0,23

Для разных видов листа по разным ГОСТам по назначению выделены следующие группы листа:

- ХШ — для холодной штамповки;
- ХП — для холодного профилирования;
- ПК — под окраску;
- ОН — общего назначения.

К листу, предназначенному для производства штампованных изделий, предъявляются высокие требования по штампуемости и качеству поверхности. По способности к вытяжке при штамповке различают следующие категории:

- Н — для нормальной вытяжки;
- Г — для глубокой вытяжки;
- ВГ — для весьма глубокой вытяжки;
- СВ — для сложной вытяжки;
- ОСВ — для особо сложной вытяжки;
- ВОСВ и ВОСВ-Т — для весьма особо сложной вытяжки.

Эти категории в разных ГОСТах выделяются в разном наборе. Требования по штампуемости непосредственно связаны с химическим составом, структурой, фазовым составом, величиной зерна и другими характеристиками, определяющими механические свойства металла. По совокупности нормируемых требований по штампуемости и механическим свойствам в ГОСТ 9045–93 выделены отдельные категории от 1 до 5.

По качеству отделки поверхности выделены четыре группы листа:

I — особо высокой отделки; на поверхности листа не допускаются риски длиной более 20 мм и глубиной выше 1/4 допуска на толщину проката, не допускаются пятна, цвета побежалости, вмятины и пр.;

II — высокой отделки; на поверхности листа риски не должны превышать по длине 50 мм и по глубине 1/2 допуска на толщину, допускаются цвета побежалости на расстоянии от кромок не выше 50 мм;

III — повышенной отделки; допускаются дефекты, не превышающие величину допуска и не выводящие лист за пределы допуска по толщине, допускается общая рябизна, мелкие риски, царапины и раковины в пределах 1/2 допуска, цвета побежалости на расстоянии 200 мм от кромок;

IV — обычной отделки; на листах этой группы допускаются те же дефекты, что и для III группы, если их глубина не превышает целого допуска по толщине, допускается абразивная зачистка поверхности листа с глубиной рисок, не превышающих допуска.

17.2. Требования к качеству поверхности тонколистовой стали, предназначенной для штамповки

Высокопроизводительные автоматические линии разделки рулонной стали на заготовки под штамповку и многопозиционные прессы-автоматы для изготовления деталей глубокой вытяжкой из листа обуславливают высокие требования к качеству металла. Под качеством подразумевают в основном высокие механические характеристики металла, определяющие его высокую штампуемость, высокое качество поверхности и планшетность металла, отсутствие

продольной и поперечной разнотолщинности. Штампуемость — это комплексная характеристика качества металла. Она подразумевает, во-первых, высокую пластичность металла, обеспечивающую высокую степень деформации металла без разрушения, и, во-вторых, низкое усилие на штамп при операциях штамповки. Снижение усилия при штамповке можно достигнуть за счет уменьшения коэффициента трения, поэтому поверхность листа должна способствовать удержанию смазки под штампом. Кроме того, для снижения усилия при штамповке необходимо снижать предел текучести материала листа. Снижение углерода в стали до 0,1 % и ниже способствует повышению пластичности и снижению предела текучести стали, поэтому стали типа 08кп, 08пс, 08Ю, Ст10 и подобные им широко применяются для производства листовых штампованных деталей. Но, с другой стороны, низкий предел текучести стали вовсе не желателен в готовом изделии. Наоборот, необходимо всеми средствами увеличивать прочность металла после штамповки. Поэтому постоянно идет поиск технологических решений, позволяющих совместить противоречивые требования к прочностным характеристикам холоднокатаного листа.

Технические требования к холоднокатаному металлу для штамповки категорий ВГ, СВ, ОСВ, ВОСВ, ВОСВ-Т определены ГОСТ 9045–93. Для ВОСВ, ОСВ и СВ применяют в основном сталь марки 08Ю с регламентированным содержанием углерода менее 0,07 % с пределом текучести $\sigma_T = 175–185$ Н/мм², для которой регламентируется также балл зерна феррита (6 или 7) и структурно-свободного цементита (2). Для категорий СВ и ВГ применяют марки стали 08пс и 08кп с содержанием углерода до 0,1 % и др.

Предъявляют высокие требования к качеству поверхности автомобильного листа. При этом различают состояние поверхности по наличию и размерам поверхностных дефектов и по степени ее отделки, включающей формирование микрорельефа (шероховатости) поверхности листа.

По наличию дефектов на поверхности и степени ее отделки тонколистовую малоуглеродистую сталь выпускают по III и IV группам (ГОСТ 4041–71), а для холоднокатаной тонколистовой стали для холодной штамповки по ГОСТ 9045–93 предусмотрены группы I, II и III. Для лучшей из них группы I предусмотрены три класса отделки поверхности по шероховатости:

- листы с глянцевой или зеркальной поверхностью;
- листы с матовой поверхностью;
- листы с повышенной шероховатостью поверхности (называемые шероховатыми).

Необходимо подробнее остановиться на характеристике микрорельефа поверхности и методах оценки шероховатости. *Реальный профиль полосы* (рис. 17.1, б) получается при сечении ее *реальной поверхности* (рис. 17.1, а). Как видно, реальный профиль содержит неровности двух порядков малости. Неровности на макроуровне определяются характером изменения некоторой сглаженной высоты h по длине (или ширине) полосы. Колебания этой высоты относительно некоторого среднего значения характеризует разнотолщинность полосы. Абсолютная разнотолщинность измеряется десятками и сотыми долями миллиметра, соответственно профиль кривой h учитывает только неровности такого же порядка измерения. Кривая h называется *геометрическим профилем полосы*. Реальный профиль отличается от геометрического тем, что на нем

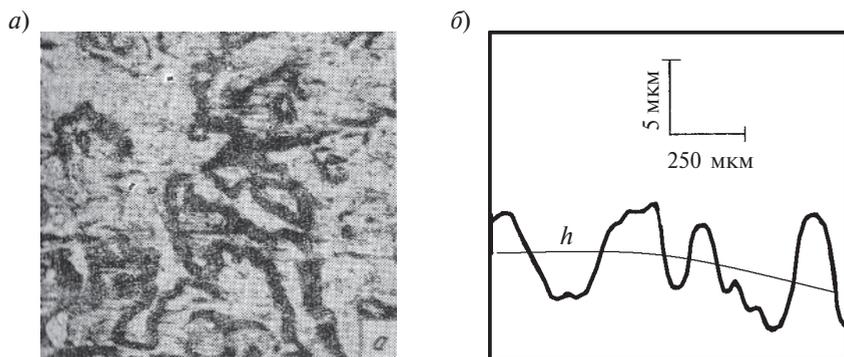


Рис. 17.1. Реальная поверхность ($\times 100$) (а) и реальный профиль листа (б)

имеются микронеровности относительно геометрического профиля, измеряемые в пределах нескольких микрометров. Геометрический профиль получается из реального, если выровнять все микровыступы и микровпадины так, чтобы площади выступающих участков полностью компенсировались площадью участков впадин. Реальный профиль измеряют с помощью соответствующих профилографов на некоторой базовой длине l (не менее 100 высот микронеровностей). Геометрический же профиль, строго говоря, величина вычисляемая, получаемая как результат выравнивания микронеровностей.

Существует другое определение геометрического профиля. Обозначим h_{ic} и h_{in} высоту микровыступов и микровпадин в i -х точках, взятых на базовой длине. Пусть число таких точек по выступам равно n , а по впадинам — m . Геометрическим профилем называется плавная линия, относительно которой равны среднеквадратичные высоты выступов и впадин:

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{ic}^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m h_{in}^2} = R_q.$$

Среднеквадратическая высота выступов (и впадин) R_q в некоторых зарубежных стандартах используется как характеристика шероховатости поверхности листа (например, в американском стандарте). В российском стандарте основной характеристикой шероховатости является показатель R_a , который определяется как *средняя высота неровностей* на базовой длине:

$$R_a = 0,5 \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{ic} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m h_{in} \right).$$

Наряду с этим используется показатель R_z , который характеризует *максимальную высоту неровностей*. Для его определения на базовой длине выбирают пять самых крупных выступов и пять самых глубоких впадин и складывают их средние значения (по абсолютной величине):

$$R_z = \frac{\left| \sum_{i=1}^5 h_{ic} \right| + \left| \sum_{i=1}^5 h_{in} \right|}{5}.$$

Параметры шероховатости R_a и R_z включены в российский стандарт 2789—59 на шероховатость поверхности, и по этим показателям чистота поверхности (шероховатость) машиностроительных деталей подразделяется на 14 классов.

Для холоднокатаного листа гостированы три класса шероховатости поверхности. Классу “глянцевый” соответствует показатель R_a не выше 0,6 мкм (по ГОСТ 2789—59 класс 8 и выше), матовый лист имеет показатель $R_a < 1,6$ мкм, лист класса “шероховатый” имеет среднюю высоту неровностей до $R_a < 3,6$ мкм.

Надо заметить, что высота неровностей имеет большое значение при штамповке листа. Чем она выше (до определенных пределов), тем больше смазки удерживается во впадинах микрорельефа, тем ниже коэффициент трения. При покраске листа краска также прочнее удерживается на шероховатой поверхности, чем на зеркальной. Наиболее качественным листом для штамповки считается лист шероховатый, причем такой, у которого показатель R_a одинаков в продольном и поперечном направлении, так как это обеспечивает одинаковые условия трения в обоих направлениях при штамповке. Матовый лист менее качественный, к тому же к такому листу не предъявляют требований по изотропии шероховатости (по равенству шероховатости по длине и ширине). Наименее ценен для штамповки и окраски лист с зеркальной поверхностью.

С другой стороны, лист с зеркальной поверхностью имеет более высокую отражательную способность, лучший товарный вид, меньшую склонность к коррозии и загрязнению, чем шероховатый. При производстве некоторых видов листа, например трансформаторного, кинескопного и др., стремятся получить зеркальный лист с полным отсутствием шероховатости. Каждый вид листа имеет свою область применения.

Для оценки коэффициента трения и прочности сцепления краски с поверхностью показателей R_a и R_z недостаточно, хотя в ГОСТах оговариваются только эти показатели. Можно представить несколько различных теоретических профилей микронеровностей, имеющих одинаковые значения обоих показателей (рис. 17.2). Такие регулярные профили встречаются при резании металла. В машиностроении уже стандартизованы шесть показателей шероховатости, хотя установлено, что и этого мало. При одинаковых значениях R_a и R_z может быть разной плотность заполнения профиля, которую определяют коэффициентом R_p :

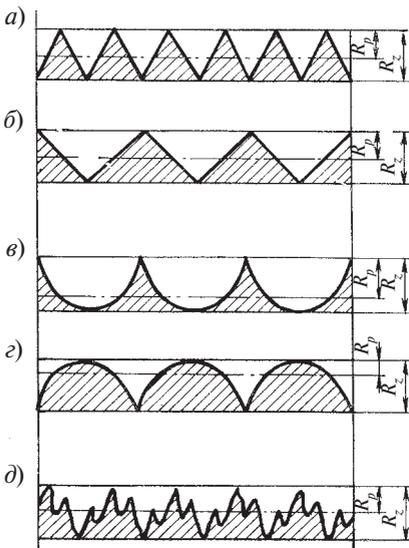


Рис. 17.2. Различные виды шероховатости регулярных поверхностей

Здесь F_c — суммарная площадь (на какой-то длине) от линии выступов до профиля и F — суммарная площадь между линиями выступов и впадин. Если выступы и впадины одинаковы (см. рис. 17.2, а, б), то $R_p = 0,5R_z$. Для профиля, представленного на рис. 17, в, $R_p/R_z > 0,5$, а на рис. 17, г $R_p/R_z < 0,5$. В зару-

бежных стандартах применяют аналогичный показатель Rsk , который больше 0, если $R_p > 0,5R_z$, и меньше 0, если $R_p < 0,5R_z$.

Очевидно, для удержания смазки при штамповке важен также шаг неровностей t , вычисляемый как отношение базовой длины l к количеству выступов и впадин $(m+n)$ на этой длине: $t = l/(m+n)$. В некоторых зарубежных стандартах шаг неровностей обозначается как показатель Sm , а число пиков на длине 1 см — как показатель Pc . Важна также равномерность (регулярность) повторения выступов и впадин. При производстве листа таких регулярных поверхностей, которые представлены на рис. 17.2, не бывает, поэтому необходим еще показатель *нерегулярности микрорельефа*. Все перечисленные показатели шероховатости очень важны для оценки штампуемых сталей, но пока не ставится вопрос об их внедрении в ГОСТ на листовую продукцию.

17.3. Стали для автомобилестроения

Автомобильная промышленность как ведущая отрасль машиностроения во многом определяет требования к холоднокатаному конструкционному листу. Особенно велики требования к химическому составу и структуре сталей, так как от этого зависят штампуемость и основные эксплуатационные характеристики листа. В последние годы резко возросли требования к качеству автомобиля, прочности его деталей, комфортности, экологичности и пр. Одна из важнейших задач — снижение веса автомобиля. В связи с этим разработано и разрабатывается несколько новых марок стали, совершенствуется технология их производства, проводятся мероприятия по очистке сталей, стабилизации их состава, структуры и свойств.

В качестве основных потребительских свойств автомобильных сталей выступают прочностные и пластические характеристики: пределы прочности σ_B и текучести σ_s , относительное удлинение δ . Важны также определенные соотношения между этими характеристиками. В совокупности уровень этих требований определяет комплексную оценку стали, которая называется штампуемостью.

Сталь для штамповки должна обладать сравнительно низким начальным пределом текучести $\sigma_{s0} = \sigma_{0,2}$ и высоким сопротивлением разрушению σ_B , т. е. высоким показателем упрочнения n (в формуле $\sigma_s = \sigma_{s0}(1 + \varepsilon^n)$). Считается, что при $n > 0,23$ листовая сталь обладает хорошей штампуемостью. Часто эта характеристика оценивается отношением $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ (коэффициентом эластичности); штампуемость тем выше, чем меньше этот показатель.

Экспериментально показано, что лист, имеющий предел прочности σ_{Bz} в направлении z , перпендикулярном плоскости листа, более высокий, чем σ_B в плоскости xu листа, лучше поддается вытяжке, чем изотропный материал. Эта характеристика штампуемости оценивается показателем

$$R = \sigma_{Bz}/\sigma_B.$$

Среднее значение показателя R определяется как среднеарифметическое по четырем направлениям в плоскости листа относительно направления прокатки:

$$R_{cp} = (R_0 + 2R_{45} + R_{90})/4.$$

Для определения этого показателя необходимо разорвать четыре образца, вырезанных под углами 0, +45, -45 и 90° к направлению прокатки. На низкоуглеродистых сталях достигнуты показатели $R_{cp} > 1,7-2,7$.

Для характеристики штампуемости важен также показатель плоскостной анизотропии

$$\Delta R = |\sigma_{yy} - \sigma_{xx}|/\sigma_{s0},$$

где y, x — направления вдоль и поперек оси прокатки в плоскости листа.

Чем меньше этот показатель, тем равномернее деформация в плоскости листа при штамповке, меньше склонность к образованию фестонов, точнее размеры изделия. По этому показателю наивысшей штампуемостью обладают изотропные стали, у которых $\Delta R = 0$.

Высокие свойства листа по всем показателям штампуемости достигаются при строгом выдерживании технологических режимов: очистки стали при выплавке, температуры конца прокатки и смотки на НШПС, деформации и термообработки при холодной прокатке. Увеличение количества углерода в стали может приводить к повышению содержания в ее структуре цементита. Нежелательны крупные частицы цементита и распределение их в виде колоний. Размер, форма и распределение зерен цементита в ферритной основе зависят от режимов выплавки, горячей и холодной деформации, рекристаллизационного отжига и процессов старения стали после отжига. Это влияет не только на механические свойства металла, но и на состояние покрытия при оцинковке листа.

Наиболее широко используемым механизмом упрочнения автомобильных сталей является *упрочнение образованием твердых растворов*. Основными легирующими элементами при этом являются марганец, кремний, фосфор. Углерод, азот, медь также приводят к упрочнению твердого раствора, если не входят в карбиды или карбонитриды. К наиболее сильным упрочнителям твердого раствора α -Fe относят С и N, а также P.

Другим механизмом упрочнения является *упрочнение дисперсными частицами* титана, и/или ниобия, и/или ванадия (дисперсионное упрочнение стали). Здесь прирост прочности зависит главным образом от размера (дисперсности) частиц. В свою очередь, размер этих частиц зависит от температурно-скоростных параметров горячей прокатки и охлаждения стали. Наличие мелкодисперсных частиц приводит также к упрочнению стали *в результате измельчения зерна*.

Введение небольших количеств Ti, и/или Nb, и/или V приводит к существенному ослаблению текстуры и, соответственно, к уменьшению объемной и почти полному исчезновению плоскостной анизотропии. Это позволило фирме Preussag Stahl запатентовать так называемую изотропную микролегированную сталь, отличающуюся гарантированным отсутствием плоскостной анизотропии ($\Delta R = 0$).

К основным механизмам упрочнения относят также *упрочнение второй структурной составляющей*. Здесь наибольший интерес представляют стали с двухфазной ферритно-мартенситной структурой (ДФМС), а также ТРИП-стали.

Микроструктура ДФМС представляет собой участки мартенсита (возможно присутствие остаточного аустенита и нижнего бейнита) в ферритной матрице. Наличие второй фазы дает отсутствие площадки текучести на кривой растяжения (без дрессировки) и высокий темп упрочнения при деформации (высокий показатель n), а также высокий прирост прочности при низкотемпературном старении (150–200 °С).

Обычно прочностные свойства ДФМС представляют в виде функции от объемной доли мартенсита. Недостатком ДФМС является высокий уровень плоскостной анизотропии ΔR при низком коэффициенте R_{cp} .

Так называемые ТРИП-стали, разработанные в Японии в конце 1970-х гг., представляют собой наиболее перспективный материал, так как обладают феноменально высоким уровнем пластичности (удлинения) при очень высоком уровне прочности. Такая пластичность обеспечивается превращением остаточного неустойчивого аустенита в мартенсит в процессе пластической деформации.

В табл. 17.2 представлены основные соотношения между пределом прочности и относительным удлинением для различных холоднокатаных сталей. Видно, что в области прочности 400–600 МПа преимущество имеют фосфористые и двухфазные стали по сравнению с микролегированными Nb и V сталями. В области наиболее высокой прочности (600–800 МПа и выше) однозначное преимущество у ТРИП-сталей. Промышленное производство ТРИП-сталей освоено в Европе фирмой Thyssen Krupp, а в Японии фирмой Nippon Steel, получившей на листах толщиной 1 мм $\sigma_b = 614$ МПа, $\delta = 36,5$ %, $R_{cp} = 0,86$, $n = 0,215$. Для высокой штампуемости необходим повышенный коэффициент R_{cp} , что, в свою очередь, обеспечивается формированием в стали определенной кристаллографической текстуры, которая в низкоуглеродистых сталях существенно зависит от форм нахождения C и N в стали. В зависимости от технологии изготовления проката они могут находиться:

1) в твердом растворе — и являться самыми сильными упрочняющими элементами;

2) в переходном состоянии — которое условно можно представить в виде схемы твердый раствор — конденсация на дефектах (облака Коттрелла) — выделение частиц; в этом случае влияние этих элементов на комплекс свойств является сложным, и здесь часто даже небольшое изменение технологии может привести к появлению площадки текучести и сильному старению стали;

3) в виде мелкодисперсных карбонитридов — которые являются сильными упрочнителями по механизмам дисперсионного упрочнения и измельчения зерна;

4) в виде крупных грубых карбидов и/или нитридов — которые практически не влияют на прочность, зато могут повлиять на сопротивление хрупкому разрушению, особенно в условиях циклического нагружения.

Как правило, углерод и азот находятся в рассматриваемых сталях одновременно в нескольких состояниях, при этом чем больше их абсолютное содержа-

Таблица 17.2

Типичные механические свойства различных холоднокатаных сталей

Сталь	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	R_{cp}	ΔR
Низкоуглеродистая типа 08Ю	290–310	180–200	40–50	1,5–1,8	0,4–0,7
Микролегированная изотропная	–	220–280	32–36	1,0–1,2	0
Двухфазная	440–480	260–290	32–38	0,9–1,1	0,4–0,5
Высокопрочная IF	430–460	250–270	34–40	1,4–1,6	0,3–0,4

ние, тем сильнее роль всех перечисленных факторов и тем больше сложностей при создании надежной технологии, обеспечивающей гарантированный уровень потребительских свойств сталей. Поэтому начиная с 1950-х гг. наблюдается устойчивая тенденция по снижению содержания С и N в тонколистовых штампуемых сталях. Уже в 1970-х гг. некоторые металлургические компании освоили промышленное вакуумирование стали, на базе чего начали производство сталей, содержащих 0,01–0,02 % С и менее 0,008 % N (экстранизкоуглеродистые). В 1980-х гг. на базе этих сталей при дополнительном легировании фосфором (до 0,10 %) создаются так называемые ВН-стали, или стали с гарантированным упрочнением после штамповки деталей и окончательным упрочнением в результате старения при последующей сушке лакокрасочного покрытия.

С конца 1980-х гг. начинается период массового производства особо низкоуглеродистых сталей, содержащих С и N, как правило, не выше 0,006–0,005 %. Столь низкий уровень позволяет достаточно легко вывести эти элементы из твердого раствора путем дозированного микролегирования Ti и/или Nb. При этом получают так называемую IF-сталь, или сталь, свободную от атомов внедрения (и, соответственно, с очень низкими исходными прочностными свойствами). При упрочнении этих сталей по вышеперечисленным механизмам наблюдается существенно более высокий уровень пластических свойств, чем у обычных низкоуглеродистых сталей.

В настоящее время ряд зарубежных металлургических фирм работает над созданием технологии производства сталей со сверхнизким содержанием С и N (менее 0,001–0,002 %), а также упрочненных сталей на их основе. Это направление можно считать наиболее перспективным для создания высокопрочных холоднокатаных сталей с $\sigma_{0,2} > 250\text{--}270$ Н/мм² с сохранением особо высокого уровня штампуемости ($\delta > 35\text{--}38$ %; $R > 1,8\text{--}2,0$).

Упрочненные IF-стали позволяют сохранять очень высокий уровень коэффициента R ($R > 1,6\text{--}1,7$) при $\sigma_b > 400$ МПа. Стали ДФМС и ТРИП-стали характеризуются очень низким уровнем коэффициента R (около 1,0), хотя для высокопрочных сталей есть пути его повышения.

Интенсивные исследования и промышленное внедрение тонколистовых холодно- и горячекатаных сталей повышенной прочности и пластичности (СПП) начались в США в первой половине 1970-х гг. в связи с необходимостью снижения веса автомобилей. В Японии аналогичные исследования начались практически одновременно с США. С конца 1970-х гг. эта страна начинает занимать лидирующее положение в области создания новых марок СПП и их серийного производства. Здесь также начали с попытки применения холоднокатаной стали с высоким уровнем прочностных свойств: $\sigma_b > 500$ МПа, $\sigma_{0,2} = 340\text{--}400$ МПа; однако штампуемость этих сталей оказалась неудовлетворительной в отличие от стали с $\sigma_b > 400$ МПа и $\sigma_{0,2} = 270\text{--}300$ МПа.

С начала 1980-х гг. за рубежом, и в особенности в Японии, основное внимание начинают уделять сталям так называемого промежуточного уровня прочности, имеющих $\sigma_b = 330\text{--}400$ МПа, $\sigma_{0,2} = 220\text{--}280$ МПа. Как правило, это низкоуглеродистые (или особо низкоуглеродистые) стали, упрочненные фосфором.

Фирма Nissan довела применение подобных сталей в моделях легковых автомобилей 1982–1984 гг. до 35 % от массы черного кузова, при этом в фирме

были сформулированы следующие требования к уровню механических свойств: $\sigma_{\text{в}} > 372$ МПа, $\sigma_{0,2} < 265$ МПа, $\delta > 33$ %, $R > 1,4$. Были разработаны стандарты для листовых низкоуглеродистых марок стали, а также для высокопрочной листовой стали, включая холоднокатаную прочностью до 1180 МПа (табл. 17.3). Стандартизована также горячеоцинкованная продукция на базе некоторых из этих сталей. Для изготовления панелей автомобильного кузова стали широко использовать высокопрочную листовую сталь класса 340 МПа, упрочняемую горячей сушкой покрашенной поверхности листа (ВН-сталь). ВН-эффект достигается за счет выделения дисперсионно-твердеющих частиц (карбидов) при температурах сушки около 170–300 °С. Регулируя режимы горячей прокатки, при производстве дисперсионно-упрочняемых сталей разработали высокопрочную сталь класса 590 МПа с улучшенными технологическими свойствами при штамповке.

Таблица 17.3

Марки стали, разработанные Федерацией ЧМ Японии

Сталь	Временное сопротивление, МПа	Обозначение	Стали производства Kawasaki Steel
Холоднокатаная			
Низкоуглеродистая	260–270	JSC270C, D, E, F, JSC260G	Особо низкоуглеродистая без фаз внедрения
Упрочняемая при горячей сушке	270, 340	JSC270H, JSC340H	Особо низкоуглеродистая
Общего назначения	340–440	JSC (TS value) V	Низкоуглеродистая с упрочнением твердого раствора
С высоким отношением предела текучести к пределу прочности	440, 590	JSC (TS value) R	Низкоуглеродистая дисперсионно-упрочняемая
Для глубокой вытяжки	340–440	JSC (TS value) P	Особо низкоуглеродистая
С низким отношением предела текучести к пределу прочности	590–1180	JSC (TS value) Y	В основном двухфазная
Оцинкованная отожженная холоднокатаная			
Низкоуглеродистая	260–270	JAC270C, D, E, F, JAC260G	Главным образом особо низкоуглеродистая без фаз внедрения
Упрочняемая при горячей сушке	270, 340	JAC270H, JAC340H	Особо низкоуглеродистая
Общего назначения	340–440	JAC (TS value) W	Главным образом низкоуглеродистая с упрочнением обработкой на твердый раствор
С высоким отношением предела текучести к пределу прочности	440, 590	JAC440R, JAC590R	Низкоуглеродистая дисперсионно-упрочняемая
Для глубокой вытяжки	340–440	JAC (TS value) P	Главным образом особо низкоуглеродистая без фаз внедрения

Лист из двухфазной стали, также в холоднокатаном состоянии, обладает высокой пластичностью, показывает хорошую способность к формоизменению при обтяжке и к упрочнению при горячей сушке.

Холоднокатаную листовую сталь класса прочности выше 980 МПа применяют для изготовления усилителей бампера, дверей, для других армирующих элементов кузова. Повысить пластичность сверхвысокопрочной листовой стали можно лишь в ограниченной степени, поэтому ограничен выбор деталей, которые можно изготовить из такой стали. Для расширения области применения необходимо не только улучшить пластичность металла, но и разработать новые технологии обработки его давлением. Это не только расширит номенклатуру изделий, но и снизит затраты на материал и стоимость обработки.

В России в конце 80-х гг. были также сформулированы основные требования к холоднокатаным сталям четырех классов прочности — 24, 28, 32 и 36 (соответственно с пределом текучести 240, 280, 320 и 360 Н/мм²), а также к тонколистовому горячекатаному прокату повышенной прочности. Разработанные в России СПП относятся к поколению сталей 1980-х гг. и уступают по комплексу потребительских свойств современным зарубежным сталям.

До недавнего времени производство СПП было сосредоточено в основном на ОАО «НЛМК». По прочностным характеристикам холоднокатаный стальной продукт, производимый на НЛМК, можно условно разделить на три группы:

1. Малопрочные стали с пределом текучести до 205 Н/мм² (класс 20).
2. Стали повышенной прочности с $\sigma_{0.2}$ не менее 235 Н/мм² (класс 24).
3. Стали повышенной прочности с $\sigma_{0.2}$ не менее 275 Н/мм² (класс 28).

К первой группе до недавнего времени относилась только сталь 08Ю — низкоуглеродистая сталь, успокоенная алюминием. Технология производства этой стали на НЛМК обеспечивает выход продукции категории вытяжки ВОСВ и ОСВ на уровне 98 %. Продолжаются работы по совершенствованию технологии производства этой стали, направленные на улучшение текстуры стали, способствующей повышению ее штампуемости и выхода проката категории вытяжки ВОСВ-Т. Производимые на ОАО «НЛМК» фосфористые низкоуглеродистые стали имеют предел текучести не менее 235 Н/мм², что достигается за счет твердорастворного упрочнения фосфором. Так как легирование фосфором минимально снижает штампуемость, эти стали обладают хорошим сочетанием повышенной прочности и штампуемости. В настоящее время на ОАО «НЛМК» отрабатывается технология производства стали с гарантированным уровнем ВН-эффекта. Ведутся работы по совершенствованию технологии выплавки, вакуумирования и разлива, обеспечивающие получение заданного химического состава в узких пределах. Необходимо также оптимизировать режимы горячей и холодной прокатки и отжига для получения качественной ИФ-стали. Достигнутый уровень характеристик этих сталей существенно отличается от сталей, производимых на базе 08Ю. Среди сталей первых двух групп особый интерес для автомобильной промышленности представляют ИФ-стали высокопрочные и с ВН-эффектом как имеющие лучшее сочетание прочности и пластичности. Минимальный уровень предела текучести этих сталей составляет 190–240 Н/мм². Третья группа сталей (класс 28) представлена сталями 08РСЮТ, 07РБЮ, комплексно упрочненными карбонитридами титана и ниобия и элементами, входящими в твердый раствор феррита (Mn, Si).

Химический состав стали класса IF, сотые доли процента

Производство	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N	Ti	Nb
Северсталь	0,2	1,0	12	0,5	0,3	3	2	3	4	0,5	5	4
Мировое	0,2	0,9	14	0,8	0,8	–	–	–	4	0,2	5	2

На ОАО “Северсталь” также осваивается производство IF-стали, химсостав которой приведен в табл. 17.4.

Выявлено, что существенным фактором, влияющим на уровень механических свойств, является содержание титана и ниобия в зависимости от стехиометрического соотношения указанных элементов, углерода, серы и азота. Если содержание Ti и Nb, которые являются сильными карбидообразующими, меньше стехиометрических, то их недостаточно для связывания углерода, азота и серы. Следовательно, структура металла нестабилизированна, и при таком соотношении наблюдается повышенный предел текучести (более 18 кгс/мм²) и пониженное относительное удлинение (менее 42 %).

Технология производства стали типа IF постоянно совершенствуется и на данный момент позволяет производить холоднокатаный прокат, обладающий следующими свойствами: $\sigma_{0,2} = 140\text{--}170$ МПа; $\sigma_B = 290\text{--}320$ МПа; $\delta = 42\text{--}48$ %; $\sigma_{0,2}/\sigma_B = 0,48\text{--}0,52$; $R = 2,0\text{--}2,5$; $n = 0,21\text{--}0,24$.

Полученный уровень механических свойств соответствует требованиям по ГОСТ 9045 для листа категории ВОСВ-Т, но относительное удлинение соответствует нижнему предельному значению, и на данный момент активно ведутся работы, направленные на увеличение пластичности.

17.4. Технология производства конструкционного листа

Технологию производства холоднокатаного листа рассмотрим на конкретном примере ПХЛ комбината ОАО “Северсталь” (рис. 17.3). Как видно, это производство имеет два стана холодной прокатки (5-клетевой бесконечной прокатки и 4-клетевой непрерывный), полный набор оборудования для проведения операций по производству конструкционного листа, а также агрегаты для непрерывного горячего цинкования, для непрерывного алюминирования и два комбинированных агрегата для обработки динамной стали.

Исходной заготовкой для производства холоднокатаного автомобильного и другого конструкционного листа является горячекатаный лист в рулонах, поступающий по подземному транспортеру с широкополосного стана. Толщина этого листа обычно около 2–4 мм. Порядок операций, которым подвергается лист в цехе холодной прокатки, следующий:

снятие окалины с поверхности, подготовка поверхности листа для прокатки;

прокатка на стане холодной прокатки;

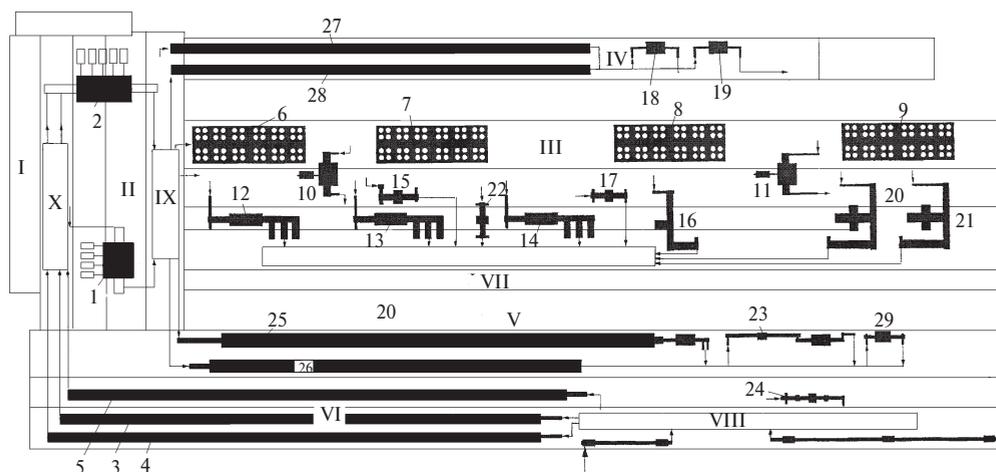


Рис. 17.3. Схема расположения оборудования производства холодной прокатки листа (ПХЛ) ОАО “Северсталь”:

I — участок подготовки производства; *II* — пролет станов; *III* — участок колпаковых печей; *IV* — участок электротехнических сталей; *V* — цех покрытий металла; *VI* — цех травления металла; *VII* — пролет сортировки и упаковки холоднокатаного металла; *VIII* — склад рулонов; *IX* — склад горячекатаных рулонов; *X* — склад травленых рулонов; 1 — 4-клетевой стан; 2 — 5-клетевой стан; 3–5 — агрегаты непрерывного травления № 1–3; 6–9 — колпаковые печи для отжига, блоки № 1–4; 10, 11 — дрессировочные станы № 1 и 2; 12–22 — агрегаты поперечной резки АПР № 1–11; 23 — агрегат продольной резки; 24 — агрегат комбинированной резки; 25 — агрегат непрерывного горячего алюминирования (АНГА); 26 — агрегат непрерывного горячего цинкования (АГНЦ); 27, 28 — комбинированные агрегаты обработки динамной стали, линии А и Б; 29 — агрегат перемотки и осмотра оцинкованных полос

рекристаллизационный отжиг;
 дрессировка;
 обработка на агрегатах продольной и поперечной резки, контроль качества, сортировка и упаковка продукции.

Рассмотрим каждую технологическую операцию подробно.

17.4.1. Снятие окалины

Освобождение поверхности листа от окалины происходит на типовых агрегатах непрерывного травления (АНТ) (рис. 17.4). Очередной рулон горячекатаного листа устанавливается на накопитель рулонов *I*, а затем передается на разматыватель *2*. Передний конец рулона заправляется в роликотправильную машину *3* и после правки выравнивается на ножницах *4* для последующей сварки концов рулонов на сварочном агрегате *5*. Сварка встык под слоем флюса обеспечивает высокое качество сварки. Так как сварочный грат выступает над поверхностью листа, его счищают с помощью гратоснимателя, представляющего собой систему резов разного типа. Необходимо отметить, что после зачистки на шве сохраняется утолщение по сравнению с остальной частью листа примерно на 0,1 мм. При последующей прокатке это будет иметь большое значение. Поэтому место шва необходимо пометить. На некоторых агрега-

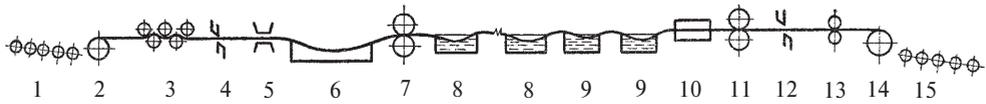


Рис. 17.4. Схема расположения оборудования типового АНТ

тах в сварной шов вносят изотопы металлов, на других — рядом со швом пробивают отверстие на специальном небольшом прессе.

После сварочной машины процесс становится непрерывным, и чтобы обеспечить его стабильность, необходимо петлевое устройство 6. Во-первых, оно создает определенный запас полосы на момент сварки, которая осуществляется в неподвижном состоянии концов полос. Во-вторых, для прохождения всех последующих агрегатов необходимо обеспечить постоянство натяжения полосы, которое поддерживается автоматически с помощью петлерегуляторов, входящих в состав петлевого устройства. На этом заканчивается головная часть АНТ. Набор оборудования этой части практически одинаков для всех непрерывных агрегатов, с которыми мы будем знакомиться далее, хотя, конечно, конструктивное оформление их может быть разным.

Далее по технологической цепочке установлен дрессировочный стан 7. Дрессировка — это деформация металла в валках стана кварто с обжатием 3–5 %. Хрупкая окалина разламывается и частично (до 13 % от общей массы) осыпается. Установлено, что применение дрессировки позволяет увеличить скорость травления в 1,5–1,8 раза. В последнее время вместо дрессировочной клетки перед правильной машиной устанавливают изгибно-растяжную машину, представляющую собой четыре ролика, вокруг которых огибается полоса. При деформации 0,7–1,5 % (знакопеременный изгиб с растяжением) окалина растрескивается, и до 23 % ее осыпается. Это позволяет увеличить скорость травления на 30 %. Изгибно-растяжная машина дешевле, конструктивно проще, чем дрессировочный стан, и способствует улучшению плоскостности подката, поэтому многие фирмы начиная с 1980 г. проектируют только такие АНТ. Для лучшего удаления окалины после изгибно-растяжной машины устанавливают дробеметную или пескоструйную установку. В результате степень очистки от окалины увеличивается до 90–95 %, а продолжительность травления сокращается почти на 90 %. За рубежом и в России разрабатываются технологии, позволяющие полностью удалить окалинку механическим путем за счет гидроабразивной обработки чугунными порошками. При этом травление полностью не исключается, оно выполняет роль финишной операции.

После травления в кислотных ваннах 8 лист проходит ряд ванн 9, в которых сначала его промывают в горячей воде, затем остатки кислоты удаляют в нейтрализующих щелочных растворах, и после промывки в холодной воде полоса поступает в сушильную печь 10. Иногда сушку полосы осуществляют струями горячего воздуха. Пройдя затем через промасливающую камеру 11, заполненную масляным туманом, лист покрывается мелкими капельками смазки, необходимой для прокатки. Эффективны промасливающие камеры, осуществляющие промасливание листа в электростатическом поле.

Далее лист необходимо разделить на ножницах 12 и смотать в рулоны на моталках 14. При этом существует две возможности. На современных металлур-

гических комбинатах разрезают бесконечную полосу точно по месту сварки, вырезая утолщенные места сварки. При такой технологии масса рулона до и после обработки на АНТ одинакова. На современных высокопроизводительных НШПС, как известно, масса рулона достигает 36–40 т. Это обеспечивает максимальную производительность как станов горячей, так и холодной прокатки. Однако на многих ШПС, использующих катаные слябы для прокатки, масса горячекатаного рулона значительно меньше требуемой для холодной прокатки. На АНТ укрупняют рулон, сматывая металл из нескольких слябов. На готовом рулоне может сохраниться до четырех-пяти швов. Швы неизбежны также при прокатке на стане бесконечной прокатки. Технология холодной прокатки рулона со швами значительно сложнее, а производительность ниже, чем при их отсутствии.

На последних АНТ перед смоткой полосы в рулон вводят еще одну технологическую операцию — обрезку дисковыми ножницами кромок листа на 10–15 мм с двух сторон. Подкат с обрезанными кромками при прокатке на стане холодной прокатки обеспечивает практически идеальную планшетность листа.

Основная технологическая операция на АНТ — травление полосы. Большинство существующих агрегатов используют серную кислоту концентрацией около 25 %. Температура кислотной ванны повышается до 96 °С, так как с повышением температуры резко возрастает скорость травления.

На поверхности горячекатаного листа имеется окалина толщиной примерно 30–40 мкм. Толщина ее и состав зависят от температуры конца прокатки и смотки. Наружный слой окалины состоит из гематита Fe_2O_3 , толщина его не превышает 1–2 % от общей толщины окалины. Гематит — это порошок белого цвета, который легко удаляется с поверхности и легко травится в серной кислоте. Следующий слой окалины — магнетит Fe_3O_4 , занимающий 3–4 % от общей толщины, — не реагирует с серной кислотой. Толщина его и плотность зависят от температуры смотки горячекатаного листа, и чем она ниже, тем меньше и рыхлее слой магнетита, тем легче и быстрее проходит процесс травления. Задача дрессировки состоит в том, чтобы разломать слой магнетита и дать возможность проникнуть кислоте к основному слою окалины — вюстити FeO , занимающему до 95 % общего слоя окалины. Скорость реакции вюstitа с кислотой определяет производительность процесса травления в целом. Образовавшийся в результате химической реакции водород, с одной стороны, полезен, так как способствует отделению магнетитовых участков, которые оседают на дне кислотной ванны, с другой стороны, вреден, потому что внедряется в поверхностный слой здорового металла, охрупчивая его. Чтобы предотвратить водородную хрупкость металла, в кислотную ванну добавляют ингибиторы. Ингибиторы представляют собой сложные растворы на основе органических соединений, выделяющие поверхностно-активные вещества, которые масляной пленкой толщиной в несколько молекул обволакивают поверхность основного металла, препятствуя проникновению водорода. Пленка должна быть достаточно плотной, чтобы полностью и надежно защитить поверхность металла. Толстые пленки вредны, поскольку после травления плохо смываются в водных ваннах и могут сохраниться после прокатки на поверхности готового листа в виде грязных пятен. Таким образом, качество ингибитора определяется его способностью предотвращать водородную хрупкость, но не оставлять тол-

стых масляных пятен на готовом прокате. Идеальных ингибиторов не существует, поэтому постоянно ведутся поиски новых составов.

Во многих современных цехах холодной прокатки на АНТ применяют соляную кислоту. Она привлекательна тем, что со всеми окислами железа реагирует одинаково и на 40–60 % быстрее, чем серная кислота. При этом вероятность появления водородной хрупкости значительно уменьшается. Ее можно полностью предотвратить при более дешевых ингибиторах, дающих более тонкие и менее плотные пленки, чем при сернокислотном травлении. Солянокислотное травление обеспечивает снижение себестоимости этой операции на 20–25 %, хотя сама соляная кислота значительно дороже серной. Однако травление в соляной кислоте организационно сложнее, чем в серной. Требуется более сложные закрытые ванны, как правило башенного типа. Необходимы специальные участки цеха, осуществляющие хранение, регенерацию, транспортировку соляной кислоты в соответствии со сложными требованиями техники безопасности.

Многие заводы, использующие серную кислоту, пытаются перейти на соляную. Однако это очень сложно, потому что участок травления требует полной переделки, а точнее, постройки нового специализированного участка травления с дополнительными отделениями регенерации и хранения кислоты, специализированными складами и емкостями, транспортными средствами и т. д. Соляная кислота очень агрессивна и летуча, и при ее использовании требуются особые средства техники безопасности. Ее нельзя хранить в металлической посуде, как серную, нельзя строить открытых ванн и хранить в открытых емкостях.

17.4.2. Прокатка

Протравленные и промасленные рулоны поступают на стан холодной прокатки. Наиболее производительными являются непрерывные станы, имеющие три-шесть клеток кварто, образующих непрерывную группу. Например, непрерывный 5-клетевой стан 1200 ММК (рис. 17.5) предназначен для прокатки тонкого листа и жести толщиной от 0,15 до 0,60 мм. Перед клетями имеется разматыватель рулонов, а после стана — моталка для намотки готовых рулонов. При прокатке на непрерывном стане полоса поступает в клетки стана на заправочной скорости около 3–5 м/с (реже — до 8 м/с), так как моталки надежно работают при низких скоростях (не выше 10 м/с). После захвата моталкой переднего конца рулона стан разгоняется до рабочей скорости 30–35 м/с. Задний конец рулона выходит из клеток стана также на заправочной скорости, так как при больших скоростях за счет сильных колебаний и ударов о детали стана он разрушается. При прокатке швов также необходимо снижать скорость прокатки до некоторой промежуточной скорости, так как при высоких скоростях велики динамические нагрузки и возрастает опасность обрыва листа между клетями.

Современные тенденции, устраняющие эти недостатки, направлены на строительство станов, позволяющих производить бесконечную прокатку листа. На стане бесконечной прокатки производительность выше и процесс прокатки протекает стабильнее, чем на непрерывном стане. К этому типу относятся,

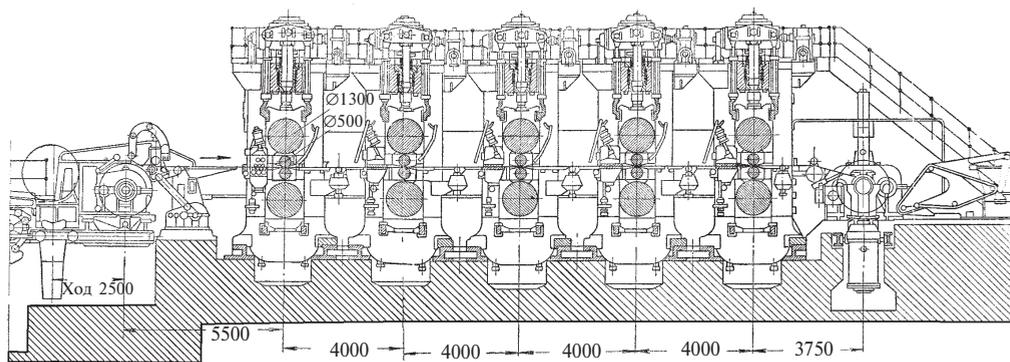


Рис. 17.5. Непрерывный стан холодной прокатки листа 1200

например, 5-клетевые станы 1700 на ЧерМК и 1420 в Японии (рис. 17.6). Головная часть агрегата состоит из традиционного набора машин и механизмов, характерных для непрерывных агрегатов: размотывателя, правильной машины, ножниц для выравнивания концов, сварочного агрегата с гратоснимателем и петлевого устройства.

На стане бесконечной прокатки заправочная скорость необходима только один раз, в остальное время прокатка ведется на постоянной рабочей скорости. Однако при прокатке швов приходится уменьшать скорость во избежание обрывов. Таким образом, только швы вносят возмущения в стабильность процесса.

Необходимо отметить, что нестабильность процесса прокатки на швах связана не только с тем, что в этом месте полоса имеет утолщение от грата. При сварке двух рулонов стыкуется передний конец одного и задний конец другого рулона. А они, как известно, имеют разную толщину в силу температурного клина, разности натяжений и других факторов, действующих на НШПС. При бесконечной прокатке необходимо иметь возможность быстро перестраивать весь процесс, когда наступает прокатка следующего рулона. Это возможно только при наличии автоматизированной системы управления станом. Кроме того, необходима система подбора рулонов, с помощью которой под сварку подаются рулоны, наиболее близкие по толщине свариваемых концов. А это требует того, чтобы склад горячекатаных рулонов позволял легко добираться до любого рулона, где бы он ни находился, и оперативно транспортировать его

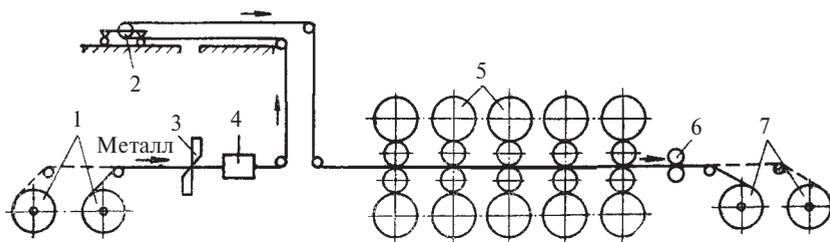


Рис. 17.6. Схема стана бесконечной прокатки 1420:

1 — размотыватели; 2 — петлевое устройство; 3 — ножницы; 4 — сварочная машина; 5 — рабочие клетки; 6 — летучие ножницы; 7 — моталки

на разматыватель. Такой автоматизированный склад, управляемый полностью от ЭВМ, имеется на стане бесконечной прокатки 1420 НЛМЗ. Соответственно этот стан обладает и другими автоматизированными системами, которые позволяют быстро перестраивать процесс при изменении параметров прокатываемой полосы. Стан вообще может работать только в автоматизированном режиме, когда всякое вмешательство в процесс прокатки осуществляется либо в автоматическом режиме, либо по команде оператора только через управляющую ЭВМ.

Стремление стабилизировать процессы травления и прокатки и удешевить производство в целом логично привело к идее совместить эти операции в едином агрегате. Такое решение впервые было предложено в 1961 г., но первый совмещенный травильно-прокатный агрегат появился в Японии лишь в 1981 г. На таком агрегате сокращается масса оборудования, уменьшаются потери от брака, потребление электроэнергии, пара и других энергоресурсов, увеличивается производительность цеха и т. п. Подобные агрегаты имеются в США, Японии, Южной Корее и других странах. Один из наиболее совершенных совмещенных агрегатов установлен во Франции. Полоса толщиной 0,4–3,0 мм прокатывается из горячекатаных рулонов толщиной 1,8–6,0 мм. Агрегат имеет четыре клетки кварто с длиной бочки 2030 мм, позволяет вести прокатку на скорости 30 м/с и формировать рулоны после прокатки массой до 54 т. Травление в соляной кислоте производится на скорости 6 м/с.

Современные многоклетевые непрерывные и бесконечные станы холодной прокатки листа оснащены быстродействующими гидронажимными устройствами (ГНУ), системами поворота (скрещивания) валков, регулируемого изгиба, осевого смещения валков при S-образной профилировке (система CVC), зонального охлаждения валков за счет регулируемой подачи эмульсии (САПЭ), имеют опорные валки с динамически регулируемой профилировкой. В совокупности все эти средства обеспечивают минимальную разнотолщинность и идеальную плоскостность листов. Отклонения первого порядка регулируют с помощью системы изгиба (воздействуют на ГНУ), более тонкие отклонения — путем смещения валков (CVC), более тонкую регулировку осуществляют с помощью многозонного охлаждения валков.

В 60-х гг. во многих странах, в том числе в России, построено несколько одноклетевых реверсивных станов. Известно, что на низких очагах деформации с уменьшением диаметра рабочих валков снижается давление металла и уменьшается упругое сплющивание валков. Предельная толщина проката, которую можно прокатать на валках данного диаметра D , примерно равна $0,001D$, следовательно, чем меньше диаметр рабочих валков, тем тоньше предельная прокатываемая полоса. Но валки с малым диаметром требуют нескольких опорных валков, поэтому для прокатки тонкого листа и ленты используют станы с многовалковой клетью с диаметрами рабочих валков от 3 до 55 мм, что позволяет производить лист толщиной до 20 мкм и ленту и фольгу толщиной до 2 мкм. Конечные толщины достигаются при неоднократных промежуточных отжигах полосы, устраняющих наклеп (лентой называется лист шириной не выше 400 мм, обязательно в рулоне; фольга — это очень тонкий лист в виде отдельных карточек или в рулоне; видимо, более четких границ, разделяющих тонкий лист, фольгу и ленту, не существует).

Например, клеть 20-валкового стана 1200, предназначенная для прокатки листа из труднодеформируемых сплавов, имеет диаметр рабочих валков 55 мм и три ряда опорных валков с диаметрами 100, 175 и 300 мм (рис. 17.7). Перед и после клетки установлены моталки.

Современные реверсивные станы отличаются большим разнообразием конструкций и технических параметров. Но технология прокатки на всех станах такого типа примерно одинакова. Исходный рулон, полученный на стане горячей или холодной прокатки, масса которого на разных станах разная (на станах кварто может достигать 30–45 т), устанавливается на одну из моталок, затем на заправочной скорости заправляется на другую, после чего стан разгоняется до рабочих скоростей 10–20 м/с. Следующий пропуск осуществляется в обратном направлении. Количество пропусков ограничивается только необходимостью отжига листа после значительного его наклепа. Нижний предел толщин листа, прокатываемого на таком стане до первого отжига, достигает 0,2 мм, а с несколькими отжигами — значительно меньше.

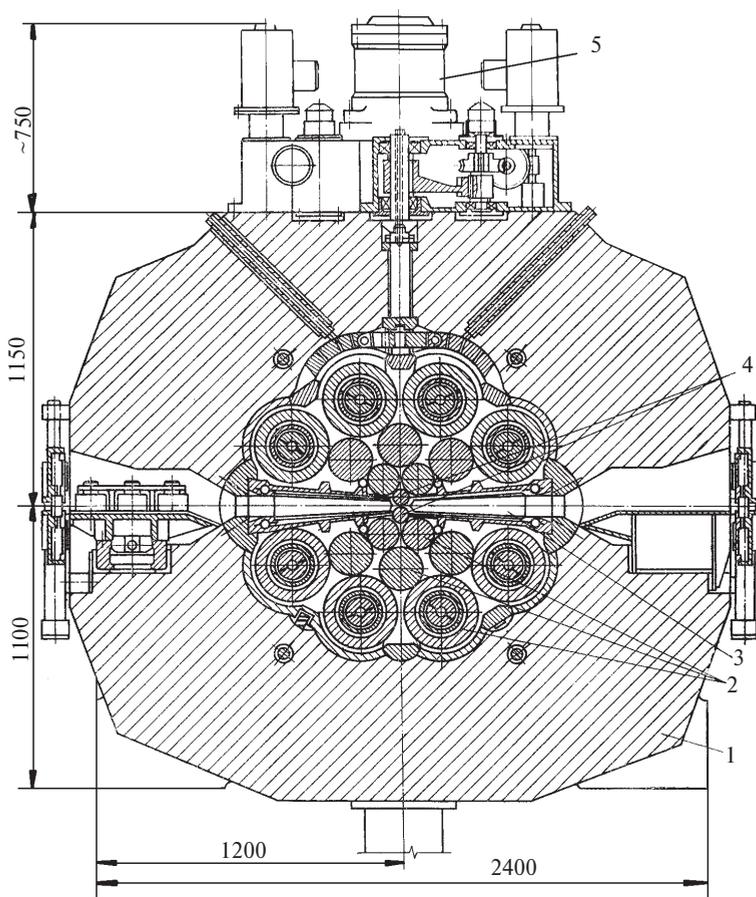


Рис. 17.7. Рабочая клеть 20-валкового стана 1200:
 1 — станина; 2 — опорные валки; 3 — проводка; 4 — рабочие валки;
 5 — нажимное устройство

Реверсивные листовые станы характеризуются большой гибкостью в работе, они предназначены для прокатки широкого сортамента листа как по размерам, так и по маркам прокатываемых сталей. На таких станах производят основную массу листа из нержавеющей, легированных, трансформаторных и специальных марок сталей. Стоимость реверсивного стана в 2,5–3,0 раза ниже стоимости непрерывного стана, а производительность может достигать 100 т/ч. В СССР в 60-х гг. построено несколько реверсивных станов: станы кварто 1200 на НЛМЗ, 1700 на ЧелМЗ, 1700 на КарМет, 1680 на заводе “Запорожсталь” и др., а также 20-валковый стан 1200 на Верхне-Салдинском заводе и еще несколько многовалковых листовых станов. Эти станы предназначены для прокатки листа толщиной 0,2–2,5 мм. Суммарное обжатие без промежуточного отжига на них достигает 70–75 %, а при соответствующих смазках даже 85 %.

В последние годы для производства жести и тонких полос с повышенными требованиями по разнотолщинности и плоскостности в новых цехах холодной прокатки устанавливают 2-клетевые реверсивные станы. В Южной Корее установлен такой стан производительностью 400 тыс. т/год. В первой клетке ведется чистовая прокатка с толщины 0,2–0,6 мм до 0,15–0,36 мм, а во второй — дрессировка с обжатием до 2 %. Обе клетки оснащены быстродействующими ГНУ в системе регулируемого изгиба и системой осевого смещения валков (CVC). Работает также автоматическая система подачи смазки, позволяющая одновременно регулировать тепловой профиль валов.

Реверсивный 2-клетевой стан 1400 фирмы SMS–Demag установлен на ММК (пущен в 2002 г.). Он оснащен валками CVC, быстродействующим гидронажимным устройством и системой изгиба валков, системой многозонного охлаждения валков, роликовой системой измерения планшетности, плавающим разматывателем, системами компенсации эксцентриситета валов, регулировки их положения и балансировки и т. д. На ММК установили, что S-образную профилировку должны иметь как рабочие, так и опорные валки.

17.4.3. Рекристаллизационный отжиг

После холодной прокатки металл упрочняется (наклепывается) и теряет пластичность. Чтобы вернуть пластические и прочностные свойства металла, необходимо нагреть его до температуры начала рекристаллизации и охладить. При этом неравновесные вытянутые зерна деформации уступят место равноосным ненаклепанным зернам отожженного металла. Низкоуглеродистые штампуемые стали отжигают при температурах 650–720 °С, при которых не происходит фазового переход $\alpha \rightarrow \gamma$, но достаточно активно протекают процессы рекристаллизации металла. Как правило, перед отжигом требуются операции подготовки листа. После холодной прокатки на поверхности металла имеется прокатная эмульсия, а также остатки травильных шламов, следы масла от механизмов и другие загрязнения. Загрязненность листа зависит от типа технологической смазки, режима прокатки, условий работы валков. Несмотря на то что в последних клетях современных станов предусмотрена прокатка с подачей моющего раствора вместо эмульсии, загрязненность листа остается высокой. При отжиге оставшиеся на полосе загрязнения сгорают с образованием сажи-стого налета из различных химических соединений, который при последую-

шей прокатке (дрессировке) вкатывается в поверхность с образованием брака “пригар эмульсии”. Кроме того, смешиваясь с эмульсией, сажа образует густую грязь, оседающую не только на полосе, но и на валках дрессировочного стана. Это приводит к другим видам брака. Поэтому после холодной прокатки во многих цехах, особенно производящих листы с покрытиями, установлены агрегаты электролитической очистки (АЭО) поверхности листа. На большинстве станов после прокатки перед отжигом вводится обработка в промывочном агрегате. Непрерывный агрегат промывки состоит из обычного набора машин в головной части (разматыватель, правильная машина, сварочная машина для сварки внахлест и петленакопитель). Далее следуют ванны для промывки в щелочных растворах и воде, после чего сушильная камера, ножницы для резки рулонов по месту шва и моталка для смотки рулонов.

После очистки металл подвергается отжигу. На многих заводах, например на ЧерМК, отжиг осуществляют в колпаковых печах (рис. 17.8). На поддон печи загружают три-четыре рулона один на другой. Затем садку 1 накрывают тонким стальным муфелем 3, под которым наводят безокислительную атмосферу диссоциированного аммиака (смесь из 92–97 % азота и 3–8 % водорода). С помощью песочных затворов полностью предотвращают подсос воздуха под муфель в процессе нагрева и охлаждения. Сверху муфель накрывается нагревательным колпаком 2, облицованным огнеупорным кирпичом, который снизу имеет инжекционные горелки. Циркулирующие под колпаком продукты горения 5 передают тепло через муфель на нагреваемые рулоны.

Для равномерности и ускорения нагрева защитный газ под муфелем приводится в движение специальными вентиляторами 4.

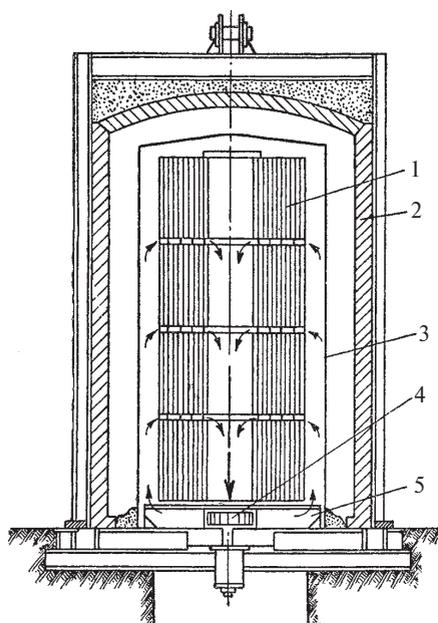


Рис. 17.8. Схема колпаковой печи для отжига рулонов

Температура выдержки металла для кипящих сталей 680–700 °С и для спокойных 700–720 °С, время выдержки 6–8 ч. Чтобы увеличить долю металла, предназначенного для ОСВ, применяют промежуточную выдержку при 600 °С. После нагрева до требуемой температуры и регламентированного времени выдержки наружный нагревательный колпак снимают, муфель накрывают охлаждающим колпаком, снабженным вентиляторами для ускорения охлаждения садки, и всю садку охлаждают до комнатной температуры. Обычно садку раскрывают уже при температуре 120–180 °С. Скорость охлаждения достигает 40 °С/с. Общая продолжительность отжига рулонов составляет 30–50 ч.

Такая технология проста, но обладает существенными недостатками. Во-первых, процесс отжига очень длителен, поэтому требуется много колпаковых печей. Во-вторых, при отжиге плохо очищенного листа сгорают следы смазки, образуя грязные пятна. В-третьих, при нагреве, а затем при

охлаждении рулонов в колпаках наружные витки рулонов нагреваются и остывают с иной скоростью, чем внутренние. Скорость нагрева и охлаждения влияет на формирование структуры металла и величину зерна, поэтому возможны разные свойства металла по длине листа.

Одним из основных недостатков отжига в колпаковых печах плотно сматанных рулонов является схватывание, или слипание, витков между собой, особенно крупных рулонов массой выше 25 т. При размотке поверхность металла теряет качество, возможно даже вырывание приварившихся кусочков металла, что полностью портит поверхность листа. Чтобы предотвратить схватывание витков, прокатку в последней клетке стана ведут на шероховатых валках с $R_a = 2-3$ мкм. Однако прокатка на шероховатых валках увеличивает загрязненность поверхности листа.

Одним из решений является отжиг в колпаковых печах распушенных рулонов. После очистки на АЭО или после промывочного агрегата полоса сматывается в рулон с очень небольшим натяжением, образуя распушенный рулон. Отжиг распушенных рулонов позволяет не только предотвратить схватывание витков, но и сократить цикл обработки в два-три раза, а также повысить стабильность свойств металла за счет более равномерного нагрева садки. Однако при отжиге распушенных рулонов производительность отжигового отделения резко падает, так как в колпаковую печь устанавливают только два распушенных рулона, тогда как плотномотанные рулоны можно размещать в три-четыре ряда. Это связано с тем, что распушенные рулоны легко травмируются от веса верхних рулонов. Кроме того, такие рулоны имеют больший диаметр, чем плотномотанные, поэтому приходится снижать их массу под размер колпака.

На ОАО «Северсталь» предложили на душирующей установке дополнительно снижать температуру металла на средней части полосы примерно на 40 °С. При постоянном натяжении при смотке захлажденные участки полосы обладают меньшей склонностью к схватыванию. Это способствует также выравниванию температуры металла между витками при остывании на моталке.

Эффективна разработка австрийской фирмы «Эбнер», предложившей использовать в качестве защитной атмосферы водород вместо диссоциированного аммиака. При этом производительность отжига увеличивается в 1,5–2,0 раза. Водородная среда обеспечивает более высокую теплопроводность, за счет чего сокращается продолжительность нагрева и время выдержки металла в печи. Кроме того, существенно уменьшается загрязненность поверхности металла. Отжиг в водородных колпаковых печах практически полностью устраняет основные недостатки колпаковых печей, поэтому на большинстве заводов (например, на ЧерМК) применяют такой вид отжига.

С 1970-х гг. для отжига холоднокатаного конструкционного металла применяют агрегаты непрерывного отжига (АНО). Рассмотрим один из таких агрегатов башенного типа, установленный на НЛМК (рис. 17.9). Головная часть агрегата имеет типовой набор установок: разматыватель 1, правильную машину 2, ножницы 3 и сварочную установку 4. Здесь сварка осуществляется внахлест на машине точечной сварки, так как к качеству шва не предъявляется почти никаких требований, кроме обеспечения непрерывности движения полосы. Соответственно в хвосте агрегата резка осуществляется точно по месту шва, и сваренный участок листа вырезается. После тянущих роликов 5 полоса про-

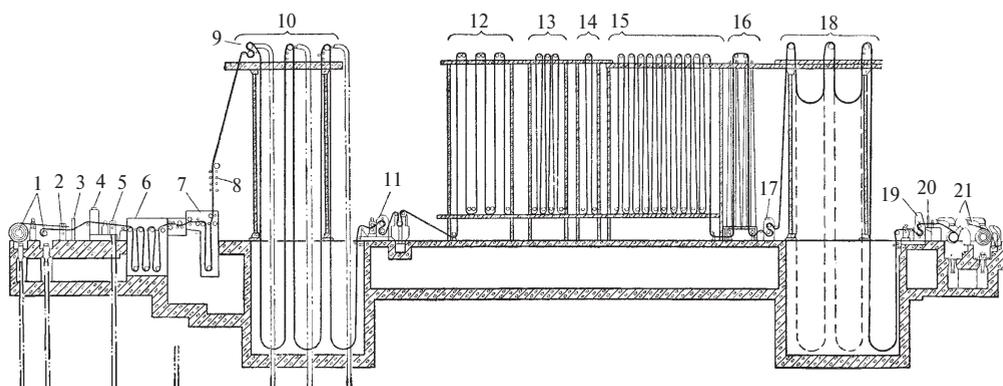


Рис. 17.9. Схема агрегата непрерывного отжига (АНО) башенного типа

ходит ванну химической очистки и ванну электролитической очистки, после чего щеточно-моечную машину 7 и сушильное устройство 8. Пройдя через петлеобразователь 10, полоса поступает в отжигательную печь, состоящую из камер нагрева 12, выдержки 13, замедленного охлаждения, ускоренного охлаждения 15 и окончательного охлаждения 16. За печью отжига установлены петлеобразователи 18, ножницы 20 и две моталки 21. Тянущие ролики 9, 11, 17, 19 обеспечивают стабилизацию натяжения полосы по технологической линии.

Установка АНО на вновь строящихся заводах во всех случаях считается более целесообразной, чем колпаковые печи. Такая целесообразность обусловлена малой продолжительностью термической обработки, высокой плоскостностью получаемого листа, незначительным количеством поверхностных загрязнений, благоприятными условиями для получения листа повышенной прочности, возможностью совмещения отжига с последующими отделочными операциями. Особенность АНО состоит в том, что в нем полоса подвергается одновременному воздействию высоких температур и натяжений. Это способствует улучшению плоскостности листа.

АНО, установленный на НЛМК, позволяет отжигать листы толщиной 0,4–2,0 мм из сталей 08Ю и 08кп по двум режимам. Для листов категории СВ и ВГ предусмотрен нагрев до 670–740 °С, выдержка при этой температуре и дальнейшее охлаждение до температуры старения 280–350 °С, выдержка при этой температуре с последующим охлаждением до комнатной температуры. Для листов категории СВ и ОСВ из стали 08Ю после нагрева и выдержки при 830–890 °С охлаждение ведется до комнатной температуры, а затем повторный нагрев до температуры старения. При этом сталь должна содержать регламентированный химический состав: не более 0,05 % С, 0,25 % Мn, 0,01 % Si, 0,004 % N, 0,06 % Cu. Для металла категории ВОСВ необходимо выполнить еще более жесткие требования по химсоставу: менее 0,03 % С, 0,2 % Мn, 0,003 % N.

На непрерывных агрегатах свойства отожженного металла больше зависят от условий горячей прокатки, смотки и холодной прокатки, чем в колпаковых печах. На металле, отожженном в АНО, свойства между средним и концевыми участками по длине полосы различаются больше, чем при колпаковом отжиге.

Но свойства на среднем участке полосы более стабильны. На АНО труднее, чем в колпаковых печах, предотвращать подсос воздуха, поэтому часто на металле возникают цвета побежалости, которые представляют собой тонкие, толщиной в несколько молекул пленки окислов железа. Одним из недостатков АНО является повышенный процент поверхностных дефектов в виде царапин и рисок, образующихся при прохождении полосы через многочисленные тянущие ролики. По той же причине возникают трудности с получением листов с высококачественной зеркальной поверхностью.

17.4.4. Дрессировка

Дрессировка — это небольшое (3–5 %) обжатие полосы на дрессировочном стане. Он чаще всего представляет собой одноклетевой стан кварто с разматывателем и моталкой. Прокатка на нем осуществляется в один пропуск. Для более тонкого металла используют 2-клетевые дрессировочные станы. На многих заводах для удобства валки дрессировочного стана и последней клетки основного непрерывного или бесконечного стана взаимозаменяемы.

При дрессировке решают три задачи. Главная из них — улучшение механических свойств ленты для последующей штамповки. После рекристаллизационного отжига низкоуглеродистые стали имеют свойства, характеризующиеся неблагоприятной диаграммой растяжения (рис. 17.10): при переходе от упругих деформаций к пластическим предел текучести имеет так называемый зуб, за которым следует площадка текучести с меньшим значением σ_T . “Зуб” текучести вызван тем, что при распаде аустенита третичный цементит располагается по границам ферритных зерен и блокирует их; требуется дополнительное усилие, чтобы начался процесс деформации зерен феррита. Далее, когда происходит разблокировка зерен, пластическая деформация некоторое время (до начала наклепа зерен в точке *B*) происходит без увеличения прикладываемой нагрузки.

Площадка текучести недопустима при штамповке, так как начавшаяся пластическая деформация на некотором участке штампуемой детали может самопроизвольно увеличиваться. Это, во-первых, значительно искажает размеры детали, во-вторых, поверхность участка с неконтролируемым течением становится неровной, типа апельсиновой корки. Этот брак при штамповке так и называется — апельсиновая корка. При изгибных деформациях такой металл образует брак “излом” в виде чередующихся участков с различной степенью течения. Чтобы избежать указанных недостатков, необходимо прокатать отожженный лист с обжатием больше площадки текучести. Диаграмма растяжения наклепанного после дрессировки металла идет по линии *ABC*, и в пластической зоне на линии *BC* каждой степени деформации соответствует определенное напряжение σ , поэтому самопроизвольное течение металла отсутствует.

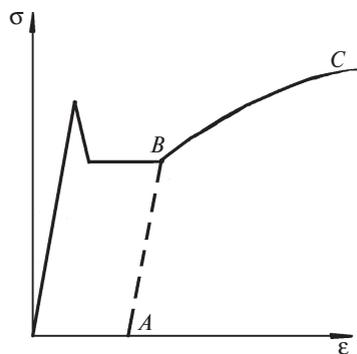


Рис. 17.10. Кривая растяжения малоуглеродистой отожженной стали

Вторая задача при дрессировке — формирование шероховатости листа. Чтобы получить определенную шероховатость листа, необходимо вести дрессировку на шероховатых валках, имеющих шероховатость с несколько большим значением показателя R_a .

Влияние шероховатости поверхности валка на шероховатость полосы оценивается коэффициентом отпечатывания (отпечатываемости)

$$K_0 = R_{ап} / R_{ав},$$

где индексы “п” и “в” относятся к полосе и валкам.

При дрессировке обычно $K_0 = 0,40-0,75$. Очевидно, большая протяженность зоны опережения снижает коэффициент отпечатывания, так как за счет скольжения металла относительно валков образовавшийся рельеф поверхности полосы стирается. Переднее натяжение, увеличивая зону опережения, снижает K_0 . Заднее натяжение уменьшает зону опережения и увеличивает K_0 . С увеличением обжатия коэффициент отпечатывания возрастает, но важнее то, что при этом уменьшается возможность колебания его значения по длине листа.

При прокатке матового и шероховатого листа развитая зона опережения вредна. Идеальным считается минимальная ее протяженность, необходимая только для отпечатывания рисунка шероховатости валков на полосе без дальнейшего его стирания. При получении листа с зеркальной поверхностью скольжение в зоне опережения, наоборот, полезно, так как увеличивает класс чистоты поверхности листа по сравнению с чистотой поверхности валков на одну-две единицы. Показатели шероховатости R_a и R_z за счет скольжения снижаются. Для получения зеркальных листов рекомендуют переднее натяжение до $(0,5-0,8)\sigma_s$. К тому же при скольжении на поверхности листа могут устраняться мелкие поверхностные дефекты в виде мелких рисок, цветов побежалости и пр.

Оптимальная величина обжатия в общем случае определяется требованиями потребителя. Для холоднокатаной стали 08Ю оптимальные обжатия, обеспечивающие максимальные значения коэффициента отпечатывания, находятся в интервале 0,8–1,2 %. Применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при дрессировке сдвигает диапазон оптимальных обжатий в большую сторону. Применение новых эмульсий при дрессировке позволило увеличить обжатие до 10 %. Это позволяет, варьируя обжатиями и количеством подаваемой на валки СОЖ, управлять процессами формирования качества поверхности листа.

Отпечатываемость шероховатости валков на полосе зависит также от усилия на валки. Чем выше усилие прокатки, тем выше коэффициент отпечатывания. В этой связи очень интересно применение при дрессировке рассогласования скоростей валков, т. е. несимметричной прокатки. Как известно, при рассогласовании скоростей зона опережения на одном валке увеличивается, а на другом уменьшается. Следовательно, на валках с одинаковой шероховатостью одна поверхность полосы будет приближаться к шероховатости валков, а другая — удаляться от нее. Однако общее снижение усилия прокатки при несимметричной прокатке сглаживает различие между шероховатостью обеих поверхностей листа.

Наконец, при дрессировке решают задачу уменьшения поперечной разнотолщинности и улучшения планшетности листа. Система САРТ обеспечивает снижение продольной разнотолщинности. Автоматизированная система регулирования поперечного профиля и планшетности (СVC) позволяет получить идеальную планшетность листа.

Снижение усилия прокатки при рассогласовании скоростей способствует выравниванию полосы по продольной разнотолщинности и планшетности. Той же цели служат резервные силы трения, создаваемые искусственно в очаге деформации. Как в ПВ-процессе, на стане с помощью отклоняющего ролика создают определенный охват полосой одного из валков (рис. 17.11), при котором на участке контакта образуются резервные силы трения. За счет них колебания усилия при прокатке или разнотолщинности исходной полосы меньше влияют на параметры очага деформации, в том числе на зазор между валками, обеспечивая стабильность процесса прокатки. В таком очаге деформации достигается высокое качество поверхности листа с низкой разнотолщинностью и высокой плоскостностью. Регулируя угол охвата, можно изменять величину резервных сил трения и управлять возможностью саморегулирования процесса.

Резервные силы трения повышают коэффициент отпечатываемости, поэтому с этих позиций создание таких сил также полезно.

Следует отметить, что представленный стан оборудован устройством, которое позволяет производить шлифование вала непосредственно в клети, исключая перевалку.

Снижение усилия и создание резервных сил трения в целях выравнивания листа по разнотолщинности и планшетности, а также увеличения коэффициента отпечатывания используются при прокатке на вдвоенном дрессировочном стане, имеющем две клети кварто. В этом случае обжатие разделено на две клети, поэтому в каждой клети оно мало. Полезно в первой клети создать рассогласование скоростей. При этом давление на валки снижается, переднее (межклетевое) натяжение эффективно способствует этому. Для второй клети межклетевое натяжение становится задним, поэтому здесь оно эффективно снижает давление, когда скорости валков согласованы. Для второй клети рассогласование скоростей вредно. При прокатке в валках с одинаковыми окружными скоростями при наличии заднего натяжения уменьшается зона опережения, и коэффициент отпечатываемости увеличивается. Полезно также смещать линию осей рабочих валков относительно линии опорных валков по ходу прокатки, чтобы использовать эффекты ПВ-процесса.

17.4.5. Формирование шероховатости валков и полосы

Для формирования требуемой шероховатости полосы необходимо прежде всего создать устойчивую шероховатость на рабочих валках дрессировочного стана. Эти валки первоначально шлифуют до “зеркального блеска”, т. е. до

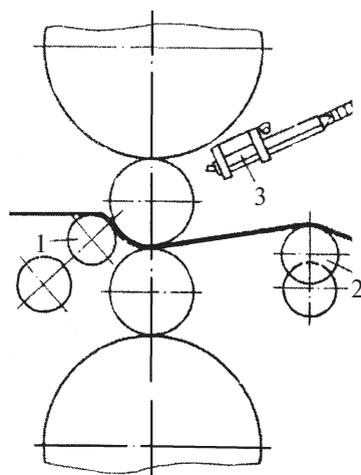


Рис. 17.11. Дрессировочная клеть с отклоняющимися роликами:

- 1, 2 — отклоняющиеся ролики на входе и выходе клети;
3 — устройство для шлифования валков в клети

$R_a < 1,0$ мкм (12–14-й класс чистоты поверхности по старым ГОСТам). Полоса, прокатанная на таких валках, также будет зеркальной. Шероховатость ее по показателю R_a не превышает значения 0,6 мкм.

Чтобы получить матовый лист, необходимо на валках дрессировочного стана создать шероховатость с $R_a = 4–6$ мкм. Это осуществляется несколькими способами — на дробеметных или электроэрозионных станках, с помощью электронного или лазерного луча. Один из наиболее распространенных способов — насечка вращающихся зеркальных валков путем подачи на поверхность с большой скоростью мелкой стальной дроби. Насечку ведут на дробеметной машине за три-пять проходов. При фракции дроби 0,9–1,6 мм получают валки с $R_a = 4–6$ мкм. Для этой же цели вместо дроби применяют сечку — кусочки прочной тонкой стальной проволоки длиной 2–3 мм с острыми краями, нарубленные на специальных станках-автоматах.

Недостатком насеченных валков является то, что шероховатость формируется только по окружности валка, а по длине валка она фактически никак не управляется. Лист, прокатанный на таких валках, имеет матовую поверхность. Шероховатость его в направлении длины и ширины разная, поэтому при штамповке возможна фестонистость (разная вытяжка в обоих направлениях).

Шероховатый лист, точнее, лист с повышенной шероховатостью получается на валках дрессировочного стана, обработанных несколько раз сечкой или дробью в поперечном и продольном направлении. Такие валки дороже, чем матовые. Соответственно, стоимость шероховатого листа выше, чем матового, а тот, в свою очередь, дороже зеркального.

Экспериментально показано, что от характера профиля микрорельефа валков зависит не только шероховатость полосы, но и многие другие характеристики, например износ валков при прокатке. Для меньшего износа необходимо, чтобы на профилограмме поверхности валка выступы компоновались плотнее, чем впадины. Например, валки с микрорельефом, имеющим показатель $Rsk < 0$ (см. рис. 17.2, *з*), подвергаются меньшему износу, чем валки, имеющие микрорельеф с $Rsk > 0$ (см. рис. 17.2, *в*) (заметим, что на полосе отпечатывается обратный профиль). Большое влияние на износостойкость валков оказывают также шаг неровностей Sm и число неровностей на 1 см длины Pc и др. По данным комбината “Миттал Стил Темиртау” стабильная шероховатость увеличивает длительность кампании валков на стане холодной прокатки в 1,5 раза, а на дрессировочном стане — в 2 раза по сравнению с гладкими валками.

Стойкость и качество шероховатых валков определяются не только показателями их шероховатости, но и параметрами прокатки. За счет опережения микровыступы на поверхности шероховатых валков постепенно стираются, и поверхность листа приближается к зеркальной. На истираемость выступов большое влияние оказывает твердость валков. Через 3–4 ч непрерывной работы на шероховатых рабочих валках необходимо либо делать их перевалку, либо переходить на прокатку зеркального листа.

Формирование шероховатости на поверхности валка с помощью сечки или дроби имеет много неудобств и недостатков. Выступы и впадины неодинаковы по длине и не столь регулярны, как хотелось бы. Шаг их непостоянен, рисунок реальной поверхности хаотичен, показатели шероховатости неодинаковы вдоль и поперек листа. Кроме того, стойкость сопел, через которые подается дробь

или сечка на валки, очень низка. Поэтому ведутся поиски других способов и технических средств формирования шероховатости валков.

Большое распространение получают установки электроэрозионного текстурирования поверхности валков. Одна из последних установок введена в эксплуатацию в 2002 г. на комбинате “Миттал Стил Темиртау”. Она позволяет создавать заданную шероховатость валков в широком диапазоне возможных значений ($R_a = 0,5–15$ мкм). Процесс формирования микрогеометрии (текстурирования) поверхности рабочих валков ведется в автоматическом режиме с помощью программ, заложенных в компьютер установки. Подобная установка имеется на ОАО “Северсталь” и ряде других заводов. Электроэрозионные станки не только удобнее дробеметных, но и обеспечивают более точный микропрофиль валков, который позволяет получать меньший разброс шероховатости вдоль и поперек листа.

Фирма “Шеффилд Форджмастерз Групп” разработала способ и рекламирует оборудование, позволяющее обрабатывать поверхность валка токами высокой частоты, доводя тонкий поверхностный слой до плавления. При быстром охлаждении этого слоя происходит закалка металла, и поверхность валка становится, во-первых, очень твердой, во-вторых, шероховатой, причем шероховатость одинакова в продольном и поперечном направлении. Микронеуровности получаются более контролируемыми, регулярными и лучше удерживают смазку или краску, чем при насечке валков. Примерно по такому же принципу работают станки, на которых расплавление поверхностного слоя осуществляется электронным или лазерным лучом.

17.4.6. Отделочные операции

После дрессировки лист окончательно обрабатывается на агрегатах поперечной и продольной резки, после которых следуют упаковка, маркировка и подготовка продукции к сдаче потребителю. Обязательным требованием к этим операциям является высокая культура обращения с металлом. Ручные операции исключены, поскольку любое прикосновение к металлу оставляет грязные следы на его поверхности. Пыль и копоть в атмосфере цеха также недопустимы. Все поверхности, по которым перемещается металл, должны быть покрыты резиной или пластмассой, чтобы избежать царапин. Качество готового листа во многом зависит от условий и культуры труда на этом участке цеха. В Японии в цехах работают в сменной обуви. Опыт показывает, что основной брак листа по рискам, царапинам, задирам, пятнам и др. возникает на участке резки и упаковки металла.

Агрегаты поперечной резки (АПР — рис. 17.12) осуществляют порулонную обработку металла и состоят из набора установок, назначение которых следует из чертежа. Видно, что после АПР получаются отдельные листы (карточки) с обрезанными кромками, правильными геометрическими размерами и полной плоскостностью. Следует отметить, что на агрегате осуществляют обрезку боковых кромок листа, поэтому после обрезки требуется дополнительная правка полосы.

Аналогичный набор машин установлен на агрегате продольной резки (рис. 17.13). При продольной резке по кромкам создаются остаточные напря-

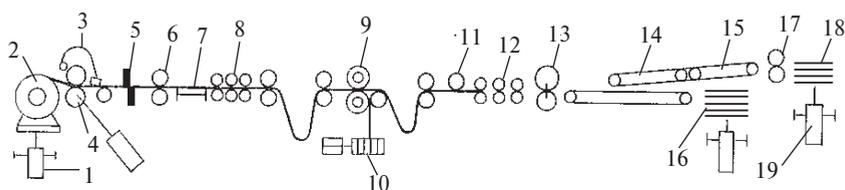


Рис. 17.12. Агрегат поперечной резки холоднокатаной полосы:

1 — подъемный стол; 2 — разматыватель; 3 — магнитный отгибатель; 4 — правильно-тянущая машина; 5 — ножницы; 6 — подающие ролики; 7 — инспекционный стол; 8 — правильная машина; 9 — дисковые ножницы для обрезки кромок; 10 — моталка для обрезки; 11 — прибор для контроля качества поверхности; 12 — правильная машина; 13 — барабанные летучие ножницы; 14, 15 — ленточные транспортеры; 16, 18 — пакетирующие устройства; 17 — промазывающая машина; 19 — опускающийся стол

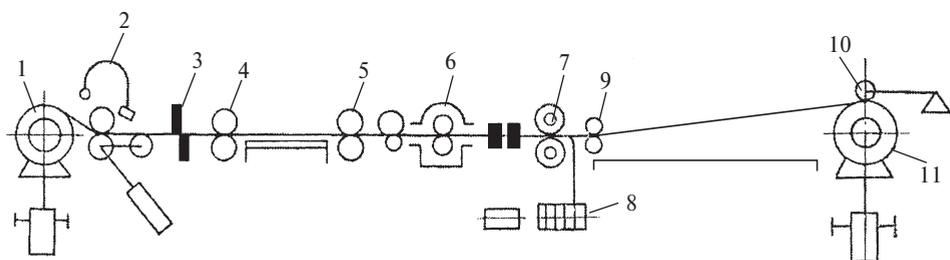


Рис. 17.13. Агрегат продольной резки полосы 0,4–2,0×1550 мм:

1 — разматыватель; 2 — магнитный отгибатель; 3 — ножницы; 4 — натяжные ролики; 5 — контрольно-маркировочное устройство; 6 — промазывающее устройство; 7 — дисковые ножницы; 8 — барабан для намотки обрезки; 9 — направляющие ролики; 10 — регулирующие кольца для выравнивания торца наматываемой полосы; 11 — моталка

жения, которые приводят к изгибу лент, даже если исходная полоса перед роспуском имела планшетную форму. Это вызывает необходимость выравнивания ленты путем дополнительной ее правки растяжением или прокаткой в специальной калибрующей клети. В составе агрегата продольной резки ЧерМК установлена специально разработанная клеть кварто повышенной жесткости с подшипниками ПЖТ, на которой правка осуществляется с регулируемым передним и задним натяжением.

Для резки листового металла используют также комбинированные агрегаты резки (АКР), позволяющие резать металл как вдоль на ленты с последующей их смоткой в узкие рулоны, так и поперек на отдельные карточки мерной длины. В связи с высокой маневренностью таких агрегатов на многих заводах, например на ЧерМК, некоторые АПР реконструируют в АКР.

В связи с повышением требований к контролю качества готовой продукции, с увеличением доли металла, отгружаемого заказчику в рулонах, в цехах холодной прокатки устанавливают специализированное оборудование правки, перемотки и контроля продукции. На некоторых передовых предприятиях имеются линии комплексной отделки проката. Во всех этих агрегатах правку после разматывателя осуществляют изгибно-растяжными машинами, которые, помимо правки, позволяют исправлять поперечную кривизну и серповидность

листа, все виды волнистости и коробоватости. Можно существенно снизить остаточные напряжения и анизотропию механических свойств исходного листа. Для этого на изгибно-растяжной машине требуется получить удлинение полосы до 2–3 %. Удлинение должно достигаться за счет правильного выбора угла охвата роликов, их диаметра и натяжения полосы, однако при натяжении, близком к пределу текучести металла, на поверхности листа могут появиться линии сдвига и изломы, связанные с зубом текучести. Для предотвращения этих процессов перед изгибно-растяжной машиной устанавливают дрессировочную клеть.

Агрегаты перемотки используют для тщательного контроля качества поверхности и толщины полосы, улучшения плоскостности, обрезки кромок, формирования рулонов необходимой массы и улучшения качества их смотки. Один из современных агрегатов перемотки (рис. 17.14), который установлен на заводе фирмы “Кобэ сэйкосэ” в Коагаве (Япония), обрабатывает полосы размерами 0,1–1,0×550–1250 мм. Максимальная масса рулона на входе 50 т, на выходе — 20 т. Скорость обработки 20 м/с. Агрегат оборудован современными

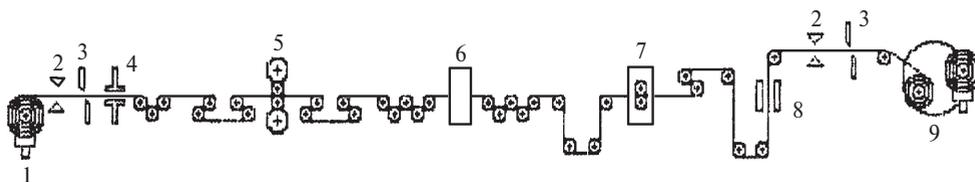


Рис. 17.14. Схема агрегата перемотки:

1 — размотыватель; 2 — толщиномер; 3 — ножницы; 4 — сварочная машина; 5 — дрессировочный стан; 6 — правильно-растяжная машина; 7 — дисковые ножницы; 8 — ножницы; 9 — моталки

высокоскоростными бесконтактными толщиномерами и автоматическими средствами контроля качества поверхности листа. На многих заводах в состав отделочных агрегатов включают также операцию дрессировки металла.

Дальнейшим развитием мер, направленных на улучшение и стабилизацию качества холоднокатаного листового проката, является строительство комплексных агрегатов, совмещающих многие технологические операции. Комплексный агрегат, введенный в эксплуатацию на заводе в Хирохате (рис. 17.15), совмещает операции очистки от окалины, холодную прокатку, отжиг и дрессировку.

Входная часть агрегата содержит размотыватель, ножницы для обрезки концов, стыкосварочную машину. Далее в секции удаления окалины установлена изгибно-растяжная машина, абразивные щетки для зачистки окалины, мелкая ванна с соляной кислотой, ванны для промывки и устройство для сушки ленты. На 4-клетевом стане холодной прокатки прокатывают полосу толщиной 0,35–2,50 мм шириной 1000–1650 мм. Клеть имеет шесть валков длиной 2000 мм с диаметрами: рабочих — 475 мм, промежуточных — 530 мм и опорных — 1420 мм. После прокатки полоса очищается от следов эмульсии в секции очистки, имеющей участок электролитической очистки и щелочные ванны, а также ванны промывки и сушильный участок. Далее следует термический участок, включающий несколько печей, в которых осуществляют опе-

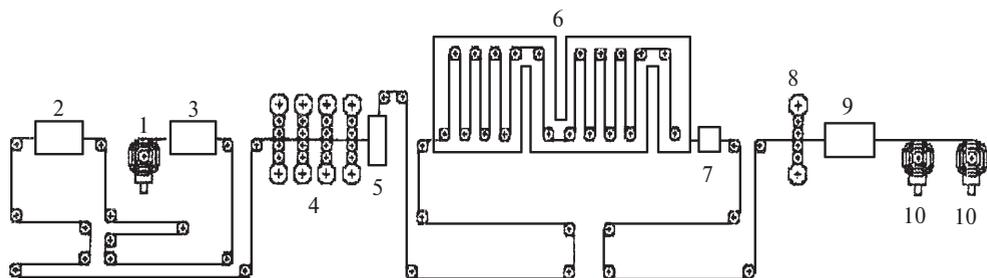


Рис. 17.15. Комплексный агрегат по производству холоднокатаной листовой стали:
 1 — разматыватель; 2 — секция удаления окалины; 3 — входная часть; 4 — прокатная секция;
 5 — секция очистки; 6 — термическая секция; 7 — секция последующей обработки;
 8 — секция дрессировки; 9 — выходная секция; 10 — моталки

рации нагрева, выдержки, охлаждения в первой охлаждающей зоне, выдержку при 600 °С, вторую охлаждающую операцию и охлаждение в устройстве ускоренного охлаждения. После термообработки в следующей секции с помощью травления в соляной кислоте удаляют оксидную пленку, образовавшуюся в печах. Здесь же при необходимости могут произвести электролитическое покрытие полосы никелем. В секции дрессировки установлена 6-валковая клеть. Выходная секция включает измерители толщины и ширины, прибор для контроля дефектов поверхности, инспекционный стол, электростатический промасливатель, летучие ножницы и две моталки.

Такие сложные агрегаты позволяют сократить издержки производства, достигнуть стабилизации процесса, однако при сбоях хотя бы в одной цепочке весь агрегат будет простаивать. Чтобы устранить этот недостаток, на агрегате предусмотрены возможности обеспечения работы каждой секции в отдельном режиме. После прокатного стана имеется промежуточная моталка, позволяющая при необходимости разделить операции.

Большие организационные трудности возникают также при переходе от одного вида листа к другому. Прокатка в стационарном режиме и особенно в переходных режимах может проходить только при очень надежно работающей системе автоматического управления станом.

17.5. Продольная разнотолщинность холоднокатаного листа

Основным фактором, определяющим продольную разнотолщинность холоднокатаного листа, является разнотолщинность исходного горячекатаного листа. Для получения высокоточных холоднокатаных листов продольная разнотолщинность подката по ГОСТу не должна превышать 0,08–0,10 мм, хотя на современных НШПС, как отмечалось, достигаются гораздо более жесткие допуски. Обозначим среднюю толщину горячекатаного листа H и в некоторой точке утолщение его ΔH , после холодной прокатки в этой же точке получим соответственно h и δh . Коэффициентом выравнивания K называется отношение относительных разнотолщинностей до и после прокатки:

$$K = \frac{\Delta H/H}{\delta h/h}.$$

Если коэффициент выравнивания больше 1, то относительная разнотолщинность полосы до прокатки больше, чем после прокатки, следовательно, полоса при холодной прокатке выравнивается. В противном случае качество полосы ухудшается, ее продольная разнотолщинность увеличивается.

На существующих прокатных станах холодной прокатки коэффициент K изменяется в пределах 1,6–0,6, т. е. полоса при холодной прокатки может как уменьшать (выравниваться), так и увеличивать продольную разнотолщинность.

Пусть при прокатке участка полосы толщиной H сила прокатки равна P , и при прокатке утолщенного участка толщиной $H_1 = H + \Delta H$ она равна $P + \Delta P$. Тогда по формуле Головина—Симса толщина этих участков после прокатки будет соответственно такой:

$$h = S + \frac{P}{M_k} \quad \text{и} \quad h_1 = h + \delta h = S + \frac{P + \Delta P}{M_k},$$

откуда

$$\delta h = \frac{\Delta P}{M_k},$$

где M_k — жесткость клетки, кН/мм.

На современных станах жесткость M_k находится в пределах 4000–8000 кН/мм.

Отсюда следует, что после прокатки утолщенный участок останется также утолщенным, и, если никакие иные факторы не будут оказывать влияние на разнотолщинность, коэффициент выравнивания будет близок к 1. Но, как известно, ряд технологических факторов увеличивают разнотолщинность полосы при холодной прокатке, поэтому если не предпринимать никаких действий, то коэффициент выравнивания будет меньше 1, разнотолщинность полосы ухудшится.

Отметим основные факторы, влияющие на коэффициент выравнивания.

Колебания натяжения. Чтобы снизить силу прокатки, необходимо между клетями стана и между моталками и клетями создать значительное натяжение полосы. Напряжения натяжения достигают $(0,3–0,5)\sigma_{si}$, где σ_{si} — предел текучести металла после i -й клетки. Колебания натяжения приводят к колебанию силы прокатки и, по формуле Головина—Симса, к колебанию толщины h после прокатки. Как и на НШПС, на стане холодной прокатки должна быть установлена САРН, поддерживающая натяжение постоянным при всех скоростных режимах работы клетей. Колебания натяжения в клетях стана обеспечивают продольную разнотолщинность в пределах 20 % допуска.

Всплывание подшипников. На опорных валках клетей кварто станов холодной прокатки установлены подшипники жидкостного трения, поэтому при возрастании скорости прокатки расстояние между осями валков S будет уменьшаться. Как и на НШПС, изменение зазора S при изменении скорости обрабатывается с помощью САРТ. При отсутствии САРТ разнотолщинность по этой причине составляет порядка 10 % допуска по толщине.

Биение валков. Причина появления этого фактора также рассматривалась на НШПС. Биение в 0,05 мм никакими системами автоматического регулиро-

вания не обрабатывается, поэтому такой допуск на разнотолщинность заложен в ГОСТе на точность прокатки полосы на станах, оборудованных системами автоматического регулирования. На станах, не имеющих таких систем и предназначенных в основном для производства ответственных видов продукции, допуск по толщине определяется не сотыми, а десятыми долями миллиметров, и биение валков в этом допуске занимает несущественную долю.

Прокатка швов. При прокатке швов разнотолщинность полосы увеличивается, и коэффициент выравнивания снижается. При прохождении шва под валками, толщина H которого примерно на 0,1 мм выше основной части полосы, сила прокатки P резко возрастает и, совершая затухающие колебания, постепенно выходит на стационарное значение (рис. 17.16). Аналогично изменяется толщина прокатанной полосы h . За счет динамических колебаний клетки толщина полосы постепенно по затухающей синусоиде приближается к толщине основной части полосы.

Время успокоения клетки равно 0,5 с, но за это время при скорости прокатки 20–30 м/с около 10–15 м полосы получают дополнительную разнотолщинность, и общий коэффициент выравнивания резко снижается.

При динамических колебаниях клетки меняются все технологические параметры прокатки. Если в i -й клетке прокатывается шов, то обжатие и вытяжка в ней возрастают, и между i -й и в $(i+1)$ -й клетями переднее σ_1 и заднее σ_0 натяжения резко снижаются. Это приводит к дополнительному возрастанию силы прокатки как в i -й, так и $(i+1)$ -й клетях. Таким образом, еще до начала прокатки шва в $(i+1)$ -й клетке произойдет динамическое увеличение давления в этой клетке, а следовательно, увеличение толщины полосы и снижение натяжения между следующей парой клетей. Волна возмущения пройдет по всем клетям стана.

Скачок натяжения между i -й и $(i+1)$ -й клетями на следующей волне синусоиды меняет знак, натяжение резко возрастает и при больших скоростях может приблизиться к пределу текучести материала. Произойдет разрыв полосы между клетями. Поэтому на современных высокоскоростных непрерывных и бесконечных станах приходится снижать скорость прокатки при прохождении швов.

При этом снижается опасность обрыва полосы, а также уменьшается длина разнотолщинного участка. Чем меньше толщина прокатываемой полосы и выше скорость прокатки, тем больше опасность разрыва полосы и актуальнее проблемы, связанные с прокаткой швов.

Динамические изменения параметров прокатки при прохождении швов не обрабатываются системами автоматического регулирования.

Влияние жесткости клетки и жесткости полосы на коэффициент выравнивания. Формула Головина—Симса является интерпретацией фактической кривой I нагружения клетки нагрузкой P (рис. 17.17). Видно, что

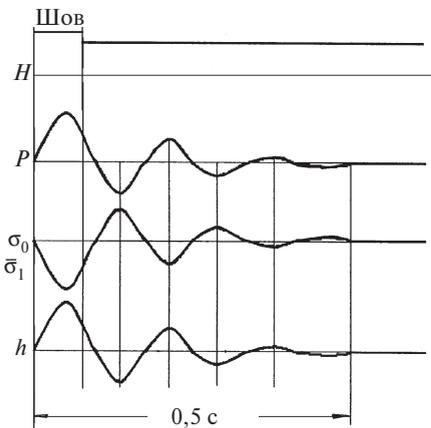


Рис. 17.16. Динамика прокатки шва

в начальный момент нагружения происходит устранение люфтов и зазоров в деталях валков и нажимного механизма. Когда они будут выбраны, кривая выходит на стационарный участок, который описывается уравнением Головина—Симса. При этом S_1 — зазор между валками, отличающийся от фактического зазора S_0 отсутствием люфтов. Тангенс угла наклона кривой, или производная на стационарном участке, равен жесткости клетки:

$$\operatorname{tg}\alpha = M_k = \frac{\partial P}{\partial h}.$$

Следует заметить, что ход кривой $P = f(h)$ не зависит от размеров полосы, марки стали, других характеристик металла.

По аналогии введем определение жесткости полосы M_{Π} . Построим кривую изменения исходной толщины полосы H от силы прокатки. При силе, равной 0, толщина равна исходной H , по мере увеличения силы толщина будет уменьшаться по кривой 2, показанной на рисунке.

Производную $M_{\Pi} = \frac{\partial P}{\partial H} = \operatorname{tg}\beta$ по аналогии назовем жесткостью полосы.

Жесткость полосы зависит от свойств металла и размеров полосы. С увеличением толщины и уменьшением ширины полосы она уменьшается. При уменьшении предела текучести металла жесткость полосы также снижается. При холодной прокатке за несколько пропусков жесткость полосы по ходу прокатки возрастает, так как металл наклепывается, и толщина полосы уменьшается.

В точке, соответствующей толщине полосы после прокатки h , обе кривые пересекаются, что соответствует силе прокатки P .

Пусть по каким-то причинам сила прокатки увеличилась до значения P_1 . Толщина полосы увеличится до h_1 . Разнотолщинность будет такой: $\delta h = (h_1 - h)$. При переходе толщины из точки h в точку h_1 изменение силы прокатки складывается из двух составляющих: $\Delta P_1 = AC$ и $\Delta P_2 = DC$. Последняя составляющая образовалась за счет изменения жесткости полосы.

Общее изменение силы

$$\Delta P = \Delta P_2 + \Delta P_1 = \delta h \operatorname{tg}\alpha + \delta h \operatorname{tg}\beta = \delta h (M_k + M_{\Pi}).$$

Отсюда следует, что

$$\delta h = \Delta P \frac{1}{M_{\Pi} + M_k}.$$

Разнотолщинность полосы при прокатке определяется жесткостью полосы и клетки. На действующем стане жесткость клетки изменить нельзя. Но жесткостью полосы управлять можно. Если на многоклетевом стане полоса прокатывается за k пропусков от толщины h_0 до h_k , то можно так распределить обжатия по клетям, чтобы суммарная жесткость полосы по пропускам была максимальной.

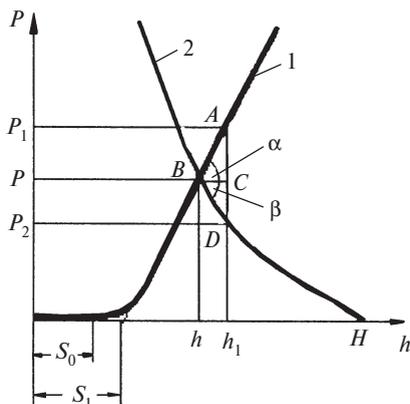


Рис. 17.17. Кривые жесткости клетки и полосы

Заменим в последнем равенстве конечные отклонения бесконечно малыми:

$$\delta h = dP \frac{1}{M_{\Pi} + M_{\kappa}}.$$

Если полоса до прокатки имела абсолютную разнотолщинность dH , то при прокатке это вызовет изменение усилия на величину $dP = M_{\Pi} dH$. Подставим это значение в предыдущее выражение, получим

$$\delta h = dH \frac{M_{\Pi}}{M_{\Pi} + M_{\kappa}}.$$

Отсюда коэффициент выравнивания

$$K = \frac{dH}{\delta h} \frac{h}{H} = \frac{M_{\Pi} + M_{\kappa}}{M_{\Pi}} \frac{h}{H} = \left(1 + \frac{M_{\kappa}}{M_{\Pi}}\right) \frac{h}{H}.$$

Это равенство позволяет сделать важные технологические выводы (заметим, что здесь H и h — параметры задаваемые). Коэффициент выравнивания увеличивается при увеличении жесткости клетки и уменьшении жесткости полосы. Жесткие наклепанные полосы выравниваются хуже, чем мягкие, а тонкие — хуже, чем толстые. При прокатке полосы в несколько пропусков основное выравнивание происходит в первых пропусках.

17.6. Оптимизация обжатий на непрерывном стане по разнотолщинности

Полученные выше выводы позволяют оптимизировать режим обжатия при холодной прокатке на непрерывном стане за k пропусков. Постановка задачи сформулирована: оптимальным считается такой режим обжатия, при котором критерий

$$\prod_{i=1}^k \left(1 + \frac{M_{\kappa}}{M_{\Pi}}\right)$$

достигает максимального значения. Известны начальная толщина полосы $h_0 = H$ и конечная толщина h_k . Требуется распределить по пропускам обжатия $\Delta h_i = h_i - h_{i-1}$ и межклетевые натяжения σ_i ($i = 1, 2, \dots, k$). Таким образом, в задаче два варьируемых параметра, однако это не сильно усложняет процедуру поиска максимума критерия.

При холодной прокатке главным параметром, ограничивающим обжатие в каждом пропуске, является допустимая сила прокатки $[P]_i$. Диапазон изменения толщины h_i может определяться также другими ограничениями:

$$\Delta h_i > 0; \alpha < [\alpha]; M < M_{\text{экр}}.$$

Задача решается методом динамического программирования. Кстати, этим методом решают задачи оптимального распределения обжатий также на других станах и по другим критериям. Но на примере холодной прокатки проще всего рассмотреть процедуру поиска оптимального решения, так как здесь она максимально проста.

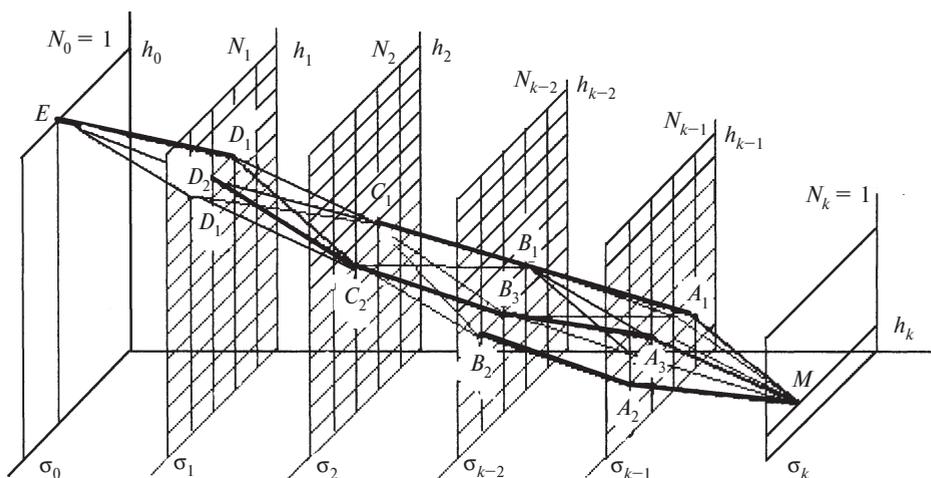


Рис. 17.18. Процедура оптимизации режима обжатия

Представим решение графически (рис. 17.18). Для каждого i -го пропуска выделена плоскость с координатами h_i и σ_i . Каждую из плоскостей можно покрыть сеткой с заданным шагом по обеим координатам. Диапазон изменения натяжения в каждой клетке назовем от 0 до $0,5\sigma_{si}$.

На графике любой режим обжатия будет представлен в виде ломаной линии, проходящей по некоторым точкам с неизвестными пока координатами h_i , σ_i .

Решение методом динамического программирования основано на теореме Беллмана, которую сформулируем следующим образом: если от начальной точки с координатами h_0 , σ_0 удалось пройти по оптимальному маршруту до i -й клетки и прийти при этом в точку с координатами h_i^1 , σ_i^1 , то дальнейшее движение по маршруту к k -й клетки следует совершать по оптимальному маршруту. Строго говоря, это тривиальное утверждение, но оно позволяет построить стратегию поиска максимума (минимума) критерия. Решение можно проводить как по ходу прокатки, так и в обратном направлении. Чаще всего расчет ведут против хода прокатки.

В последнем k -м пропуске конечные заданные значения h_k , σ_k , соответствующие точке M , можно получить разными путями. Проверяем пути перехода из точек A_1, A_2, \dots ($k-1$)-й клетки к точке M k -й клетки. Для каждого перехода вычисляем обжатия $\Delta h_k = h_{k-1} - h_k$. Затем по соответствующим формулам вычисляем угол захвата, силу и момент прокатки. Обжатие не может быть отрицательным ($\Delta h > 0$) и не должно превышать предельно допустимых значений по углу захвата, максимальной силе прокатки и номинальному моменту.

Очевидно, все маршруты, прошедшие по ограничениям, следует запомнить, потому что через каждую из точек A_1, A_2, \dots может пройти искомый оптимальный маршрут. Пусть таких точек будет N_{k-1} штук. Для каждой из них необходимо вычислить и запомнить также значения критериев J_k . Здесь нельзя запоминать только одно максимальное значение критерия, потому что пока неизвестно, через какую конкретную точку $A_1, A_2, \dots, A_{N_{k-1}}$ пройдет оптимальный маршрут.

При рассмотрении $(k - 2)$ -й клетки стратегия меняется. Мы выбираем в этой плоскости одну точку B_1 и из нее строим маршруты через все точки $A_1, A_2, \dots, A_{N_{k-1}}$ $(k - 1)$ -й клетки. Для каждого маршрута вычисляем обжатия $\Delta h_{k-1} = h_{k-2} - h_{k-1}$ и рассматриваем только те из них, которые проходят по ограничениям. Для каждого из них вычисляем значения критерия $(J_k J_{k-1})$ и, воспользовавшись теоремой Беллмана, из всех маршрутов запоминаем только один, который обеспечивает максимальное произведение $J_k J_{k-1}$. Тем самым для одной точки B_1 определяется только одна точка A оптимального маршрута (на рис. 17.18 точка A_1).

Но глобальный оптимальный маршрут не обязан проходить через точку B_1 , поэтому для другой точки B_2 также необходимо рассчитать и сохранить один маршрут с максимальным произведением $J_k J_{k-1}$. В $(k - 2)$ -й плоскости, таким образом, сохраняем N_{k-2} маршрутов.

На рис. 17.18 представлен 4-клетевой стан, поэтому под номером $(k - 3)$ будет клеть № 2. Для этой клетки процедура повторяется: для одной точки C_1 строим маршруты через все точки B_1, B_2, \dots , прошедшие по ограничениям, но запоминаем только один маршрут с максимальным произведением $J_{k-2} J_{k-1} J_k$. Аналогично запоминаем по одному маршруту для других точек C_2, C_3, \dots клетки № 2. Пусть для клетки № 2 прошли по ограничениям N_2 маршрутов, которые мы запоминаем. Точно так же формируем в памяти ЭВМ маршруты, исходящие из точек D_1, D_2, \dots клетки № 1 и проходящие через точки клетки № 2. Запоминается N_1 таких маршрутов.

В 0-й плоскости процедура не изменяется, но здесь существует только одна точка E с заданными параметрами h_0 и σ_0 , поэтому маршрут, обеспечивающий максимум критерия $J_1 J_2 \dots J_k$, будет искомым. На рис. 17.18 толстой линией обозначен оптимальный маршрут $ED_2 C_2 B_3 A_3 M$.

17.7. Способы уменьшения продольной разнотолщинности

Важнейшими параметрами прокатки, которые определяют коэффициент выравнивания, являются обжатия $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$ и натяжения σ_i между i -й и $(i - 1)$ -й клетями, а также натяжения между крайними клетями и моталками σ_0 и σ_k . Они определены при решении оптимизационной задачи методом динамического программирования. Но на коэффициент выравнивания влияют также другие факторы, прежде всего все те, которые снижают давление металла на валки и силу прокатки (коэффициент трения, состояние поверхности валков, скорость прокатки и т. д.).

Экспериментально установлено, что повышение обжатия полосы способствует ее выравниванию. Это объясняется тем, что с ростом обжатия Δh доля неровностей δh и их влияние на колебание давления ослабевает. В связи с этим вполне объясним оптимальный режим обжатия, принятый, например, на 4-клетевом стане 1700 ЧерМК: в первой клетке — 25–28 %, во второй — 32–34 %, в третьей — 34–35 %. Рост обжатий к концу прокатки способствует ее выравниванию. Только в последней клетке обжатие снижено до 18–20 %, чтобы обеспечить высокое качество поверхности листа.

Натяжение полосы между клетями снижает давление и потому способствует выравниванию полосы, но колебания натяжений увеличивают продольную разнотолщинность. Стабильное и высокое напряжение натяжения на уровне $(0,3-0,5)\sigma_{si}$ считается оптимальным на непрерывных станах; более высокие натяжения опасны, так как увеличивается опасность обрывности листа между клетями, особенно при наличии динамических эффектов, связанных с прокаткой швов. С другой стороны, для обеспечения качества поверхности листа к концу прокатки натяжения снижают. Обеспечить стабильное заданное натяжение можно только с использованием САРН.

Выравниванию полосы способствуют также другие технологические факторы, снижающие силу прокатки. Применение эффективных эмульсий снижает силу прокатки, расход энергии на прокатку, а также уменьшает продольную разнотолщинность и улучшает плоскостность полосы.

Одно из направлений в технологии холодной прокатки связано с применением несимметричной прокатки, т. е. прокатки в валках, имеющих разную окружную скорость вращения. Известно, что при несимметричной прокатке кинематика процесса такова, что давление металла на валки и усилие прокатки снижаются. За счет этого при холодной несимметричной прокатке увеличивается точность прокатки и уменьшается продольная и поперечная разнотолщинность на 25–30 %. Кроме того, выравниваются механические свойства по сечению проката, снижается упрочнение стали, улучшается чистота поверхности листа.

На непрерывном стане 1700 ЧерМК внедрен комбинированный режим прокатки, при котором клетки с рассогласованием и без рассогласования скоростей чередуются. Теоретические аспекты комбинированных режимов прокатки были рассмотрены в разд. 4.4. Такой режим обеспечивает максимальную стабильность прокатки и наилучшие показатели по точности и чистоте поверхности.

Для выравнивания продольной разнотолщинности весьма эффективен ПВ-процесс или решения, использующие идеи этого процесса. Напомним, что основные идеи его сводятся к созданию очага деформации, в котором, во-первых, снижается давление металла на валки и сила прокатки за счет рассогласования скоростей валков и, во-вторых, образуется резерв сил трения на участке охвата, который обеспечивает саморегулирование процесса прокатки. На основе этого предложено несколько конструктивных решений. Например, на ЧерМК и других заводах при прокате на стане кварто рабочие валки смещают относительно линии центров опорных валков на величину до 5 мм по направлению прокатки. При этом увеличивается длина контакта металла с валками и образуются дополнительные (резервные) силы трения, которые способствуют меньшему колебанию толщины полосы при колебаниях силы прокатки. Кроме того, при смещении рабочих валков их подшипники плотнее прижимаются к одной стороне станины, поэтому устраняются вибрации валков при высоких скоростях прокатки.

Этот же прием использован на высокоточном стане типа МКВ (рис. 17.19). Положение рабочих валков, а также их продольный прогиб можно регулировать за счет воздействия на подпорный валок 2. Такой стан для прокатки лис-

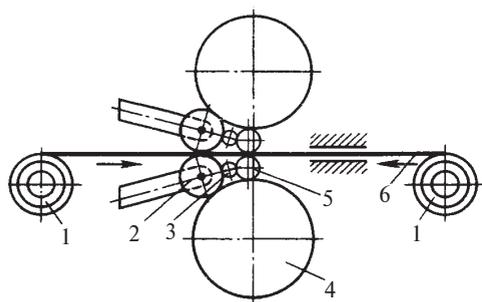


Рис. 17.19. Стан типа МКВ для прокатки листа и ленты:
1 — моталка; 2 — подшипниковая опора;
3 — подпорный валок; 4 — опорный валок;
5 — рабочий валок; 6 — полоса

изгиба, которые способствуют выравниванию полосы в продольном и поперечном направлении.

При прокатке тонких листов в последних клетях непрерывного стана или на дрессировочном стане реализуется сверхнизкий очаг деформации. Такие очаги имеют место при прокатке на предварительно поджатых валках при высокой доле упругих деформаций на поверхности контакта. Пластическая зона в очаге деформации подпирается мощными упругими зонами с очень высокими сжимающими напряжениями. В результате давления в пластической зоне резко возрастают. Но сила прокатки перестает реагировать на возмущающие факторы прокатки, она практически всегда постоянна и не зависит от колебаний обжатия. Если исходная полоса имела продольную разнотолщинность, то разность обжатий по длине не будет влиять на силу прокатки. При прокатке с постоянным усилием полоса по длине будет выравниваться.

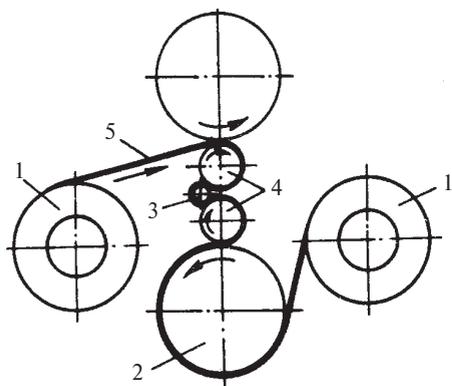


Рис. 17.20. Стан CBS для прокатки высокоточных планшетных листов:
1 — моталка; 2 — опорный валок;
3 — ролик; 4 — рабочие валки;
5 — полоса

тов сечением 0,1×610 мм, оборудованный системой автоматического регулирования толщины, установлен на заводе фирмы Lankashire and Corby Manufacturing в Великобритании.

В полной мере идеи ПВ-процесса реализованы на CBS-стане (рис. 17.20). Полоса при прокатке огибает рабочие валки, как в ПВ-процессе, поэтому создаются мощные резервные силы трения, необходимые для саморегулирования прокатки при колебаниях давления на валки. С помощью ролика 3, диаметр которого в 20 раз меньше диаметра рабочих валков, в полосе создаются значительные пластические деформации

Чем “мягче” валок и больше его диаметр, тем более развиты упругие зоны на поверхности контакта, тем больше эффект выравнивания. Эти выводы широко используются при прокатке тонких полос и при дрессировке. На некоторых дрессировочных станах стали устанавливать валки повышенного диаметра со сравнительно невысокой поверхностной твердостью (но, конечно, достаточной, чтобы избежать продавливания валков).

Наиболее распространенным способом прокатки высокоточных полос с наименьшей продольной и поперечной разнотолщинностью остается прокатка в многовалковых, особенно 20-валковых, станах. Эти станы имеют малый диаметр рабочих валков, высокую жесткость кле-

ти, работают с высокими натяжениями, что позволяет прокатывать с большими обжатиями за проход и малыми допусками на толщину и разнотолщинность полосы.

17.8. Поперечная разнотолщинность и плоскостность полосы

К поперечной разнотолщинности холоднокатаной полосы предъявляются очень высокие требования. Допуск по ширине по разнотолщинности некоторых полос находится на уровне $\pm 0,03$ мм. Основная причина в том, что поперечная разнотолщинность определяет плоскостность полосы, а требования по ней для многих видов холоднокатаного листа очень высоки.

Обозначим, как и раньше, среднюю по ширине толщину до прокатки H . Пусть она равна фактической толщине в одной из точек. Пусть толщина в другой точке равна $H + \Delta H$. После прокатки в тех же точках получим соответственно h и $h + \Delta h$. Очевидно, плоскостность сохранится в том случае, когда вытяжка в обоих выбранных точках будет одинаковой:

$$\frac{H}{h} = \frac{H + \Delta H}{h + \Delta h}.$$

После простых преобразований получаем коэффициент выравнивания:

$$K = \frac{\Delta H / H}{\Delta h / h} = 1.$$

Чтобы полоса при холодной прокатке выходила из валков планшетной, необходимо обеспечить в поперечном направлении коэффициент выравнивания $K = 1$. Относительная разнотолщинность полосы при холодной прокатке должна сохраняться такой, какую получили при горячей прокатке. Всякая попытка исправить поперечную разнотолщинность начальной полосы путем перераспределения обжатия по ширине приведет к потере плоскостности. И наоборот, если требуется исправить исходную неплоскостность подката, то при холодной прокатке только путем неравномерного обжатия по ширине этого сделать нельзя. Таким образом, плоскостность холоднокатаной полосы формируется в основном при горячей прокатке подката на НШПС.

Сама по себе поперечная разнотолщинность холоднокатаной полосы в допустимых пределах неопасна. Наоборот, если подкат имеет несколько большую толщину в середине (до 0,03–0,08 мм), чем по кромкам, т. е. чечевицеобразную форму, то процесс холодной прокатки протекает более устойчиво, чем при идеально ровной форме подката. В этом случае при прокатке возникают поперечные силы, удерживающие полосу на середине бочки валков. Таким образом, стремятся сформировать при горячей прокатке и поддерживать при холодной прокатке определенную поперечную разнотолщинность в пределах заданного допуска. Но условие планшетности полосы $K = 1$ должно выполняться. Нарушение его приводит к волнистости и коробоватости, с которыми мы встречались при горячей прокатке, серповидности полосы, телескопичности рулона при смотке, к высоким остаточным напряжениям в готовом листе и т. д.

Следует заметить, что и продольная разнотолщинность полосы сама по себе также не очень опасна. Гораздо опаснее ее неравномерность по ширине листа. В этом случае на листе образуются те же виды брака. Поэтому многие мероприятия, направленные на улучшение плоскотности листа, в комплексе решают проблемы и продольной, и поперечной разнотолщинности.

Итак, поперечная разнотолщинность холоднокатаного листа в идеальном случае повторяет разнотолщинность подката. При холодной прокатке она будет изменяться в ту или иную сторону за счет воздействия факторов, которые имеют место при холодной прокатке. Это будет сопровождаться потерей планшетности листа.

На поперечную разнотолщинность при холодной прокатке влияют те же факторы, что и при горячей прокатке, но значимость каждого из них иная.

Прогиб валков. По-прежнему прогиб рабочих и опорных валков вносит наибольший вклад в поперечную разнотолщинность листа. Ось рабочего вала принимает вид выпуклой кривой *1* (рис. 17.21). Соответственно, для ее компенсации по такой же кривой необходимо шлифовать бочку рабочего вала. На всех станах холодной прокатки один рабочий валок имеет станочную профилировку выпуклой формы. Так как прогиб зависит от силы прокатки, то необходимо на стане иметь автоматизированную систему дополнительного изгиба. С ее помощью на станочную профилировку валков, рассчитанную при базовой силе прокатки P_6 , накладывается дополнительный изгиб валков при фактической силе прокатки P . Эти вопросы уже рассмотрены применительно к станам горячей прокатки, но при холодной прокатке требования гораздо выше, так как регулировки ведутся в пределах более жестких допусков. Кроме того, при холодной прокатке кривая прогиба вала *1* в большей мере, чем при горячей, зависит от эпюры распределения давления на валки вдоль оси вала.

При холодной прокатке узких листов эпюра давления по ширине имеет купол в середине полосы, а при прокатке широких полос, наоборот, вблизи кромок давление выше, чем в середине. Кроме того, сама станочная профилировка валков влияет на распределение давления по ширине полосы, увеличивая его к середине. Таким образом, вид кривой *1* может изменяться в широких пределах, что накладывает влияние как на формирование станочного профиля, так и на работу системы дополнительного изгиба.

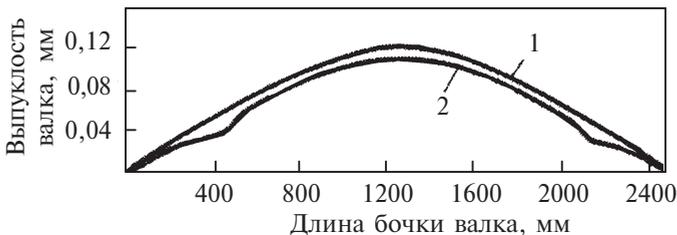


Рис. 17.21. Исходный (1) и выработанный (2) профиль рабочих валков стана холодной прокатки 2500 ММК

Износ валков. В процессе прокатки рабочие валки вырабатываются, приобретая форму 2 (см. рис. 17.21). Большое влияние на профиль полосы оказывает также износ опорных валков (рис. 17.22).

Износ рабочих и опорных валков учитывается при работе системы дополнительного изгиба валков. Из-за износа приходится часто менять рабочие и опорные валки. Рабочие валки переваливают обычно через каждую рабочую смену, и даже чаще, опорные — примерно два-три раза в месяц.

При холодной прокатке в большей мере, чем при горячей, износ валков вызывает изменение упругих составляющих, входящих в выражение (16.1). На новых валках, в отличие от горячей прокатки, упругие составляющие $y_{изг}$ (дополнительный изгиб на изношенных валках), $y_{сж}$ (неравномерность упругого сжатия на контакте рабочих и опорных валков) и $y_{спл}$ (упругое сплющивание на контакте полосы с рабочим валком) не равны 0. Точнее, их не удастся полностью скомпенсировать исходной профилировкой валков. Система дополнительного изгиба обрабатывает их так же лишь частично. По мере износа валков роль упругих составляющих в формировании фактического профиля полосы возрастает, и он становится все более неопределенным и непредсказуемым.

Тепловой профиль валков. При холодной прокатке рабочие и опорные валки разогреваются за счет тепла, выделяемого как в очаге деформации, так и в месте контакта рабочего валка с опорным. По длине валка его температура неравномерна, середина бочки имеет практически постоянную температуру 60–70 °С, а вблизи шеек примерно на расстоянии одного радиуса она быстро убывает до комнатной. Причем экспериментально установлено, что наибольший разогрев валков характерен для последних клетей стана. Неравномерность температуры по длине валка отражается на поперечном профиле и плоскостности полосы и в большей мере, чем при горячей прокатке, требует точного ее расчета и учета.

При шлифовке формируют станочную профилировку валков, учитывая расчетный прогиб и расчетную тепловую составляющую профиля для стационарных условий прокатки. В процессе прокатки эпюра распределения температуры вдоль рабочих и опорных валков должна строго поддерживаться в заданных пределах с помощью автоматизированной системы подачи эмульсии на валки стана (САПЭ). Эта система осуществляет регулирование расхода и температуры подаваемой на валки эмульсии, а также распределение охлаждающей жидкости по клетям и внутри клетки по длине валка.

На станах, производящих тонкую ленту и фольгу, с помощью САПЭ удается осуществлять тонкую регулировку плоскостности полосы. При появлении

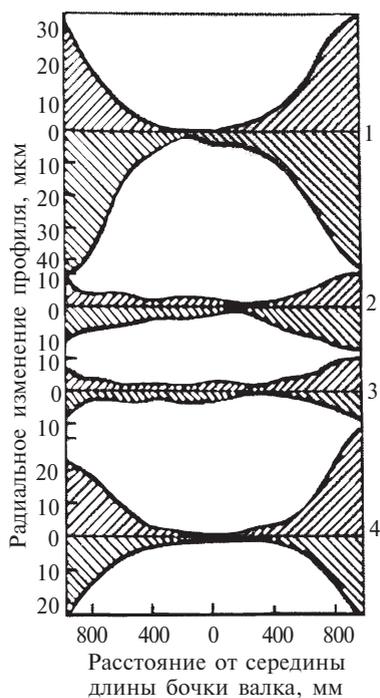


Рис. 17.22. Характер износа опорных валков стана 2500 холодной прокатки (ММК)

устойчивой волны на каком-то участке ширины на соответствующем участке вала уменьшают подачу эмульсии или уменьшают ее температуру. Диаметр вала в этом месте уменьшается, обжатие и вытяжка также снижаются, волна исчезает. При прокатке алюминиевых фольг микронных толщин такой прием является почти единственным для управления плоскостностью. Однако он обладает очень высокой инерцией.

С помощью САПЭ можно поддерживать температурный профиль вала при стационарной прокатке. Но после перевалки валков, даже при их предварительном подогреве, температурный профиль может отличаться от расчетного. Поэтому после перевалки некоторое время вращающиеся вхолостую валки обрабатывают струями горячей воды, корректируя профиль вала. При прокатке высокоточных полос производят настроечную прокатку, т. е. прокатывают несколько пробных полос для стабилизации температуры валков.

Упругое сплющивание валков. Давление металла на валки неравномерно распределяется по ширине очага деформации, и при холодной прокатке реализуются практически любые эпюры распределения. Таким же образом распределяется по ширине упругое сплющивание валков. При горячей прокатке упругое сплющивание невелико, и его принимают во внимание только при толщинах менее 2 мм. При холодной прокатке доля, вносимая упругим сплющиванием валков в общую поперечную разнотолщинность, очень велика при всех толщинах полос.

Упругое сплющивание происходит как на контакте рабочих валков с металлом, так и между валками (без учета тех составляющих $u_{\text{спл}}$ и $u_{\text{сж}}$, которые появляются при износе валков). При расчетном давлении на валки упругое сплющивание можно рассчитать и учесть при станочной профилировке валков. Но чаще всего фактическая эпюра давлений отличается от расчетной, отчего при прокатке появляются разнотолщинность и неплоскостность полосы. Устранить их с помощью профилировки валков или системы дополнительного изгиба полностью практически невозможно.

Радиальное сплющивание валков несколько выравнивает поперечную разнотолщинность полосы. Допустим, идеально ровная исходная полоса прокатывается на валках, образующих при прокатке неравномерную щель. Обжатие полосы по ширине будет неравномерным. На том участке по ширине, где обжатие меньше и щель толще, давление на валки будет ниже и упругое сжатие валков меньше, чем на других участках. Это способствует выравниванию эпюры давлений и высоты щели по ширине полосы.

Натяжение. Существенное влияние на плоскостность полосы оказывает натяжение. Оно способствует выравниванию вытяжек по ширине полосы. Удельные натяжения (натяжения на 1 мм ширины) распределяются по ширине неравномерно: оно больше на тех участках, которые имеют меньшую вытяжку. Из теории известно, что даже при отсутствии натяжения при идеально ровном обжатии по ширине скорость течения металла в очаге деформации по ширине полосы распределяется неравномерно. При неравномерной деформации по ширине неравномерность скоростей течения усугубляется. На том участке полосы, на котором высотная деформация по каким-то причинам уменьшилась, т. е. высота щели увеличилась, вытяжка стала меньше. При натяжении этот участок полосы получит дополнительное растяжение. Контактное давление

снизится, упругое сплющивание также уменьшится, профиль полосы и контактное давление по ее ширине выравниваются. Таким образом, при наличии натяжения очаг деформации имеет дополнительную возможность самовыравнивания неравномерности удельных натяжений по ширине полосы и толщины полосы (в литературе этот эффект называют по аббревиатуре “СНУН”).

Установлено, что эффект самовыравнивания толщины полосы по ширине определяется не только неравномерностью натяжений и упругого сплющивания. Большое влияние оказывает жесткость клетки и полосы. Самовыравнивание поперечного профиля возрастает с ростом жесткости полосы, т. е. с уменьшением ее толщины и увеличением ширины, обжатия и степени наклепа. Отсюда можно сделать вывод о целесообразности увеличения обжатий в последних клетях стана, чтобы полнее использовать эффект самовыравнивания. Но, как отмечалось ранее, полоса лучше выравнивается в первых пропусках, когда жесткость ее еще невелика. Исходя из этого, лучше увеличивать обжатия в первых пропусках.

Для увеличения эффекта самовыравнивания полезно увеличение диаметра валков стана. При этом возрастает упругое сплющивание валков, и оно более чутко реагирует на указанные выше воздействия. Рассогласование скоростей валков также способствует выравниванию полосы. Установлено, что наилучшая плоскостность достигается за счет эффекта саморегулирования при рассогласовании скоростей на 6–8 %, при котором по одному валку полностью исчезает зона опережения.

Из изложенного следует, что действенным средством регулирования поперечного профиля и плоскостности полосы может служить контролируемое распределение удельных натяжений по ширине полосы. Изменение удельных натяжений в небольших пределах уже положительно влияет на плоскостность. Имеются контактные роликовые тензометры, которые позволяют достаточно точно измерять удельные натяжения по ширине. Однако технических средств, которые позволяли бы непосредственно управлять удельными натяжениями при прокатке, не существует. Удельные натяжения можно изменять косвенным образом путем изменения общего натяжения в комплексе с работой системы дополнительного изгиба.

Регулирование плоскостности полосы. При расчете исходной профилировки валков необходимо руководствоваться той концепцией, которая применяется на станах горячей прокатки (см. разд. 16.5). В соответствии с этой концепцией исходная профилировка должна, с одной стороны, компенсировать изгиб валков при прокатке, температурную составляющую профиля и примерно учесть те упругие составляющие, которые возникают при неравномерном распределении давления металла на валки в направлении ширины проката. С этих позиций общий профиль рабочего валка должен быть выпуклым. С другой стороны, важно обеспечить устойчивость полосы при прокатке, которая достигается при вогнутом профиле валков. Компромиссным решением является такая профилировка в последней клетке стана, по которой конечная полоса имеет чечевицеобразную форму с поперечной разнотолщинностью в пределах заданного допуска (0,05–0,03 мм). Согласно формуле (16.3) во всех клетях стана плоскостность полосы будет обеспечиваться только в том случае, когда чечевица полосы будет увеличиваться от последней клетки к первой пропорционально вытяж-

ке в клетке. Видимо, чечевицу необходимо вычислять не только для клетей стана холодной прокатки, но и для чистовых клетей НШПС. Это позволит получить холоднокатаную полосу в заданных пределах и обеспечить устойчивую прокатку на обоих станах. В такой концепции допуски на поперечную разнотолщинность горячекатаного листа вычисляются, а не выбираются по ГОСТу.

Но, как отмечено выше, исходная профилировка даже с помощью системы дополнительного изгиба не может гарантированно обеспечить плоскостность полосы при прокатке. Даже на новых валках появляются упругие составляющие профиля, которые учесть очень трудно, а с появлением износа их роль увеличивается. Отсюда следует важный практический вывод: грубую регулировку профиля полосы и ее плоскостности при прокатке необходимо осуществлять за счет профилировки валков и автоматической системы дополнительного изгиба валков, а для более точной регулировки необходимо иметь другую систему, которая воздействует на профиль полосы в процессе прокатки. Исходным сигналом для нее должна быть сама же плоскостность полосы, которую можно измерять, например, с помощью прибора ИП-4 (см. рис. 16.17), а исполнительная часть системы должна тонко воздействовать на форму образующей валка.

На станах холодной и горячей прокатки разработаны несколько систем, которые позволяют изменять профилировку валка в процессе прокатки. Одно из решений связано с применением 6-валковых клетей (рис. 17.23). Такая клетка содержит пару промежуточных валков, расположенных между рабочими и опорными. Эти валки имеют возможность перемещаться в осевом направлении. При изменении ширины прокатываемой полосы промежуточные валки устанавливаются всегда так, чтобы их торцы соответствовали новой ширине полосы. Таким образом, поперечный профиль полосы на всех ширинах полос стабилизируется. Перемещая валки в осевом направлении, можно регулировать план-

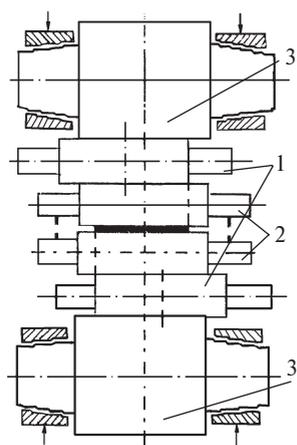


Рис. 17.23. Схема расположения валков 6-валковой клетки:

- 1 — промежуточные валки;
- 2 — рабочие валки;
- 3 — опорные валки

шетность полосы при прокатке. Та же идея реализована на 4-валковом стане с перемещающимися рабочими валками (рис. 17.24). Рабочие валки имеют скосы по краям бочки. При перемещении рабочих валков вдоль оси изменяется эпюра распределения давления металла по ширине полосы со всеми вытекающими отсюда эффектами, рассмотренными выше.

В развитие этой идеи фирма «Шлеман-Зимаг» разработала систему SVC (аббревиатура в переводе: бесступенчатая регулируемая бочкообразность), которая применяется на станах горячей и холодной прокатки. Рабочие валки стана кварто S-образной формы автоматически перемещаются в осевом направлении, изменяя поперечный профиль полосы при прокатке (см. рис. 16.18). Система SVC на станах холодной прокатки предназначена только для автоматического регулирования плоскостности полосы, а на НШПС она позволяет еще формировать чечевицу профиля поперечного сечения для последующей холодной прокатки. Смещение рабочих валков происходит в интервале значений 0,2–3,0 мм, и это вли-

яет на форму зазора и способствует уменьшению поперечной разнотолщинности.

Скрещивание валков при прокатке также предоставляет возможности регулирования профиля, увеличивая толщину полосы по кромкам. При этом изменяется также средняя толщина полосы. С увеличением угла скрещивания обжатия и давления на середине бочки валков возрастают, увеличиваются упругие составляющие профиля, поэтому форма зазора между валками в середине меняется мало.

Современные многоклетевые непрерывные и бесконечные станы холодной прокатки листа оснащены быстродействующими ГНУ, системами поворота (скрещивания) валков, регулируемого изгиба, осевого смещения валков при S-образной профилировке (CVC), зонального охлаждения, имеют опорные валки с динамически регулируемой профилировкой. В совокупности все эти средства обеспечивают минимальную разнотолщинность и идеальную плоскостность листов. Отклонения первого порядка регулируют с помощью системы дополнительного изгиба (воздействуют на ГНУ), более тонкие отклонения — путем смещения валков (CVC) и скрещивания валков при участии ГНУ, еще более тонкую регулировку осуществляют с помощью многозонного охлаждения валков.

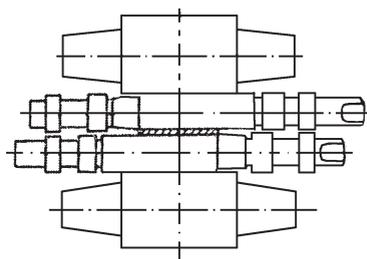


Рис. 17.24. Схема расположения валков клетки кварто с перемещающимися в осевом направлении рабочими валками

17.9. Производство оцинкованного листа

Значительное количество тонкого холоднокатаного листа выпускается с покрытием его различными антикоррозионными материалами. Доля тонкого листа с покрытиями за последние тридцать лет увеличилась в 20 раз и продолжает расти. В Японии в 2002 г. она составляла 43 % (в России — 24,7 %). Большая часть такого листа имеет покрытие цинком и его сплавами. Разработаны покрытия в виде Zn–Ni и Fe–Zn с массой 20–30 г/м². Для IF-сталей, предназначенных для производства кузовов автомобиля с повышенной коррозионной стойкостью, применяют покрытие с повышенной толщиной (до 40–60 г/м²), состоящее из слоя Fe–Zn с содержанием железа около 10 %. Для уменьшения трения при штамповке на оцинкованную поверхность наносят смазочную пленку на основе соединений марганца и фосфора, которая не должна препятствовать свариванию и окрашиванию.

Для корпусов приборов и оргтехники изготавливают лист с хроматным покрытием, поверх которого наносят пленку полимера (силиказоль) с добавками смазочного вещества. Интенсивно наращивается производство листа с полимерными покрытиями. Такие цеха имеются на НЛМК и ММК. В 2004–2005 гг. был пущен новый цех полимерных покрытий на ЧерМК, намечено создание новых цехов на 200 тыс. т/год на ММК и на НЛМК.

В строительстве и машиностроении наибольшую долю составляют горячеоцинкованные и горячеалюминированные листы, листы с покрытием гальвальнойюмом (сплав 55 % Al + Zn) с повышенным сопротивлением атмосферной

коррозии. Россия обладает достаточными мощностями по производству такого вида листа, установленными на НЛМК, ММК и ЧерМК.

В сортамент оцинкованной стали входят листы толщиной от 0,5 до 1,5 мм и шириной от 710 до 1500 мм, поставляемые потребителю в виде как рулонов, так и карточек в пакетах. Требования на тонколистовую оцинкованную сталь с непрерывных линий регламентируются ГОСТ 14918–80. В зависимости от назначения оцинкованная сталь изготавливается четырех групп:

ХШ — для холодной штамповки;

ХП — для холодной профилировки (для производства гнутых профилей);

ПК — под окраску;

ОН — общего назначения.

По способности к вытяжке выпускают листы категорий Н, Г и ВГ (нормальная, глубокая и весьма глубокая вытяжка).

По равномерности толщины и виду цинкового покрытия листы делят на четыре класса:

НР — с нормальной разнотолщинностью покрытия;

УР — с уменьшенной разнотолщинностью;

КР — с узором кристаллизации;

МТ — без узора кристаллизации.

По толщине покрытия выделяется три класса:

П (повышенной толщины) — 40–60 мкм;

класс 1 — 18–40 мкм;

класс 2 — 10–18 мкм.

Требования по плоскостности, серповидности, телескопичности рулонов, точности по толщине и ширине, обрезке кромок и др. такие же, что и для автомобильного листа.

Для штампуемого листа оговариваются также требования по микроструктуре и механическим свойствам основного металла, регламентируются требования по прочности сцепления цинка с основой.

Основным свойством оцинкованного листа является его коррозионная стойкость, и в зависимости от этого различают несколько разновидностей цинко-содержащих покрытий и методов их нанесения. Основным видом является двустороннее покрытие из расплава цинка с одинаковым или разным по толщине покрытием с обеих сторон. Производят также лист с односторонним покрытием. Для экономии цинка, а также для улучшения коррозионной стойкости, свариваемости и других характеристик применяют покрытия в виде сплавов цинка с железом (гальванил), с алюминием (гальвалюм), с полимерами (цинкрометалл) и др.

В качестве основы для производства оцинкованной стали используют углеродистую холоднокатаную сталь из обычных и качественных марок стали. Для листов под штамповку применяют те же марки стали, что и для автомобильного листа: 08кп, 10кп, 08Ю, СтЗкп и др.

Основное количество оцинкованной стали с двусторонним покрытием производят на специализированных непрерывных линиях — агрегатах горячего непрерывного цинкования (АГНЦ). Начальные технологические операции — снятие окалины и прокатка холоднокатаного листа — при производстве оцинкованного и автомобильного листа выполняются на одних и тех же агрегатах по одной технологии. Можно лишь отметить, что для качественного покрытия

цинком требуется шероховатая поверхность холоднокатаного листа, так как глянцевая поверхность плохо удерживает покрытие. Поэтому на непрерывном прокатном стане последняя клеть должна быть шероховатой с $R_a = 3-4$ мкм.

После холодной прокатки лист в рулонах обрабатывается на агрегатах горячего непрерывного цинкования (АГНЦ). Действующий на НЛМК агрегат (рис. 17.25) считается одним из совершенных и современных. Условно агрегат можно разбить на отдельные части.

Первая часть включает ряд традиционных установок, необходимых для организации непрерывности процесса: разматыватели, правильную машину, ножницы, сварочную машину с пробивным прессом для обозначения места шва и петлевой накопитель с регулятором натяжения петли.

Вторая часть агрегата предназначена для очистки поверхности листа от следов эмульсии и грязи. В нее входят ванны со щелочными растворами и мочными щетками, промывочные ванны и сушильная камера. При относительно больших скоростях движения полосы только химическая очистка не обеспечивает полного обезжиривания поверхности листа. Дополнительное обезжиривание осуществляют в электролитической ванне. Окончательная очистка поверхности металла достигается уже при нагреве металла в камере окисления проходной термической печи.

На других заводах применяют отдельно стоящий агрегат комбинированной очистки, включающий:

химическое обезжиривание в растворе едкого натра (50–70 г/л) и тринатрийфосфата (25–30 г/л) при температуре раствора 90 °С;

электролитическое обезжиривание в растворе того же состава;

струйную промывку полосы;

электролитическое травление в растворе серной кислоты (40–50 г/л)

и сернокислого железа (до 70 г/л) при температуре 60–70 °С;

струйную и щеточную промывку и сушку путем обдувания горячим воздухом.

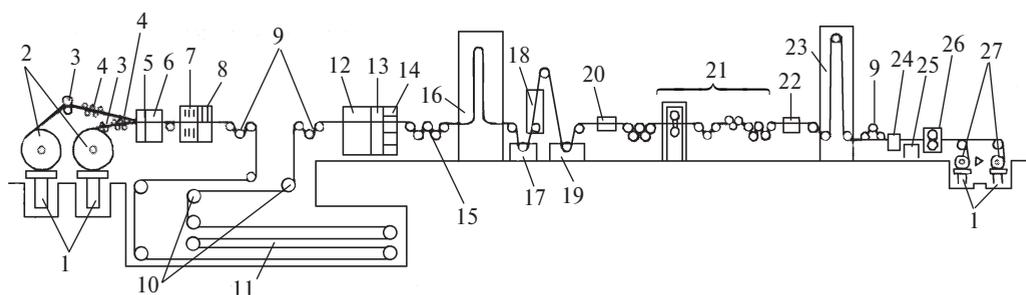


Рис. 17.26. Схема расположения оборудования АГНЦ с башенной печью на НЛМК: 1 — рулонная тележка; 2 — разматыватель; 3 — тянущие ролики; 4 — правильная машина; 5 — измеритель толщины полосы; 6, 26 — ножницы; 7 — сварочная машина; 8 — пробивной пресс; 9 — натяжные ролики; 10 — поворотные ролики; 11 — входной накопитель; 12 — ванна щелочной очистки; 13 — промывочные ванны; 14 — сушилка с горячим воздухом; 15 — натяжная станция; 16 — башенная печь для термообработки полосы; 17 — ванна цинкования; 18 — устройство струйного охлаждения; 19 — печь для отжига с аппаратом для регулирования узора покрытия; 20 — стенд для измерения толщины покрытия; 21 — дрессировочная клеть и правильно-растяжная машина; 22 — ванна пассивации; 23 — башенный выходной накопитель; 24 — маркировочное устройство; 25 — контрольный стол; 27 — моталки

Третья часть агрегата представляет собой башенную печь для термической обработки полосы, в которой обработка ведется в среде диссоциированного аммиака. Эта часть интересна тем, что позволяет в широком диапазоне изменять режимы нагрева и охлаждения металла, обеспечивая производство листа с различными механическими свойствами. В комплекс печи входят несколько камер:

предварительного окислительного нагрева до 580–600 °С, предназначенного для окончательной очистки поверхности металла от следов загрязнения;

безокислительного нагрева до температуры рекристаллизационного отжига или нормализации 720–950 °С (в зависимости от марки стали и требований к листу);

восстановительного нагрева в восстановительной атмосфере и выдержки при указанной температуре, при которой окисная пленка на поверхности листа восстанавливается до железа;

регулируемого охлаждения до температуры 650–750 °С для получения заданных механических свойств;

ускоренного охлаждения до температуры перестаривания (200–300 °С);

перестаривания, в которой полоса выдерживается в течение времени прохождения процессов старения;

нагрева до температуры 450–500 °С, необходимой для оцинкования.

После печи в линии агрегата установлены ванны с расплавом цинка, и оцинкование осуществляется путем погружения полосы в расплав с температурой около 500 °С. Установка струйного охлаждения, следующая по технологической линии, позволяет подавать на поверхность и кромки полосы из плоских сопел струи воздуха и азота, с помощью которых удаляются излишки цинка. За счет управления скоростью подачи струи можно регулировать толщину цинкового покрытия, делать ее неравномерной по сторонам или осуществлять одностороннее покрытие. На более старых агрегатах для этой цели применялись отжимные ролики. Однако при использовании острой газовой струи улучшается качество покрытия, структура цинка становится более мелкозернистой и благоприятной для процессов глубокой вытяжки, повышается равномерность распределения цинка по поверхности (отсюда экономия цинка) и увеличивается производительность агрегата. На роликах ограничены возможности регулирования толщины покрытия, невозможно обеспечить разную толщину на обеих поверхностях.

Печь 19 предназначена для получения покрытия из железоцинкового сплава. На боковой стенке печи смонтирован аппарат для получения покрытия с минимальным узором кристаллизации цинка. Мелкий узор цинка получается при обработке незатвердевшего покрытия распыленным водным туманом, содержащим фосфаты натрия и аммония.

Далее полосу обрабатывают на дрессировочно-правильном агрегате 21. В состав агрегата входит 4-валковая дрессировочная клеть и правильно-растяжная машина. Деформация металла сначала прокаткой на дрессировочном стане, затем знакопеременным изгибом в сочетании с растяжением обеспечивает высокие механические свойства металла, идеальную плоскостность полосы, высокое качество поверхности, пониженную продольную разнотолщинность и равномерное распределение цинка по поверхности листа.

После оцинкования полоса проходит ванну пассивации с растворами оксалатов или хромовых соединений типа Cr_2O_7 (или других богатых кислородом солей). Здесь происходит окисление цинкового покрытия до ZnO_2 , который обладает высокой коррозионной стойкостью в воздушной среде.

После маркировки, разрезки по шву с удалением шва и смотки в рулон полоса покидает АГНЦ и поступает на агрегаты поперечной или продольной резки, как и автомобильный лист.

Горячее цинкование обладает одним существенным недостатком: образующийся при этом промежуточный слой железозинкового соединения ухудшает адгезию цинка с основным металлом, снижает механические свойства и штампуемость, способствует коррозии листа.

Наряду с агрегатами горячего цинкования широко используются агрегаты электролитического цинкования. Толщина покрытия в этом процессе составляет 2,5–10,0 мкм, что в 4–10 раз меньше, чем на АГНЦ. Экономия в несколько раз дефицитного цинка является одним из главных достоинств такого способа покрытия. Кроме того, при электролитическом цинковании не образуется промежуточный слой, и механические свойства и штампуемость сохраняются на первоначальном уровне, как у автомобильного листа. Покрытие характеризуется хорошей адгезией к стальной полосе, имеет мелкозернистую структуру, отличается большей равномерностью по сравнению с покрытием погружением в расплав. Покрытие имеет матовую равномерную поверхность без узоров, хорошо удерживает краску. Электролитически оцинкованный лист в неокрашенном виде, и тем более со специально обработанной или окрашенной поверхностью, имеет отличный товарный вид и высокую коррозионную стойкость. Все это в целом позволяет расширять область применения электролитически оцинкованного листа и наращивать его производство. Такая тенденция наблюдается во всех странах.

К недостаткам процесса следует отнести высокую токсичность электролита, высокий расход реактивов, сравнительно низкую производительность агрегатов. Однако в последние годы разработаны и эксплуатируются агрегаты с высокой скоростью обработки, сравнимой с АГНЦ, и высокой производительностью (до 400 тыс. т/год и более). Темпы роста производства электролитически оцинкованной стали являются в последнее время самыми высокими для стальной продукции в Японии и США. Этот вид листовой продукции пользуется повышенным спросом на мировом рынке со стороны автомобильных предприятий.

В России первые два агрегата электролитического цинкования построены на Лысьвенском металлургическом заводе.

Процесс производства электролитически оцинкованного листа осуществляется на непрерывных агрегатах электролитического цинкования, устройство которых традиционно: головная часть для обеспечения непрерывности процесса с известным нам набором оборудования, агрегаты для осуществления технологических процессов и хвостовая часть с установками для отделки, разрезки и сматывания полосы в рулон.

Технологический процесс состоит из трех этапов:

- 1) подготовка поверхности, состоящая из операций обезжиривания в горячем щелочном растворе или в электролитической ванне и травления в серной или соляной кислоте;

2) электролитическое цинкование на непрерывном агрегате, при котором непрерывно движущаяся полоса проходит ванны с электролитом. В основном применяют сульфитный электролит, содержащий 350–400 г/л $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ и 25–30 г/л $(NH_4)_2SO_4$ при температуре раствора 35–38 °С. Ток плотностью 40–60 А/дм² пропускается между свинцовыми анодами, покрывающими дно ванны, и медным токоподводящим барабаном, который внутри электролита огибается движущейся полосой;

3) обработка покрытия: фосфатирование в ваннах с фосфатом цинка, пассивация в растворе хромовой кислоты, промывка и сушка.

По современной технологии далее полоса поступает в ванны для обработки покрытия (фосфатирования, хромирования и т. п.). Для этой же цели часто применяют отдельно стоящие непрерывные агрегаты. Они пригодны для нанесения металлических или неметаллических покрытий не только на оцинкованный лист, а в большинстве случаев — на непокрытый лист из низкоуглеродистых сталей. Все эти агрегаты отличаются друг от друга только способами подготовки поверхности и нанесения покрытия на поверхность листа. Для нанесения металлических покрытий наиболее перспективным считают термовакуумный способ, при котором в герметической вакуумной камере электронным лучом или токами высокой частоты испаряют наносимый металл (алюминий, хром и др.), который конденсируется на движущейся через камеру полосе.

Для покрытия полосы пластмассовыми пленками (поливинилхлоридом и др.) также осуществляется сначала подготовка поверхности полосы путем ее обезжиривания и промывки, затем следуют операции нанесения клея на полосу и пленку, смотки листа с покрытием и разогрева его до плотного склеивания покрытия с основой. На заключительных операциях осуществляют отделку покрытия (тиснение рисунка), а также контроль качества, маркировку и т. д.

17.10. Особенности производства других видов листа

17.10.1. Особенности производства жести

Требования к жести определяет ГОСТ 13345–85. Выпускают жести марок ЧЖК, ЧЖР, ГЖК, ГЖР, ЭЖК, ЭЖК-Д, ЭЖР и ЭЖР-Д. Здесь ЖК — жести консервная, ЖР — жести разного назначения (кроме тары для пищевых продуктов), Ч — черная жести (без покрытия), Г — горячего лужения (покрытая оловом методом погружения в расплав), Э — с электролитическим покрытием оловом, Д — с дифференцированным покрытием (с неравной толщиной по сторонам). Жести изготавливают в листах длиной до 910 мм, шириной до 1024 мм и в рулонах шириной от 712 до 1024 мм. Толщина жести — от 0,18 до 0,50 мм. В последнее время освоена прокатка сдвоенной полосы, тогда минимальная толщина жести равна 0,09 мм. Отклонения по толщине жести — от +0,01 до –0,02 мм, что продиктовано требованиями автоматизированных станков, производящих консервную тару. Понятно, что применение жести минимальных толщин в консервной промышленности без ущерба для консервируемого продукта позволяет экономить значительное количество металла. Для жести сфор-

мулированы определенные требования по качеству и свойствам покрытия. Толщина покрытия изменяется от 18 до 36 мкм. По массе покрытия на единицу площади листы делятся на три класса (1-й класс — до 25 г/м²; 2-й класс — 33–28 г/м²; 3-й класс — 29 г/м² и более), по степени твердости покрытия — на пять категорий.

Шероховатость черной жести, предназначенной для электролитического лужения, должна быть не более $R_a = 0,63$, для горячего лужения шероховатость не регламентируется. Для лужения используют те же низкоуглеродистые стали, что и для оцинкования: 08кп, 08Ю, 10кп, 08пс, 10пс.

Белую жечь, имеющую оловянное покрытие, получают из черной жести на агрегатах непрерывного лужения, конструктивно похожих на АГНЦ и АЭЦ. Основные технологические операции выполняются по сходной технологии с небольшими отклонениями. Первой операцией является травление листа, полученного в рулоне на ШПС. Оно осуществляется на тех же АНТ, что и при производстве автолиста. Затем следует прокатка на непрерывных станах. В отличие от автомобильного или оцинкованного листа суммарные обжатия на станах для производства жести должны быть выше, поскольку конечная толщина жести ниже, чем автомобильного листа. В связи с этим для жести используют 5- и 6-клетевые непрерывные или бесконечные станы кварто. Этому способствует также применение высокоэффективных технологических смазок, снижающих коэффициент трения до 0,02–0,08. В качестве смазки используют чистое пальмовое масло или смесь пальмового и растительного масла с водой.

Промывку и обезжиривание жести (черной) после прокатки обычно осуществляют на отдельных агрегатах для электролитической и щелочной промывки полосы. После обезжиривания осуществляют отжиг полосы в АНО, как и для автомобильной стали.

В настоящее время основное количество белой жести в рулонах и в карточках производят на непрерывных агрегатах по типу АГНЦ. Самый совершенный на территории СНГ жестепрокатный комплекс такого типа находится на комбинате “Миттал Стил Темиртау”, включающий традиционный набор входных установок: агрегат для травления исходной горячекатаной полосы, 6-клетевой стан бесконечной прокатки 1400, агрегат для удаления смазки и грязи путем промывки в щелочных ваннах, снабженных щетками. Далее следует агрегат, в который входят:

термическая печь с отделениями для финишной термохимической очистки поверхности полосы, для отжига в целях снятия наклепа и для подготовки температуры полосы к погружению в расплав олова (температура плавления олова 232 °С);

ванна с расплавленным оловом и установки для снятия лишнего расплава с полосы, выравнивания и регулирования толщины покрытия и т. п.;

2-клетевой прокатно-дрессировочный стан 1400 с валками кварто 600/1400×1400 мм;

ванны для пассивации покрытия и набор оборудования для промывки, сушки, промасливания, вырезки шва и сматывания рулонов на моталки.

Стан бесконечной прокатки предназначен для выпуска жести одинарной прокаткой 0,18–0,60 мм из подката 2,4 мм. Масса рулона 30 т, скорость прокатки 33 м/с. На прокатно-дрессировочном стане проводят двоянную прокат-

ку и одинарную дрессировку жести толщиной 0,08–0,16 мм. Прокатка жести осуществляется с малыми обжатиями (менее 0,005–0,500 мм) с большими контактными нормальными напряжениями (более 500–1500 Н/мм²) при больших значениях R/h_0 (более 500–3000), что ведет к очень большим упругим деформациям валков и большой доли упругих зон в очаге деформации. Реализуются сверхнизкие очаги деформации. Последние исследования показали, что на этом стане полезно снижение диаметра валков с 600 до 420 мм, что позволит увеличить обжимающую способность валков на 13,1–14,3 % и снизить расход энергии на 15,1–45,5 %. Однако дальнейшее снижение диаметра валков нежелательно, так как теряются преимущества сверхнизкого очага.

Для производства жести и тонких полос с повышенными требованиями по разнотолщинности и плоскостности в Южной Корее установлен очень совершенный 2-клетевой стан производительностью 400 тыс. т/год. В первой клетке ведется чистовая прокатка с толщины 0,2–0,6 мм до 0,15–0,36 мм, а во второй — дрессировка с обжатием до 2 %. Обе клетки оснащены быстродействующими ГНУ, системами регулируемого изгиба и осевого смещения валков (CVC). Работает система смазки, позволяющая одновременно регулировать тепловой профиль валов.

Более высокое качество лужения при равномерном тонком слое олова обеспечивает электролитическое лужение. Оно осуществляется на непрерывном агрегате (рис. 17.27), установленном после прокатного стана и промывочной установки. Два таких агрегата имеются на Лысьвенском металлургическом заводе (Пермская обл.). Последний наиболее совершенный агрегат электролитического лужения жести толщиной 0,18–0,32 мм и шириной до 1000 мм построен на ММК.

При производстве электролитически луженой жести электролитом является серноокислый раствор, анодом — электроды из чистого олова и катодом — движущаяся полоса. После покрытия оловом полоса проходит печь, в которой покрытие оплавляется, чтобы устранить его пористость. Затем осуществляется пассивация покрытия в растворе хромовой кислоты Cr_2O_7 , промывка, сушка, промасливание и после контроля качества — смотка в рулон. Нанесенная на поверхность жести смазка предотвращает ее коррозию, а также улучшает штампуемость. На агрегате предусмотрена резка полосы на отдельные карточки.

В целях экономии дефицитного олова в последнее время все большее количество черной и белой жести покрывается слоем пищевых лаков. Операция

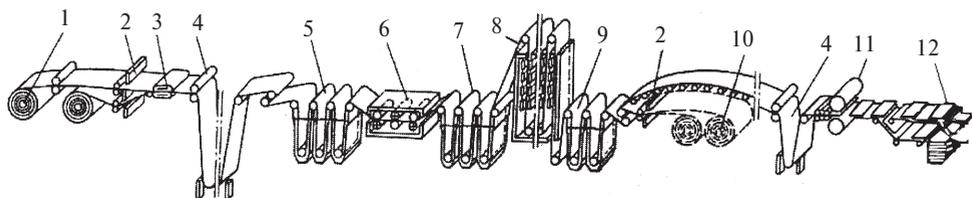


Рис. 17.27. Агрегат для электролитического лужения жести:

1 — разматыватель; 2 — ножницы; 3 — сварочная машина; 4 — подающие ролики; 5 — ванна электролитического обезжиривания; 6 — ванна травления; 7 — ванна электролитического покрытия оловом; 8 — печь для оплавления олова; 9 — ванна пассивации олова; 10 — моталки; 11 — ножницы; 12 — столы — укладчики готовых карточек в пакеты

лакировки осуществляется на агрегатах непрерывного типа, в которых наиболее важными являются устройства для подготовки поверхности с последующим нанесением лака и сушки покрытия. Нанесение лака осуществляют с помощью двух роликов, которые постоянно смачиваются клеящим раствором и лаком. На Лысьвенском металлургическом заводе один из агрегатов производит хромированную лакированную консервную жечь марок ХЛЖК и ХЛЖР толщиной 0,18–0,32 мм, на которую вместо олова электролитическим путем наносится слой хрома и по нему затем — слой лака.

17.10.2. Особенности производства холоднокатаной нержавеющей стали

Холоднокатаная нержавеющая сталь имеет высокие антикоррозионные свойства. В виде зеркального или полированного листа она широко используется при изготовлении различной продукции, в которой товарный вид имеет большое значение. Различают два вида нержавеющей стали: антикоррозионный, сопротивляющийся коррозии в различных агрессивных средах, и жаростойкий, предназначенный для работы при температурах свыше 550 °С. Наиболее распространены нержавеющие стали, содержащие около 18 % Cr и примерно 9 % Ni. Это аустенитные стали 12Х18Н9Т, 08Х20Н10Т2 и др. Холоднокатаный лист производят также из нержавеющих сталей мартенситного (20Х13, 30Х13, 0Х13, 09Х16Н4Б и др.), мартенситно-ферритного (13Х13, 15Х12ВНМФ и др.), ферритного (08Х13, 15Х28, 08Х17Г и др.), аустенитно-мартенситного (09Х15Н8Ю, 20Х13Н4Г9 и др.) и аустенитно-ферритного класса (08Х22Н6Т, 12Х21Н5Т и др.).

Нержавеющие стали быстро упрочняются при прокатке, поэтому при деформации 55–60 % требуют отжига для снятия наклепа. Прокатка листа в холодном состоянии производится, как правило, на одноклетевых станах, значительно реже — на непрерывных станах, так как объемы производства такой стали малы. Для прокатки тонкого листа 0,20–0,05 мм предпочтительны 20-валковые станы, на которых суммарное обжатие без отжига увеличивается до 70–85 %.

Все технологические операции при холодной прокатке — травление, прокатка, термическая обработка и дрессировка — выполняются на тех же агрегатах, что и для углеродистых сталей, но по иным режимам и с меньшими объемами производства. При прокатке нержавеющей стали большее значение имеет технологическая смазка, для листов выше 0,5 мм применяют эмульсии, а для более тонких листов — растительные и животные жиры.

Различаются режимы окончательной термической обработки листа и отделки его поверхности. Это обусловлено повышенными требованиями к внешнему виду нержавеющей стали. Стали аустенитного и аустенитно-мартенситного класса поставляются в закаленном состоянии, так как при закалке фиксируется состояние однородного твердого раствора — аустенита. Для таких сталей применяют заключительные операции: нагрев до состояния аустенита, выдержка для растворения в аустените различных составляющих, закалка в воду (для стабилизации аустенита), травление в целях удаления окалины, дрессировка, резка на АПР или АКР. В некоторых случаях листы нержавеющей

стали подвергаются правке на правильно-растяжных машинах. Иногда лист должен обладать более равномерными свойствами, отсутствием шероховатости и повышенной штампруемостью, что достигается после дрессировки на отдельном стоящем дрессировочном стане с очень малыми обжатиями (1–2 %), необходимыми для придания плоскостности и зеркальности.

Стали ферритного класса обладают меньшей пластичностью, чем аустенитные. При температуре отжига 850–900 °С они склонны к быстрому росту зерна и межкристаллитной коррозии, поэтому их отжигают при температуре 740–780 °С, при которой получается ферритно-карбидная структура, обладающая высокой пластичностью и высокими антикоррозионными свойствами.

Часть нержавеющей стали после холодной прокатки в рулонах подвергается полировке до 12–13 класса чистоты поверхности с помощью полировочной пасты на соответствующих станках. Как правило, полированные листы нарезаются на ленты или карточки по обычной технологии. Полированный лист идет в мебельную промышленность, на изготовление зеркал, приборов и бытовой техники, обеспечивая высокие антикоррозионные свойства и отличный товарный вид.

17.11. Производство электротехнического листа

Электротехнические стали по способу производства и характеру кристаллографической текстуры делятся на динамные (малотекстурованные изотропные) и трансформаторные (высокотекстурованные анизотропные). Основная масса такой стали выпускается по ГОСТ 21427–83 в виде листа толщиной 0,35–0,50 мм, шириной 750–1000 мм и длиной до 2000 мм, а также в рулонах шириной 500–1000 мм и массой до 5 т. Меньшая доля листа имеет толщину от 0,05 до 0,20 мм. За последние годы появился спрос на рулонную сталь толщиной 0,025 мм.

К электротехническим сталям предъявляются очень высокие требования по геометрии листов. Волнистость или коробоватость недопустима, допуски по толщине и ширине, а также по продольной и поперечной разнотолщинности более узкие, чем для автомобильной стали. Это связано с тем, что из таких листов набирают магнитопроводы электрических машин и сердечники трансформаторов, реле и т. п. Недопустимы какие-то пустоты между листами, а также остаточные напряжения в них при сборке магнитопроводов, так как все это влияет на уровень магнитных свойств изделия. Шероховатость поверхности листа по той же причине недопустима. На поверхности листа не должно быть никаких дефектов (царапин, наколов и пр.), следов грязи, смазки и продуктов сгорания при отжиге металла.

Основные требования на электротехническую сталь выдвигаются по ее магнитным характеристикам. Трансформаторная сталь должна иметь низкие ваттные потери, которые при перемагничивании в изделии (трансформаторы, реле и пр.) складываются из потерь на вихревые токи — 65–75 %, из гистерезисных потерь, пропорциональных площади петли гистерезиса при перемагничивании, — 20–30 % и из прочих потерь — до 5 %. Эта сталь должна иметь высокую магнитную индукцию и низкую коэрцитивную силу. Эти свойства достигаются прежде всего путем очистки металла от примесей и включений.

На магнитные свойства решающее влияние оказывает химический состав стали. Все входящие в сталь элементы, кроме кремния, ухудшают магнитные свойства и являются нежелательными примесями. Однако экспериментально показано, что минимальное количество примесей в стали помогает формированию определенной текстуры, необходимой для получения высоких магнитных свойств. Кремний повышает удельное электросопротивление, способствует образованию крупных зерен, необходимых для повышения магнитной проницаемости и уменьшения потерь на гистерезис. Количество кремния в трансформаторной стали обычно не превышает 2,8–3,2 %. Такая сталь высокопластична и сравнительно хорошо катается в горячем и холодном состоянии. При содержании углерода менее 0,2 % и кремния менее 3,2 % сталь не испытывает фазовых превращений при термической обработке и демонстрирует стабильные характеристики. При более высоком содержании кремния, особенно при наличии в стали других примесей, фазовые превращения возможны. При этом повышается предел текучести, увеличивается хрупкость стали и снижается пластичность, что создает трудности при холодной прокатке. При содержании кремния выше 6 % трансформаторная сталь становится непластичной, и ее прокатка затруднена даже в горячем состоянии. Кроме железа и кремния в состав стали входят следующие элементы, %: С 0,004–0,008, Мп 0,08–0,20, Р 0,005–0,010, S 0,002–0,005, Ni 0,06, Cr 0,03–0,06, Cu 0,08–0,15, Al 0,015–0,020, O 0,003–0,004, N 0,0015–0,0039. Углерод, азот, кислород и сера даже в таких количествах оказывают отрицательное влияние на уровень магнитных свойств, поэтому всеми мерами их содержание в стали уменьшают.

Холоднокатаная трансформаторная сталь имеет на 25–30 % выше магнитную индукцию и в 1,5–2,0 раза меньшие ваттные потери, чем горячекатаная. Применение высококачественной холоднокатаной стали вместо горячекатаной позволяет уменьшить массу и габариты крупных трансформаторов и электрических машин, а также сократить потери электроэнергии, уменьшить перегрев машин, сэкономить расход материалов и средств. Отсюда понятно, что подавляющее количество трансформаторной стали производится в два передела: сначала в горячем состоянии до определенных промежуточных толщин, затем в холодном состоянии. На втором переделе с помощью деформации и термической обработки формируются окончательные свойства металла.

Одной из отличительных особенностей холоднокатаной трансформаторной стали является ее кристаллографическая текстурованность. Текстурой называется направленное расположение кристаллографических плоскостей атомной решетки металла по отношению к плоскости листа и направлению прокатки. Различают электротехническую сталь с ребровой и кубической текстурой. Ребровая текстура (рис. 17.27, а), имеющая обозначение (110) [100], соответствует такому развороту кристаллографической решетки, когда диагональная плоскость куба (110), заштрихованная на рисунке, параллельна плоскости листа и ребро куба [100], которое определяет направление легкого намагничивания, совпадает с направлением прокатки. Направление самого трудного намагничивания [111] (главная диагональ куба) находится под углом 45° к направлению прокатки. По направлению [110], расположенному под углом 90° к оси прокатки, намагничивание среднее. Следовательно, у такой стали магнитные свойства анизотропны, т. е. зависят от направления измерения. Они максимальны

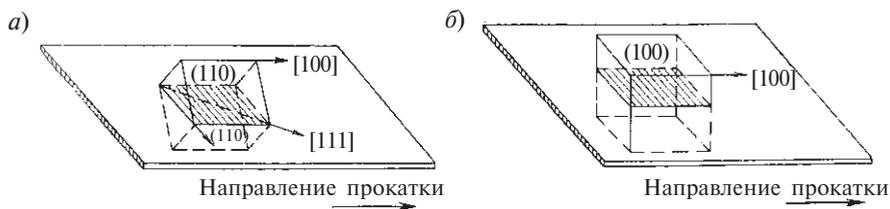


Рис. 17.28. Ребровая (а) и кубическая (б) текстуры

в направлении прокатки. При изготовлении трансформаторов учитывают анизотропию магнитных свойств и размещают листы в конструкции так, чтобы магнитный поток совпал с направлением наименьших ваттных потерь и максимальной магнитной индукцией.

Но при изготовлении электрических машин, где магнитный поток совершает круговое вращение, такие стали применять нельзя. Требуются малотекстурованные изотропные электротехнические стали, свойства которых мало отличаются вдоль и поперек направления прокатки листа. Такими свойствами обладают листы с кубической текстурой (100) [100] (рис. 17.27, б). Грань куба (100) совпадает с плоскостью прокатки, а ребро куба [100] — с направлением прокатки. Направление легкого намагничивания — ребро куба — располагается равнозначно вдоль и поперек направления прокатки, а направление среднего намагничивания [110] находится под углом 45° к оси прокатки. Следовательно, магнитные свойства такой стали будут мало зависеть от направления прокатки.

Необходимость формирования текстуры предъявляет особые требования к организации технологии производства холоднокатаного листа. В разноориентированных зернах горячекатаного металла количество кубической и ребровой текстуры в процентном отношении невелико. Ваттные потери на такой стали находятся на уровне 2,5 Вт/кг (2,5 Вт на каждый килограмм железа). При холодной прокатке зерна вытягиваются, и кристаллографические плоскости выстраиваются так, что количество кубической текстуры возрастает. При значительных суммарных деформациях накапливается ребровая текстура. Но зерна металла в трансформаторной стали должны быть равноосными, поэтому в процессе прокатки необходимо часто отжигать металл. После отжига зерна становятся равноосными и мелкими, а накопленная текстура при этом сохраняется. Таким образом, трансформаторную сталь необходимо прокатывать с большой суммарной степенью деформации, причем часто отжигать ее в промежутках. Чем больше степень деформации и больше отжигов, тем большую долю будет составлять ребровая текстура и будут выше электротехнические свойства. При значительной доле ребровой текстуры удастся сократить ваттные потери до 0,5 Вт/кг и даже меньше. Конечно, такие рекомендации ограничены разумной стоимостью полученного листа. Практически применяют два, значительно реже — три цикла прокатки-отжига.

Величина зерна также существенно влияет на электротехнические свойства листа: чем крупнее зерно, тем меньше границ, препятствующих процессам перемагничивания, тем выше магнитные свойства стали. Следовательно, в технологии необходимо предусмотреть операцию выращивания зерна.

Большое влияние на формирование электротехнических свойств листа оказывает смазка, применяемая при прокатке. При рассмотрении низких очагов деформации в теории ОМД мы неоднократно подчеркивали возможность использования гипотезы плоских сечений. Однако при исследовании процессов формирования текстуры гипотеза плоских сечений неприемлема. Для таких тонких процессов, как текстурообразование, неравномерность деформации по высоте даже на низком очаге деформации существенна. Наибольшую деформацию получают центральные слои листа, здесь подпирающие силы трения меньше влияют на напряжения и деформации, чем в поверхностных слоях. Применение высококачественной смазки, которая сильно снижает коэффициент трения на контакте, способствует выравниванию деформации по слоям и получению более равномерной текстуры металла. При улучшении смазки увеличивается анизотропия текстуры. На НЛМЗ применение новой смазки позволило уложиться в два цикла прокатки-отжига, чтобы получить свойства, которые при обычной смазке достигаются в три цикла.

Все отмеченные соображения заложены в технологию производства электротехнического листа. Основными производителями этого вида продукции являются НЛМК и Верх-Исетский металлургический завод. Они производят трансформаторную сталь толщиной 0,27–0,50 мм по ГОСТ 21427.1 и динамную сталь толщиной 0,18–0,30 мм по ГОСТ 21427.2.

Рассмотрим технологию производства трансформаторной (анизотропной) стали применительно, например, к НЛМК. Исходный сляб получают либо прокаткой из слитка на слябинге (из Запорожстали), либо отливкой на МНЛЗ (производится на НЛМК). Так как литые слябы склонны к образованию поверхностных трещин, то после разливки они отжигаются в камерных печах. Затем слябы нагреваются до температур около 1200 °С в обычных методических печах. Нагрев ведут с учетом того, что электротехнические стали склонны к обезуглероживанию и росту зерна, что может быть использовано для получения стали с низкими ваттными потерями. Горячую прокатку на многих заводах проводят на непрерывных широкополосных станах с температурой конца прокатки не ниже 815 °С. В интервале отмеченных температур трансформаторная сталь имеет высокую пластичность.

Толщина горячекатаного листа обычно находится в пределах 2,0–3,5 мм. Выбор толщины подката для последующей холодной прокатки сильно влияет на условия холодной прокатки. К горячекатаной полосе, помимо жесткого регламентирования по толщине, предъявляются также следующие требования:

- 1) строгое соблюдение размеров по ширине и длине полос;
- 2) качественное состояние кромок;
- 3) отсутствие внутренних напряжений, обуславливающих волнистость и коробоватость;
- 4) минимальный слой окалины на поверхности;
- 5) высокая чистота поверхности, отсутствие грязи на поверхности;
- 6) равномерная структура по всем трем направлениям;
- 7) высокие механические свойства.

На ЛМНЗ для горячей прокатки трансформаторной стали используют стан 1200, состоящий из двух реверсивных клетей. Черновая универсальная клеть дуо имеет горизонтальные валки 850 мм и вертикальные валки 600 мм. Чистовая

клеть кварто 620 мм снабжена моталками в печи (стан Стеккеля). Это позволяет регулировать скорости прокатки и режимы обжатий в более широких пределах, чем на НШПС, выдерживать стабильную температуру прокатки. Это особенно важно для прокатки высококремнистых сталей, имеющих узкий интервал пластичности. Но в целом станы Стеккеля не имеют существенных преимуществ перед НШПС. Более простые электротехнические марки стали прокатываются по обычной технологии на непрерывном широкополосном стане 2000.

При подготовке металла к холодной прокатке первой операцией может быть высокотемпературный черный отжиг. Он осуществляется в колпаковых электрических печах при температуре 760–850 °С без защитной атмосферы. За счет кислорода окалина и кислорода воздуха происходит выгорание углерода. Однако в колпаковых печах происходят неравномерные реакции по разным виткам, поэтому в современных цехах, имеющих АНО, обезуглероживание в колпаковых печах не производят. Эту операцию совмещают с операциями непрерывного отжига на АНО после первой прокатки.

В этом случае следующая технологическая операция — освобождение полосы от окалина — становится первой. Ее также осуществляют на АНТ, применяемых для обработки низкоуглеродистых сталей. Однако травление плотных окислов кремнийсодержащей стали осуществляется значительно медленнее, чем низкоуглеродистых. Для ускорения процесса травления большая роль отводится дрессировочному стану, входящему в состав АНТ. Кроме того, в процессе травления кремнийсодержащих сталей в растворе накапливается кремниевая кислота, замедляющая процесс травления. В связи с этим обработку полосы ведут путем подачи кислоты на поверхность листа струйным методом.

Режим холодной прокатки листа оказывает решающее влияние на конечные свойства трансформаторной стали. На НЛМК прокатку ведут в два этапа с суммарным обжатием на каждом этапе не меньше 60–65 %. Первую прокатку проводят на непрерывном 4-клетевом стане с толщины, например, 2,50 до 0,85 мм. Вторую прокатку проводят на одноклетевом реверсивном стане за четыре-пять проходов до конечной толщины. Для листов толщиной 0,10 и 0,35 мм для второй прокатки применяют 20-валковые станы, обеспечивающие высокую точность, плоскостность и чистоту поверхности листа. Для листов толщиной 0,5 мм может быть применен одноклетевой реверсивный стан кварто.

В промежутке между прокатками осуществляют светлый отжиг полосы на АНО. Одновременно проводят обезуглероживание стали. Отжиг проводят в горизонтальных или башенных печах непрерывного действия. Как всегда, головная часть агрегата содержит набор установок, обеспечивающих непрерывность процесса. Далее следуют ванны для обезжиривания и очистки поверхности полосы от шламов. Печи для отжига позволяют получать равномерные свойства по длине полосы, а также регулировать процесс обезуглероживания путем изменения скорости движения полосы и состава печной атмосферы. Температура отжига в зависимости от толщины полосы составляет 750–850 °С. Обезуглероживающая атмосфера состоит из водорода, увлажненного водяным паром. В результате обезуглероживания количество углерода в стали сокращается от 0,02–0,05 до 0,004–0,008 %, что улучшает электротехнические характеристики и текстурообразование стали. При такой термообработке происходит также выгорание серы и других вредных примесей.

После второй прокатки лист порулочно на отдельном агрегате покрывают защитным слоем гидрата окиси магния, который должен предотвращать схватывание витков рулона при последующем отжиге. Далее проводится высокотемпературный отжиг в электрических колпаковых печах при температуре 1150–1180 °С в атмосфере чистого H_2 или смеси 75 % H_2 + 25 % N_2 . Такой отжиг предназначен для выращивания крупных зерен феррита в стали, а также для снятия наклепа, повышения однородности химсостава металла и уменьшения примесей. После длительной выдержки при указанных температурах, необходимой для получения требуемых крупных зерен, печь охлаждают до 600 °С. Затем под муфель подают защитный газ и переносят муфель на другой стенд, где он охлаждается до комнатной температуры. После термообработки рулоны поступают на непрерывный агрегат, на котором лист проходит чистку в моечно-сушильных установках и отпуск в проходных печах при температуре 700–800 °С. Этим устраняются остаточные напряжения в металле, возникшие при высокотемпературном отжиге, которые могут привести к искажению формы листа при хранении на складе.

Трансформаторную сталь поставляют заказчику с электроизоляционным двусторонним покрытием, что повышает ее антикоррозионные свойства, уменьшает температуру трансформаторов при эксплуатации и улучшает его характеристики. Нанесение покрытия осуществляют на непрерывном агрегате, который, как всегда, состоит из трех частей. В головной части осуществляются традиционные подготовительные операции по организации непрерывности процесса. Точечная сварка металла внахлест значительно сокращает расходы на эту операцию. На второй части агрегата лист пропускают через водный раствор ортофосфорной кислоты, слой которой на поверхности и является электроизоляционным покрытием. Затем лист проходит ванну с раствором окиси магния, который призван защитить электроизоляционный слой от механических воздействий. После сушки полоса проходит печь отпуса, входящую в состав агрегата, для устранения вновь появившихся остаточных напряжений. На третьей части агрегата вырезается место сварки и производится сматывание полосы в рулон.

Заключительные операции, как и для конструкционной стали, осуществляются вне агрегата — резка на АПР или АКР, контроль качества продукции, упаковка, маркировка и т. д.

При производстве динамной стали, которая содержит кремния в пределах 1,3–1,8 %, нет проблем с пластичностью металла, поэтому ее в горячем состоянии прокатывают на НШПС 2000, а холодная прокатка производится на непрерывном 4-клетевом стане 1400, на котором допустима прокатка в холодном состоянии без отжига до 80 %. Можно ограничиться только одним циклом прокатки-отжига. Отжиг проводится в АНО, в котором совмещены процессы рекристаллизационного отжига и обезуглероживания (при 980–1030 °С во влажной атмосфере). В динамной стали нет ярко выраженной текстуры, нет столь крупных зерен, как в трансформаторной стали. Поэтому все технологические операции осуществляются по более мягким режимам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е.** Теория продольной прокатки. М.: Металлургия, 1980. 318 с. : ил.
2. **Сторожев М.В., Попов Е.А.** Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1971. 424 с. : ил.
3. **Смирнов В.С.** Теория прокатки. М.: Металлургия, 1967. 460 с. : ил.
4. **Грудев А.П.** Теория прокатки. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 280 с.
5. **Третьяков А.В., Трофимов Г.К., Зюзин В.И.** Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1964. 223 с. : ил.
6. **Смирнов В.К., Шилов В.И., Инарович Ю.В.** Калибровка прокатных валков: Учеб. пособие для вузов. М.: Металлургия, 1987. 368 с.
7. **Тарновский И.Я., Смирнов В.К., Коцарь С.Л.** Продольная прокатка профилей переменного сечения. Свердловск: Металлургиздат. Свердл. отд-ние, 1962. 366 с.
8. **Илюкович Б.М.** и др. Прокатка и калибровка фасонных профилей: Справ. М.: Металлургия, 1989. 309 с.
9. **Гуляев А.П.** Металловедение. М.: Металлургия, 1978. 646 с.

Учебное издание

Рудской Андрей Иванович
Лунев Владимир Алексеевич

**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ
ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Учебное пособие

Редакторы: *Е.С. Васильева, О.В. Махрова*
Технический редактор *А.И. Колодяжная*
Корректор *А.И. Rogozin*
Дизайн обложки *Т.М. Ивановой*
Компьютерная верстка *Е.А. Типцовой*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного в СПбГПУ

Подписано в печать 11.12.2007. Формат 70×100/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 42,5. Уч.-изд. л. 45,0. Тираж 500. Заказ 56.

Санкт-Петербургская издательская фирма «Наука» РАН.
199034, Санкт-Петербург, Менделеевская лин., 1.

Отпечатано в типографии Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

ISBN 978-5-02-025302-5



9 785020 253025