

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.И. Рудской В.А. Лунев О.П. Шаболдо

ВОЛОЧЕНИЕ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2011

УДК 621.778 (075.8) + 621.777 (075.8)

Р 83

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор Уральского федерального университета имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина *А.А. Богатов*

Доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного
политехнического университета *Н.Г. Колбасников*

Рудской А. И. Волочение: учеб. пособие / А. И. Рудской, В. А. Лунев, О. П. Шаболдо.
– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 126 с.

Соответствует содержанию учебной программы по курсу «Волочение и прессование» вариативной части комплексной программы подготовки магистров по направлениям 150400 «Металлургия» и 150100 «Материаловедение и технология металлов».

Даны основные теоретические и технологические понятия, методы расчетов, достижения и перспективы развития волочильного производства на крупных предприятиях и мини заводах. В духе традиций высшей политехнической школы основное внимание уделено разъяснению физической сущности технологических процессов.

Приведены новые практические материалы по использованию волочения на современных мини заводах при производстве мелкосерийных партий проволоки из материалов со специальными свойствами.

Может быть использовано студентами других специальностей, а также инженерами-технологами, работающими в области обработки металлов давлением.

Табл. 3. Ил. 58 . Библиогр.: 70 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

ISBN 978-5-7422-3096-0

© Рудской А.И., Лунев В.А., Шаболдо О. П., 2011
© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Г л а в а 1. Основные вопросы теории.....	6
1.1. Деформации и напряжения при волочении	6
1.1.1. Технологические схемы волочения	6
1.1.2. Показатели деформации металла при волочении	8
1.1.3. Характер течения металла при волочении круглых прутков	9
1.1.4. Напряжения при волочении круглых прутков.....	12
1.1.5. Влияние различных факторов на напряжения при волочении	15
1.1.6. Сила волочения.....	19
1.1.7. Трение и смазка при волочении	23
1.1.8. Температурно-скоростные условия деформации.....	26
1.2. Волочение прутков некруглой формы поперечного сечения.....	29
1.2.1. Деформация фасонных профилей	29
1.2.2. Деформация прямоугольных профилей.....	35
1.2.3. Деформация металла в роликовой волоке.....	37
1.3. Волочение труб	43
1.3.1. Волочение без оправки	43
1.3.2. Волочение на короткой закреплённой оправке	45
1.3.3. Волочение на плавающей оправке	46
1.3.4. Волочение на длинной подвижной оправке	48
Г л а в а 2. Технология волочения на крупных заводах	49
2.1. Основные технологические операции	49
2.1.1. Сортамент продукции, получаемой волочением	49
2.1.2. Подготовка металла к волочению	51
2.1.2.1. Снятие окалины	52
2.1.2.2. Свойства окалины	54
2.1.2.3. Нанесение подсмазочных слоев	57
2.1.2.4. Острение прутков	58
2.2. Волочильные станы	60
2.2.1. Станы однократного волочения	60
2.2.2. Станы многократного волочения без скольжения проволоки	62
2.2.3. Станы многократного волочения со скольжением проволоки	65
2.2.4. Комбинированные станы. Поточные линии	67
2.3. Термообработка металла при волочении	69
2.4. Маршруты волочения	73
Г л а в а 3. Волочение прутков и проволоки из специальных сплавов в условиях мелкосерийного производства.....	77
3.1. Волочения проволоки и прутков в условиях производства ОА «ЦНИИМ»	77
3.1.1. Оборудование и номенклатура изделий специализированного пружинного производства ОАО « ЦНИИМ»	77
3.1.2. Выбор смазки	84
3.1.3. Волочение проволоки из титановых сплавов	87
3.1.4. Волочение проволоки из жаропрочных сплавов на никелевой основе	101
3.1.5. Волочение проволоки из жаропрочного сплава ниобия ЛН-1.....	107
3.1.6. Производство проволоки из материалов с памятью формы на основе никелида титана	114
3.2. Производство сварочной проволоки на минизаводе	116
Литература	120

ВВЕДЕНИЕ

Волочение относится к технологическим операциям, лежащих в основе многих производственных процессов в цехах по обработке металлов давлением. Номенклатура изделий, полученных волочением, непрерывно возрастает. Волочение чаще всего используется как отделочная операция, обеспечивающая высокую чистоту и качество поверхности, жесткие допуски по размерам и высокие механические свойства изделия.

В учебных программах большинства вузов, готовящих магистров по направлениям 150400 «Металлургия» и 150100 «Материаловедение и технология металлов», волочильное производство занимает такое же место, как прокатное, трубное, кузнечно-штамповочное и другие виды производства. Учебники и учебные пособия по волочению издаются редко, последний издавался сравнительно давно ([3]), поэтому новая учебная литература по этому виду обработки давлением необходима.

Предлагаемое учебное пособие полностью соответствует учебной программе по курсу «Волочение и прессование» вариативной части комплексной программы подготовки магистров по направлению 150400.68 «Металлургия» и 150100 «Материаловедение и технология металлов».

После изучения курса магистр должен:

- формулировать цели и ставить технологические и исследовательские задачи по волочению;
- самостоятельно приобретать новые знания и умения;
- использовать фундаментальные общетехнические знания для решения задач волочения;
- владеть навыками формирования и аргументации собственных суждений;
- анализировать и делать выводы по различным проблемам, связанным с теорией и технологией волочения;
- уметь применять различные методы решения технологических задач волочения;
- уметь выполнять маркетинговые исследования, проводить патентный поиск и техническую экспертизу, разрабатывать техническую документацию;
- уметь оценивать различные технологические решения;
- уметь разрабатывать параметры технологического инструмента;
- знать систему оценки свойств металлов, структуру формирования и систему оценки качества готовой продукции;
- знать и уметь применять экологические требования к волочильным технологиям.

Целью магистерского курса «Волочение» является приобретение:

- **знаний** по теории и технологии волочения, области его применения, перспективам развития
- **навыков** по использованию расчетных методик для проектирования маршрутов волочения, выбору оборудования, обоснованию принятых решений, применению компьютерных программ для решения технологических задач;
- **умения** самостоятельно ставить и решать технологические задачи, проводить маркетинговые исследования, использовать литературу по смежным дисциплинам, оценивать варианты решений по разным технико-экономическим критериям, использовать компьютер для решения задач.

Все это позволит студенту выработать определенные навыки и эрудицию, которые позволяют затем работать не только в волочительном производстве, но и в любой области обработки давлением.

Первая часть учебного пособия (гл. 1) посвящена теории процесса волочения. Помимо приобретения необходимых знаний, студент должен также научиться ориентироваться в имеющейся литературе, разбираться в проблематике рассматриваемых технологий, грамотно ставить и решать конкретные технологические задачи процессов волочения. Предусматривается приобретение навыков по привлечению компьютерных возможностей для решения технологических задач.

Во второй части (гл. 2) освещены как традиционные, так и новые достижения в развитии волочительных технологий на крупном заводе. В духе политехнических традиций технологические решения описываются с разъяснением сути процессов, с широким привлечением знаний из металлургии и других наук.

Третья часть (гл. 3) отражает некоторый опыт использования волочения как основной технологической операции при производстве на мини заводах мелкосерийных партий изделий из титана, ниобия, спецсплавов, а также других видов продукции.

Главы 1 и 2 написаны зав.кафедрой пластической обработки металлов СПбГПУ член-корреспондентом РАН, доктором технических наук профессором Рудским А. И. и кандидатом технических наук доцентом Луневым В.А. Последний параграф гл.3 написан также ими. Остальная часть гл. 3 написана кандидатом технических наук, начальником специализированного производства ОАО «ЦНИИМ» (Центральный научно-исследовательский институт материалов, г. Санкт-Петербург) Шаболдо О. П.

Авторы выражают благодарность аспиранту кафедры Мазурову С. А. за помощь в оформлении рукописи для печати.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

1.1. ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

1.1.1. Технологические схемы волочения

Самая простая схема волочения (рис. 1.1, *а*) характеризуется процессом протягивания через круглую волоку прутка круглой формы поперечного сечения. Исходный и конечный диаметры соответственно равны D_0 и D_1 . Волочение осуществляется в холодном состоянии. Так получают всю проволочку из стали диаметром менее 5,0 – 6,5 мм и из цветных металлов менее 8 – 12 мм. По такой же схеме производят калиброванный прокат – обычно круглые прутки точных размеров без поверхностной окалины, предназначенные для станков-автоматов и станков с программным управлением.

На рис. 1.1, *б* представлена схема волочения точных фасонных профилей некруглой формы поперечного сечения. Основное назначение операции волочения состоит в получении точных размеров готового изделия с чистой, свободной от окалины поверхностью определенной шероховатости.

Волочение осуществляется на волочильном стане с помощью захватного устройства, создающего требуемое тянущее усилие P . По сравнению с прокаткой и прессованием в горячем состоянии волочение является низкопроизводительным и дорогим процессом, поэтому оно применяется как заключительная чистовая технологическая операция. При производстве малотоннажных партий изделий, особенно при волочении специальных сплавов, исходная заготовка может быть получена также холодной прокаткой, ротационной ковкой, точением и пр.

На рис. 1.1, *в – е* представлены различные схемы волочения труб. Наиболее дешевые крупные и все мелкие трубы тянут без внутренней оправки (рис. 1.1, *в*). Внутренняя поверхность таких труб может быть неровной, морщинистой. Точность по внутреннему диаметру трудно контролируется и может быть невысокой, в процессе волочения возможно неконтролируемое изменение толщины стенки трубы S .

Волочение на короткой закрепленной оправке (рис. 1.1, *г*) устраняет эти недостатки. Оно распространено для получения труб небольшой длины, ограниченной длиной стержня, удерживающего оправку в очаге деформации.

На плавающей оправке (рис. 1.1, *д*) можно получать более длинные трубы. Но положение такой оправки фиксируется только самим процессом и

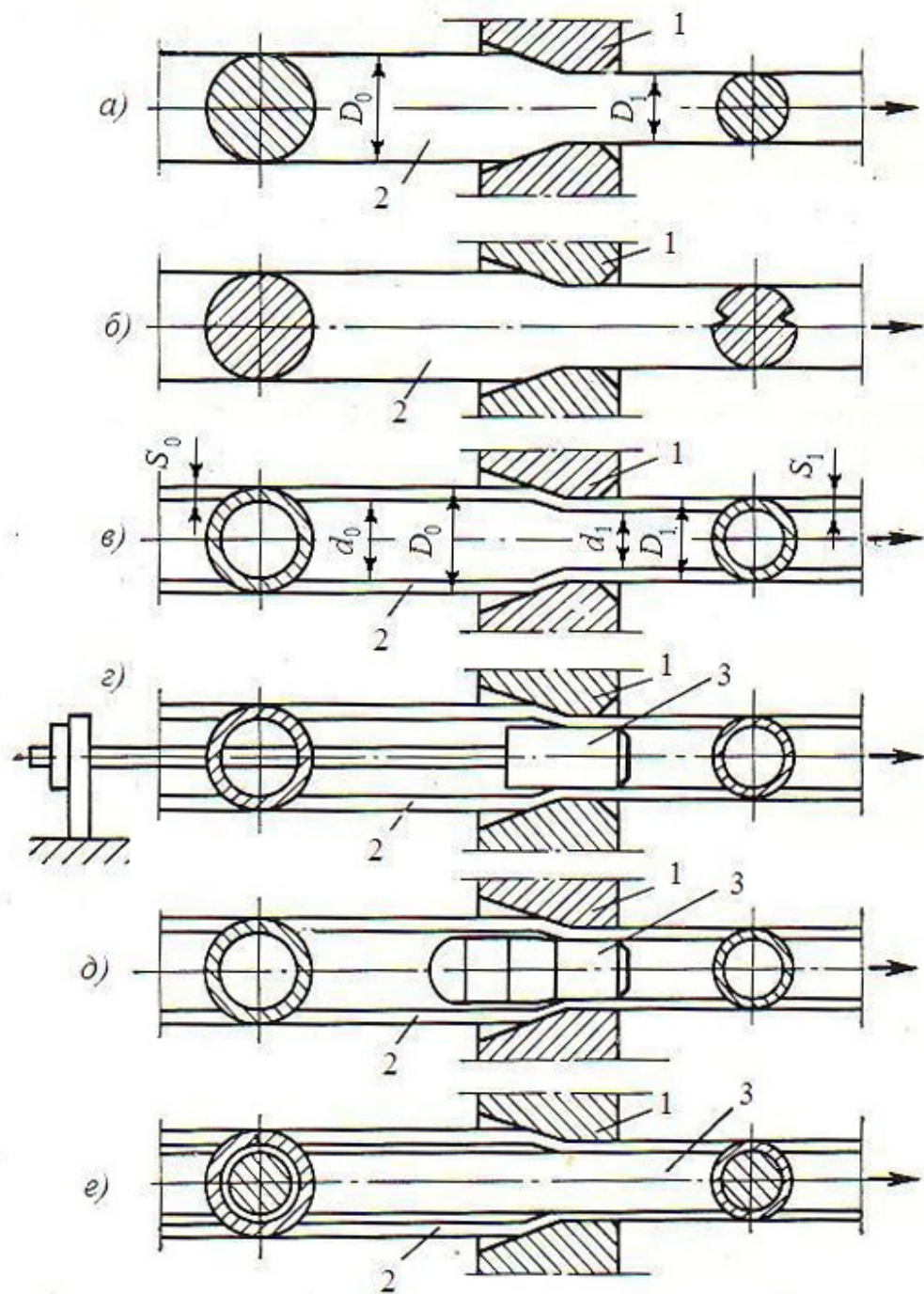


Рис 1.1 Основные схемы волочения сплошных прутков и труб: 1 - волока; 2 – пруток или труба; 3 – оправка

может быть неустойчивым в зависимости от условий волочения, поэтому по длине трубы возможны разные по толщине участки. Кроме того, как и в предыдущем случае, из-за трения на внутренней поверхности трубы появляются риски и царапины.

Наиболее точные по размерам трубы без внутренних дефектов получают на длинной оправке (рис. 1.1, e), которая длиннее готовой трубы. Оправка до начала волочения вставляется внутрь исходной гильзы и при во-

лочении движется вместе с металлом. Так получают дорогие, но самые качественные трубы. В этом случае требуется дополнительная технологическая операция по извлечению оправки из трубы, которая иногда становится сложной и дорогой, особенно на мелких и тонкостенных трубах.

1.1.2. Показатели деформации металла при волочении

Главной характеристикой деформации металла при волочении служит показатель вытяжки (или просто вытяжка).

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{F_0}{F_1},$$

При волочении сплошного круглого прутка диаметром D_1 из круглой заготовки диаметром D_0

$$\lambda = \frac{D_0^2}{D_1^2}.$$

Для круглой трубы (рис. 1.1, в) очевидны соотношения

$$\lambda = \frac{D_0^2 - d_0^2}{D_1^2 - d_1^2} = \frac{D_0^2 - (D_0 - S_0)^2}{D_1^2 - (D_1 - S_1)^2},$$

где D_0, d_0, S_0 и D_1, d_1, S_1 соответственно наружный и внутренний диаметры и толщина стенки трубы до и после волочения.

Применяется также интегральный показатель вытяжки

$$e = \ln \lambda.$$

Для характеристики деформации круглых прутков и труб применяются также следующие показатели:

относительное изменение диаметра δ и относительное обжатие ε

$$\delta = \frac{D_0}{D_1} = \sqrt{\lambda}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{D_0 - D_1}{D_0} = 1 - \frac{1}{\delta}.$$

Две наиболее важные характеристики деформации сплошного круглого прутка связаны соотношением:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{\sqrt{\lambda}}.$$

Часто относительное обжатие ε выражают в % (то есть $\varepsilon \cdot 100\%$).

При волочении трубы используется показатель относительного изменения толщины стенки

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0}$$

Обычно волочение осуществляют в несколько пропусков, поэтому различают единичные, полученные за одну операцию, и суммарные показатели деформации, полученные за все пропуски. В последнем случае будем приписывать к индексам показателей значок Σ . Очевидно, единичные и суммарные показатели вытяжки и относительного изменения диаметра связаны между собой соотношениями:

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{D_0^2}{D_n^2} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdots \lambda_n \text{ и}$$

$$\delta_{\Sigma} = \frac{D_0}{D_n} = \frac{D_0}{D_1} \cdot \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{D_2}{D_3} \cdots \frac{D_{n-1}}{D_n} = \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3 \cdots \delta_n,$$

где n – количество пропусков.

Но суммарное относительное обжатие ε_{Σ} нельзя получить путем перемножения (или суммирования) единичных обжатий ε_i . Для круглых прутков накопленное относительное обжатие за n пропусков следует отсчитывать от начального диаметра D_0 :

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{D_0 - D_n}{D_0}.$$

Например, при расчете предела текучести металла σ_T при волочении за несколько переходов необходимо пользоваться суммарным обжатием:

$$\sigma_T = \sigma_0 (1 + \varepsilon_{\Sigma}^n), \quad (1)$$

где σ_0 и σ_T – пределы текучести металла до и после волочения и n – коэффициент наклепа.

1.1.3. Характер течения металла при волочении круглых прутков

По характеру течения металла различаются схемы волочения сплошных профилей круглого, прямоугольного и сложного поперечного сечения. Наиболее проста для анализа деформация круглой заготовки в круглой монолитной волоке (рис. 1.2) с внутренним каналом, имеющим:

- конусную входную часть, где на участке l_1 производится основная деформация;
- калибрующий участок длиной l_2 , окончательно формирующий размеры и качество поверхности готового прутка;
- выходной участок l_3 , предотвращающий механические повреждения кромки калибрующего участка.

По исследованию деформации в такой волоке накоплен обширный материал. Для этого чаще всего используется метод координатной сетки. По искажению каждой ячейки сетки при течении металла вычисляются все компоненты тензора деформации в этой ячейке (относительные удлинения e_x, e_y, e_z и сдвиги $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$), а также интенсивность деформации e_i . На

основании анализа этих величин установлено, что деформация при волочении протекает неравномерно [1].

Различаются геометрический и фактический очаги деформации. Границами геометрического очага служат вертикальные сечения входа и выхода металла из волоки. Но пластическая деформация начинается до входа в волоку и заканчивается на некотором расстоянии после сечения выхода, поэтому зона пластической деформации, включающая геометрический очаг и внеконтактные пластические зоны, является фактическим очагом. Зона внеконтактной пластической деформации до сечения входа называется задней, соответственно, такая же зона после сечения выхода будет называться передней. Границы внеконтактных пластических зон экспериментально и теоретически определить трудно. Протяженность их при обычном волочении мала и редко превышает 5 %, однако при большом противонапряжении и повышенных углах волоки, больших обжатиях и коэффициентах трения может составлять на входе до 50 %, а на выходе (при отсутствии калибрующего участка) более 50 % длины геометрического очага деформации.

Наблюдаются следующие закономерности:

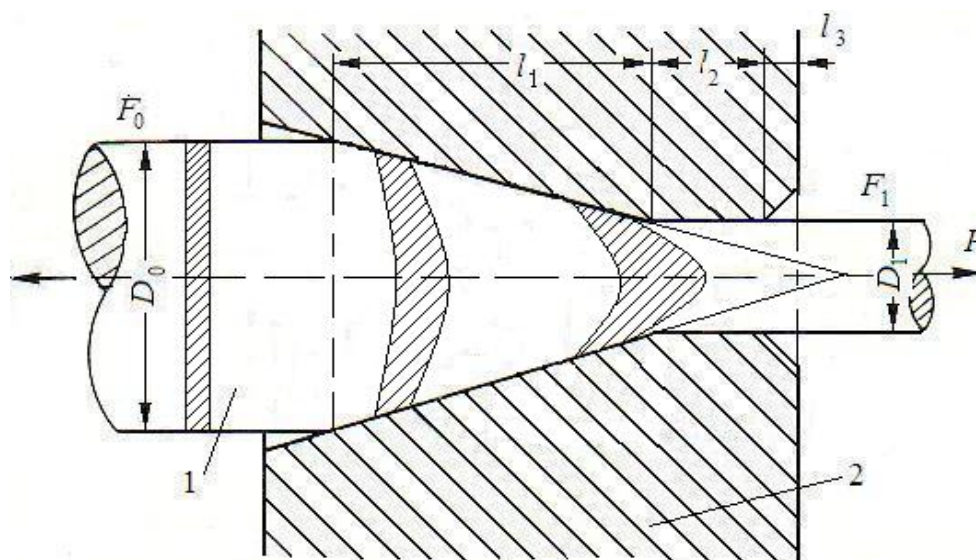


Рис. 1.2. Схема деформации металла при волочения сплошного круглого прутка в круглой волоке. 1 – пруток; 2 – волока.

1. Центральные слои металла опережают периферийные. Если до деформации выделить в металле вертикальную плоскость, то уже до сечения входа она начнет искривляться куполом по направлению волочения. В границах геометрического очага деформации из-за трения на контакте поверхностные слои затормаживаются, и разность в скорости течения этих и внутренних слоев увеличивается. Выделенная плоскость при движении по каналу волоки искривляется все больше.

2. В задней зоне внеконтактной пластической деформации диаметр прутка должен уменьшаться за счет того, что поверхностные слои принудительно дополнительно вытягиваются за счет взаимодействия с внутренними слоями, имеющими большую вытяжку. Однако при больших углах конусного участка волокни и больших единичных обжатиях в этой зоне диаметр исходного прутка может увеличиваться. Это объясняется тем, что при больших обжатиях возрастают силы контактного трения, поэтому поверхностные слои металла затормаживаются и образуют наплывы перед сечением входа в волоку. В общем случае в сечении входа в волоку диаметр проволоки не равен начальному диаметру D_0 и может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от условий волочения.
3. Анализ искажения ячеек координатной сетки показывает, что в зонах l_1 и l_2 осевые деформации и скорости деформаций возрастают от сечения входа до сечения выхода металла из волокни. Скорость осевого движения частиц металла возрастает от периферийных слоев к центральным. На калибрующем участке деформации и скорости деформации постепенно выравниваются как по длине, так и по сечению прутка, но общий характер деформации сохраняется таким же, как и в конусной части. В задней зоне внеконтактной деформации, происходит постепенное затухание осевых пластических деформаций. Эта зона обычно короткая, поэтому часто считают, что деформации переходят в упругие сразу после сечения выхода из калибрующего участка.
4. Наибольшая интенсивность деформации формируется в конусной части волокни на участке l_1 . Интенсивность деформации и ее неравномерность возрастают в осевом направлении, а в радиальном направлении она более равномерна и убывает от периферийных слоев к центральным. На калибрующем участке интенсивность деформации уменьшается, и при реально принимаемых длинах участка l_2 интенсивность деформации почти выравнивается. За сечением выхода металла из калибрующего участка волокни в передней внеконтактной зоне интенсивность деформации быстро падает. Можно считать, что в сечении выхода металла из калибрующего участка интенсивность деформаций близка к нулю.
5. Первоначально прямые углы ячеек координатной сетки при деформации изменяются, что свидетельствует о наличии сдвиговых деформаций во всех зонах и слоях металла. Наибольшие сдвиги наблюдаются в приконтактных слоях, а в осевой зоне прутка они почти равны нулю. Величина сдвиговых деформаций во всех слоях возрастает с увеличением угла волокни α и обжатия. Сдвиги возрастают также при увеличении коэффициента трения, на который существенное влияние оказы-

вают чистота обработки поверхности канала волокна и протягиваемого профиля, а также качество смазки.

6. Если одну и ту же суммарную деформацию получать за несколько пропусков, то с ростом дробности деформации (с увеличением количества пропусков и снижением частной деформации в каждом из них) неравномерность деформации металла увеличивается; возрастают значения сдвигов; разница в свойствах периферийных и центральных слоев металла увеличивается.
7. Периферийные слои металла деформируются под действием радиальных, окружных и осевых напряжений σ_l , σ_r и σ_θ при наличии значительных сдвиговых напряжений τ . Оси координат этих напряжений не совпадают с осями 1, 2, 3 главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 , действующих на те же объемы. (Как известно, в главных направлениях сдвиговые деформации отсутствуют). Главные оси элементарных объемов располагается под некоторым углом к осям координат l , r , θ , одна из которых – ось волочения. Главные оси в процессе деформации поворачиваются, приближаясь к направлению осей координат. При движении к центральным слоям угол между ними уменьшается, и на оси волочения направления главных нормальных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 совпадают с направлением осей координат.

В направлении главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 (а не в направлении осей координат) формируется текстура металла, то есть преимущественная направленность кристаллографических плоскостей. С текстурой связана анизотропия свойств металла по разным направлениям.

8. В осевой зоне зерна металла деформируется главным образом под действием осевых растягивающих напряжений почти при полном отсутствии окружных, радиальных и сдвиговых напряжений. При этом зерна вытягиваются в направлении оси волочения, создавая анизотропию свойств металла, то есть разницу в свойствах вдоль и поперек направления волочения. Анизотропия свойств металла в осевой зоне выше, чем в периферийных слоях.

1.1.4. Напряжения при волочении круглых прутков

Если внутри геометрического очага деформации выделить элементарный кубик (рис. 1.3), то видно, что на него действуют

осевые растягивающие напряжения σ_l ;

сжимающие радиальные напряжения σ_r ;

сжимающие тангенциальные напряжения σ_θ , направленные перпендикулярно радиусам;

касательные напряжения τ , действующие по граням элементарного кубика.

Для облегчения теоретического анализа напряженно-деформированного состояния металла обычно фактическую картину значительно упрощают: сдвиговыми напряжениями пренебрегают, радиальное σ_r (в полярных координатах) и продольное σ_l напряжения считают главными, первое из которых минимально, а второе максимально, в этом случае тангенциальные напряжения σ_θ в анализе не участвуют.

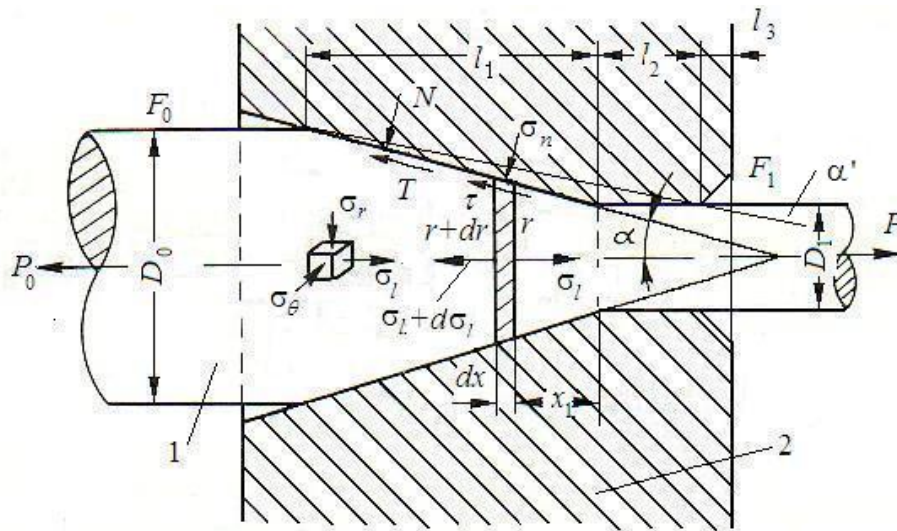


Рис.1. 3. Напряжения при волочении

На участке l_1 напряжение σ_r сжимающее, а σ_l – растягивающее. Эти напряжения в каждой точке очага деформации связаны между собой условием пластического течения, которое запишем в виде условия Треска:

$$|\sigma_l| - |\sigma_r| = \beta \sigma_T, \quad (2)$$

где β – коэффициент Лодэ, который изменяется от 1,0 до 1, 155, условно можно принять его равным 1,0; σ_T – предел текучести металла при волочении (его принимают равным пределу текучести при растяжении), который увеличивается по длине очага деформации из-за наклепа по закону (1). (волочение проводится в холодном состоянии).

Часто в расчетах предел текучести при волочении принимают величиной постоянной по всему очагу деформации и равной среднему значению

$$\sigma_{T\text{ ср}} = 0,5(\sigma_{T0} + \sigma_{T1}),$$

где σ_{T0} и σ_{T1} – пределы текучести до и после волочения.

С учетом знака напряжений равенство (2) можно записать в виде:

$$\sigma_l + \sigma_r = \sigma_{T\text{ ср}} = \text{const} \quad (3)$$

Отсюда следует, что все технологические факторы, увеличивающие значение одного из напряжений, приводят к снижению другого.

На рис.1.4 показан характер изменения напряжений σ_l и σ_r в канале волоки. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования

показали, что радиальные напряжения σ_r всегда сжимающие (знак «-»). Они возрастают в задней внеконтактной зоне до сечения входа металла в волоку, затем в очаге деформации непрерывно снижаются и в передней внеконтактной зоне (включая калибрующий участок волоки) полностью затухают.

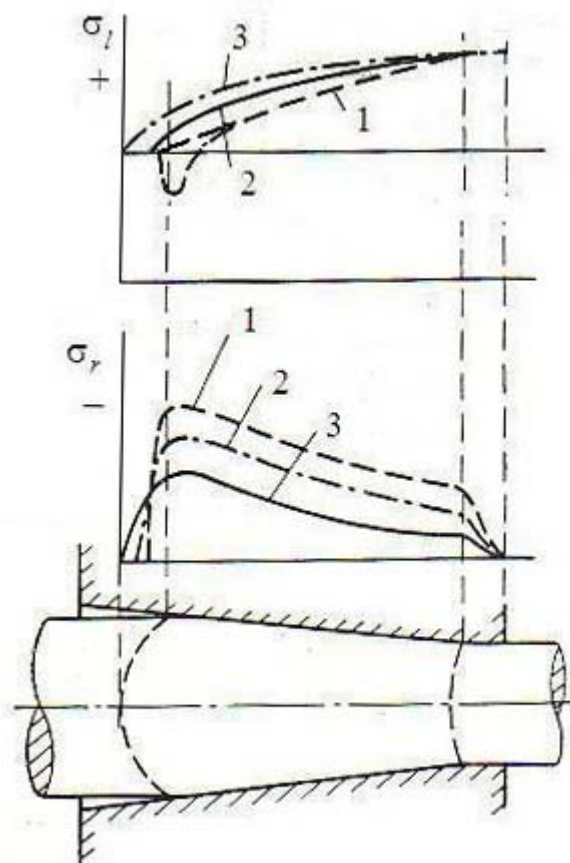


Рис.1.4. Продольные σ_l и радиальные σ_r напряжения при волочении: 1 — на поверхности; 2 — в среднем слое; 3 — в центре; «+» — растяжение; «-» — сжатие.

Максимальные радиальные напряжения наблюдаются в сечении входа, и это определяет наибольший износ волоки в этом сечении. В плоскости выхода металла из конусной части волоки наблюдается небольшой локальный максимум, поэтому в общем виде эпюра напряжений σ_r имеет седлообразный вид с наличием максимумов на входе и выходе. По направлению от поверхности контакта к центру прутка радиальные напряжения снижаются. В.Л. Колмогоров теоретически и экспериментально показал, что максимальные радиальные напряжения в поверхностной точке сечения входа металла в волоку могут на 5–40 % превышать предел теку-

чести металла. Очевидно, важны все мероприятия, снижающие значения максимума радиальных напряжений в этой точке.

Продольные напряжения σ_l являются растягивающими (знак +). Лишь на небольшом участке вблизи сечения входа поверхностные продольные напряжения могут быть сжимающими и только при больших углах волоки и больших единичных обжатиях. Напряжения σ_l возрастают в передней внеконтактной зоне, затем продолжают расти в конусной и калибрующей частях волоки. На выходе из последней они достигают своего максимального значения, равного напряжению волочения σ_1 , которое должно быть приложено к тянущему устройству волочильного стана. По всей длине

очага деформации продольные напряжения σ_l снижаются по направлению от центральных слоев к периферийным. Максимальные продольные напряжения наблюдаются в центральных слоях в сечении выхода металла из конусной части волокна. В сечении выхода продольные напряжения по сечению прутка выравниваются и становятся равными напряжению волочения σ_1 : $\sigma_l = \sigma_1$. Сила волочения

$$P = \sigma_1 F_1.$$

Напряжение σ_1 на выходе из волокна не должно превышать значения выходного предела текучести металла $\sigma_{Т1}$, иначе металл разорвется между волоком и тянущим устройством. Отношение

$$\gamma = \frac{\sigma_{Т1}}{\sigma_1}$$

называется коэффициентом запаса. Чем выше его значение, тем меньше опасность разрыва прутка при волочении. На практике придерживаются следующих значений коэффициента запаса γ :

прутки и толстостенные трубы	1,35 – 1,4,
тонкостенные трубы	1,6,
проволока 1 мм и выше	1,4,
" 1,0 – 0,4	1,5,
" 0,4 – 0,1	1,6,
" 0,1 – 0,05	1,8,
" 0,05 – 0,015	2,0.

Растягивающие напряжения в центральных слоях металла опасны не только потому, что приводят к обрыву прутка при волочении. Внутри прутка могут образоваться внутренние каверны, которые опасны тем, что не видны и могут раскрыться уже в готовом изделии.

1.1.5. Влияние различных факторов на напряжения при волочении

Все технологические факторы, повышающие коэффициент запаса, то есть снижающие напряжение волочения σ_1 , уменьшают опасность обрыва металла при волочении.

Полезно за счет введения смазки в очаг деформации снижать силы трения T (контактные напряжения τ) (см. рис. 1.3). При этом снижаются выходные продольные напряжения σ_l и сила волочения P . Все мероприятия, снижающие коэффициент трения μ в очаге деформации, снижают опасность обрыва проволоки.

Следует заметить, что в теории волочения, как и в целом в теории ОМД, прослеживается некоторое непонимание смысла коэффициента трения μ . В общем виде связь между касательными τ и нормальными контактными напряжениями σ_n (см. рис. 1.3) выражается кривой, представ-

ленной на рис. 1.5. Как физическая величина коэффициент трения призван характеризовать состояние трущихся поверхностей, и эту роль он выполняет лишь на первой части кривой, где справедлив закон Кулона:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_n}. \quad (4)$$

При больших нормальных напряжениях σ_n , которые характерны для большинства процессов обработки металлов давлением, контактные силы трения τ стремятся к постоянному предельному значению $\tau = \sigma_T/2$.

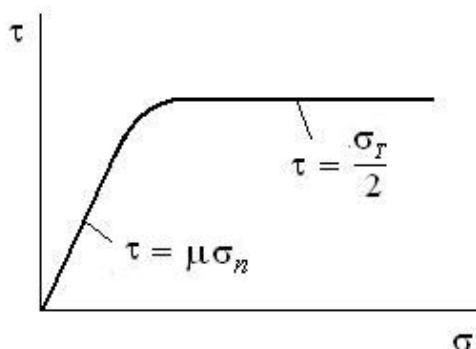


Рис. 1.5. Экспериментальная зависимость касательных напряжений от нормальных на поверхности контакта трущихся тел

В этом случае отношение (4) не является коэффициентом трения, оно становится величиной условной. Такой коэффициент трения называется кажущимся. Он начинает зависеть от нормального давления σ_n и еще ряда факторов и отражает не только состояние трущихся поверхностей, но и влияние технологических параметров волочения на сам процесс. Коэффициент трения не постоянен по длине очага деформации, характер его изменения зависит не только от качества канала волокна и типа смазки, но и от

условий деформации. Одни авторы наблюдали увеличение, другие падение коэффициента трения от сечения входа к выходу. С увеличением обжатия кажущийся коэффициент трения снижается. С ростом нормального давления σ_n он падает. По мнению Грудева А. П., для анализа процессов обработки металлов давлением лучше пользоваться не коэффициентом трения, а напряжением трения τ .

Ряд теоретических и экспериментальных работ посвящен поиску оптимальных форм рабочего участка волокна. В качестве критериев оптимизации выступали сила волочения, расход энергии, степень неравномерности деформации, равномерность износа волокна и пр. Поэтому у разных авторов оптимальные профили различны. Установлено, что конический профиль волокна по многим критериям не оптимален.

Меньшую силу волочения при прочих равных условиях обеспечивает комбинированный профиль (волокна Ю.С.Зыкова), когда рабочая зона волокна состоит из первого конического l_1 и второго переходного l_2 участков (рис. 1.6, а). Переходный участок плавно по радиусу переходит в калибрующий участок l_3 . При больших деформациях это позволяет уменьшить градиент изменения напряжений и обеспечить более равномерную дефор-

мацию, чем в конической волоке. При этом сила волочения снижается и общий износ волокни уменьшается.

Если на комбинированной волоке коническая часть рабочей зоны отсутствует, то получается радиальная волока (рис. 1.6, б), которая может применяться как при больших, так и малых обжатиях. В такой волоке деформации плавно изменяются по всему очагу деформации, что при малых обжатиях обеспечивает малый и равномерный износ канала волокни. Но при повышенных единичных обжатиях в сечении входа радиальные напряжения могут быть большими, что способствует повышенному износу волокни в наиболее опасном входном сечении. С позиций равномерности износа по длине волокни профиль рабочего участка должен быть вогнутым – рис. 1.6, в (волока В.В.Зверева) или сигмоидальным – рис. 1.6, г. Однако такие волокни трудны в изготовлении и практического применения не получили. Наиболее применимы в промышленности волокни с коническим рабочим участком или комбинированные волокни с малым переходным участком l_2 .

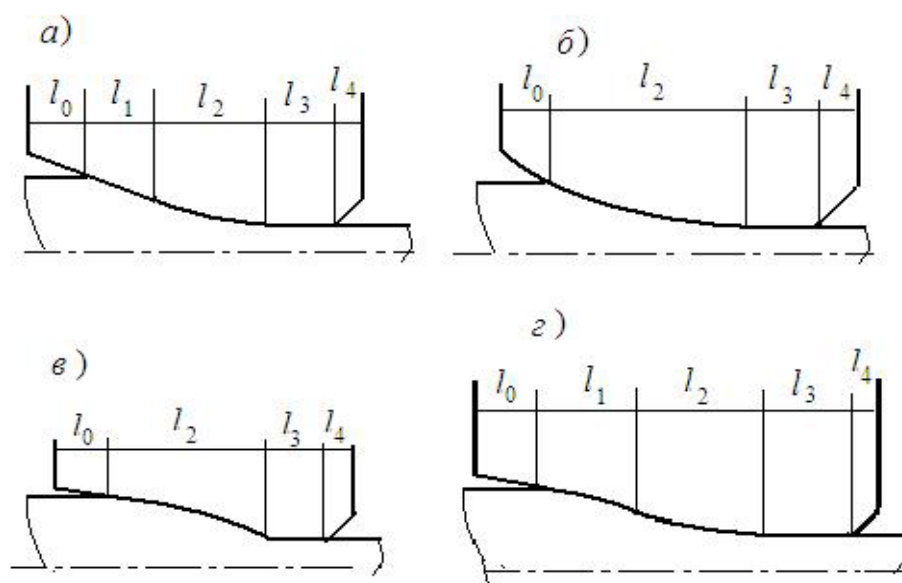


Рис. 1.6. Формы каналов волокон: а) – комбинированная; б) – радиальная; в) – выпуклая; г) – сигмоидальная; участки: l_0 – заходной; l_1 и l_2 – рабочие; l_3 – калибрующий; l_4 – выходной.

Большое влияние на характер напряженного состояния оказывает противонатяжение. Если к заднему концу прутка приложена растягивающая сила противонатяжения P_0 или напряжение противонатяжения $\sigma_0 = P_0/F_0$ (см. рис. 1.3), то продольные напряжения σ_l повышаются, а напряжения σ_r снижаются по всей длине очага деформации (рис. 1.7). Важно, что наибольшее снижение радиальных напряжений σ_r происходит в сечении входа металла в волоку, что способствует уменьшению ее износа. Ради этого и

применяют противонатяжение. По длине рабочей части волокна градиент падения радиальных напряжений снижается, и износ волокна по длине выравнивается.

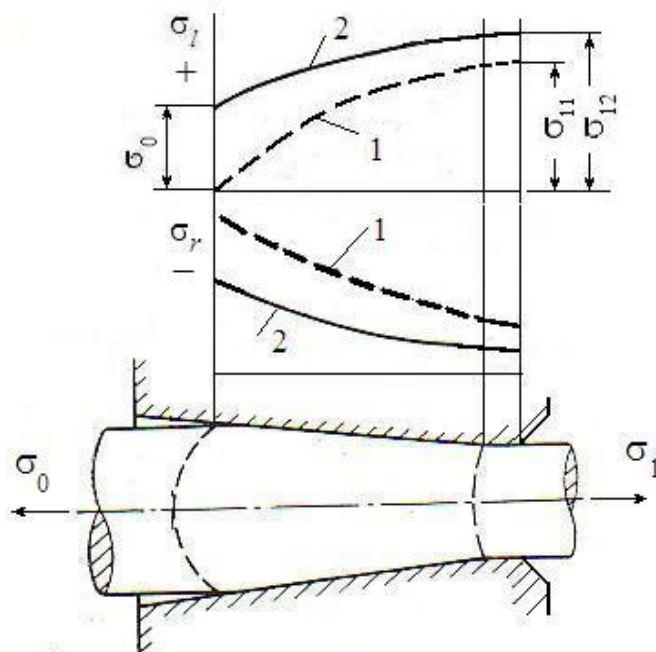


Рис. 1.7. Влияние противонатяжения на радиальные и продольные напряжения:
1 – при отсутствии, 2 – при наличии противонатяжения

При наличии противонатяжения продольные напряжения растяжения σ_l по длине канала волокна возрастают, причем в сечении входа – на значение σ_0 , а в сечении выхода – от некоторого значения σ_{11} до σ_{12} . Отсюда следует, что при наличии противонатяжения на выходе из волокна напряжение σ_1 и сила волочения P_1 увеличиваются, опасность обрыва прутка возрастает, коэффициент запаса уменьшается. Таким образом, противонатяжение полезно с позиций износа канала волокна, но вредно из-за повышенной опасности обрыва металла, то есть из-за снижения коэффициента запаса γ .

Калибрующий участок, с одной стороны, полезен, так как снижает разницу в напряжении волочения в средних и контактных слоях. С другой стороны, чем длиннее этот участок, тем больше в нем сила трения, тем выше напряжение волочения σ_1 , из-за чего опасность обрыва прутка увеличивается.

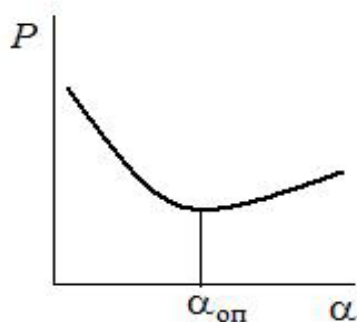


Рис. 1.8. Зависимость силы волочения от угла волокна

Сила волочения зависит от угла α конусного участка (в конической волоке). Обращаем внимание на то, что угол α измеряется между образующей канала волокна и осью прутка (см. рис. 1.3). С увеличением угла сокращается длина рабочей конусной части l_1 , уменьшаются суммарные силы трения T , поэтому сила волочения уменьшается. Но при больших углах α растет неравномерность деформации, и сила волочения увеличивается (рис. 1.8). Существуют оптимальные углы $\alpha_{оп}$, обеспечивающие

минимальное усилие волочения (при заданном обжатии).

Минимальная сила волочения увеличивается при увеличении вытяжки и коэффициента трения. Для определения $\alpha_{\text{оп}}$ (в рад) Зыковым Ю.С. предложена формула

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{оп}} = \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{4} \mu \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{\text{Т0}}}\right) \ln \lambda},$$

откуда следует, что с увеличением противонапряжения σ_0 значение оптимального угла снижается.

Обычно принимают при волочении сплошных прутков углы $\alpha_{\text{оп}} = 3 - 8^\circ$, при волочении труб $\alpha_{\text{оп}} = 10 - 15^\circ$. При волочении мелких профилазер-меров углы волоки уменьшаются.

1.1.6. Сила волочения

На участке l_1 конусной волоки (см. рис. 1.3) на расстоянии x от правой границы этого участка выделим элемент протяженностью dx . Пусть выполняется гипотеза плоских сечений, в соответствии с которой принимаются неизменными по радиусу напряжения σ_{lx} в любом сечении x , а сами сечения остаются всегда плоскими. На контактной площадке примем $\sigma_n = \sigma_r$, и пусть выполняется закон трения по Кулону:

$$\tau = \mu \sigma_n = \mu \sigma_r.$$

Спроектируем все силы, действующие на элемент, на ось x . По условию равновесия сумма проекций сил по всему очагу деформации равна нулю:

$$-(\sigma_l + d\sigma_l)\pi(r + dr)^2 + \sigma_l\pi r^2 - (\sigma_r \sin \alpha) \frac{dx \cdot 2\pi r}{\cos \alpha} - (\mu \sigma_r \cos \alpha) \frac{dx \cdot 2\pi r}{\cos \alpha} = 0$$

Учитывая равенство $dx = dr/\operatorname{tg} \alpha$, после исключения бесконечно малых высшего порядка получаем:

$$d\sigma_l r^2 + 2\sigma_l r dr + 2\sigma_r r dr + 2\mu \sigma_r r dr \cdot \operatorname{ctg} \alpha = 0.$$

Примем во внимание условие пластического течения (2), введем обозначение $\mu \operatorname{ctg} \mu = a$ и разделим переменные. Будем иметь

$$\frac{d\sigma_l}{\sigma_l - \sigma_{\text{Тсп}} \frac{a+1}{a}} = \frac{2adr}{r}$$

После интегрирования получим:

$$\ln \left[\sigma_l - \sigma_{\text{Тсп}} \frac{a+1}{a} \right] = 2a \ln r + \ln c.$$

Постоянная интегрирования c находится из граничного условия в сечении входа: при $r = r_0$ $\sigma_l = \sigma_0$ (σ_0 – напряжение противонапряжения).

Окончательно получаем формулу С. И. Губкина :

$$\sigma_l = \sigma_{\text{Тср}} \left(\frac{a+1}{a} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2a} \right] + \sigma_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2a}. \quad (5)$$

которая при умножении на площадь поперечного сечения на выходе F_1 дает силу волочения.

Для учета калибрующего участка волокна необходимо в формулу (5) подставлять приведенный угол α' , предложенный Перлиным Л.И.:

$$\text{tg } \alpha' = \frac{D_0 - D_1}{l_1 + l_2}.$$

На рис. 1.3 показано, что приведенный угол α' получается, если провести прямую линию через точки входа и выхода металла из калибрующего участка волокна.

Формула (5) не учитывает работу деформации во внеконтактных зонах (то есть напряжений среза в сечениях входа и выхода), поэтому дает заниженный результат. Зыков Ю.С. рекомендует формулу для расчета напряжения волочения с учетом этих зон:

$$\sigma_l = \sigma_{\text{Тср}} \left(\frac{a+1}{a} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2a} \right] + (\sigma_0 + \sigma_{01}) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2a} + \sigma_{11},$$

где напряжения среза σ_{01} и σ_{11} в задней и передней внеконтактных зонах соответственно определяются выражениями:

$$\sigma_{01} = \sigma_{T0} \frac{2}{3\sqrt{3}} \text{tg } \alpha \quad \text{и} \quad \sigma_{11} = \sigma_{T1} \frac{2}{3\sqrt{3}} \text{tg } \alpha.$$

На основе формулы (5) предложено несколько упрощенных формул для расчета усилия волочения P , которые хорошо зарекомендовали себя на практике. Например,

$$P = F_1 \ln \frac{F_0}{F_1} \left[\sigma_{\text{Тср}} + a(\sigma_{\text{Тср}} - \sigma_0) + \sigma_0 \right]. \quad (5a)$$

При волочении круглой проволоки используется формула Р. Б. Красильщикова:

$$P = 0,6 D_0^2 \sigma_v \sqrt{\frac{\lambda - 1}{\lambda}}, \quad (5б)$$

где σ_v – временное сопротивление металла проволоки, Н/мм².

Формулы (5, 5а и 5б) правильно отражают влияние основных технологических факторов на силу (или напряжение) волочения.

С увеличением длины калибрующего участка сила волочения P_1 растет и опасность обрыва прутка возрастает, так как увеличивается протяженность очага деформации и возрастают силы трения T . Но чем длиннее этот участок, тем полнее деформация выравнивается по сечению и тем больше

снижается радиальное напряжение σ_r , отчего износ волокни уменьшаются. На практике применяют волокни с длиной калибрующего участка в пределах $l_2 = (0,1-1,5)D_1$. Чем меньше диаметр проволоки, тем длиннее калибрующий участок, чтобы обеспечить необходимую точность и качество поверхности проволоки. На тонкой проволоке на калибрующий участок приходится наибольшая доля общей силы волочения. Особенно велика роль этого участка при малых обжатиях. Чтобы рассчитать силу волочения с учетом калибрующего участка, конусную часть волокни, как указывалось, распространяют на длину $(l_1 + l_2)$ (см. рис. 1.3), и в формулу (5) подставляют условный угол волокни α .

Из формулы (5), как и из опытов, следует, что существует оптимальный угол $\alpha = \alpha_{on}$, при котором сила волочения минимальна (см. рис. 8). Значение α_{on} по формуле Зыкова совпадает с приведенными ранее практически рекомендациями. Значение α_{on} зависит от коэффициента трения, свойств деформируемого металла, диаметра прутка, противонапряжения и других технологических факторов. Чем выше обжатия и коэффициент трения, тем больше α_{on} .

С увеличением единичного обжатия ε (или вытяжки λ) сила волочения, естественно, возрастает. Но при этом уменьшается неравномерность деформации по направлению от поверхности к центральным слоям прутка. Это способствует получению более равномерных свойств по сечению, снижается величина остаточных напряжений в металле после волочения. Обычно после волочения из-за неравномерности деформации поверхностных и центральных слоев на поверхности проволоки возникают растягивающие остаточные напряжения, а в центральных слоях они сжимающие. Поверхностные растягивающие напряжения очень опасны, так как снижают пластичность металла и могут быть причиной появления поверхностных трещин.

Существует предельное обжатие, при котором коэффициент запаса γ меньше рекомендованного значения, и происходит обрыв проволоки. Величина максимально допустимого единичного обжатия зависит от пластичности металла, структуры, предшествующего наклепа, остаточных напряжений и условий деформации (конструкции канала волокни, условий смазки, температуры и пр.) Для стальной среднеуглеродистой проволоки максимальное единичное обжатие может достигать 60 %. По мнению С. И. Губкина, существует также минимально допустимое обжатие, при котором происходит только поверхностная деформация без значительного проникновения ее в глубь сечения прутка. Неравномерность деформации очень высока, свойства металла по сечению различаются, остаточные напряжения после волочения велики. Минимально допустимое обжатие для обычных условий волочения низкоуглеродистой стали на уровне 4–5 %.

Для волочения выбирается оптимальное единичное обжатие $\varepsilon_{\text{опт}}$, при котором обеспечивается высокое сочетание основных показателей процесса: высокая производительность, минимальная обрывность, требуемые механические свойства, высокое качество поверхности проволоки и другие. Значение $\varepsilon_{\text{опт}}$ зависит от температуры разогрева проволоки при волочении и предела прочности металла $\sigma_{\text{в}}$. Для стальной углеродистой проволоки с сорбитной структурой рекомендуется эмпирическая формула Р. Б. Красильщикова:

$$\varepsilon_{\text{опт}} (\%) = 45000/\sigma_{\text{в}}, \text{ (здесь размерность } \sigma_{\text{в}} \text{ – МПа).}$$

При многократном волочении предельные обжатия за один проход уменьшаются из-за наклепа металла. Запас пластичности металла после каждого прохода снижается, и после некоторой суммарной деформации запас пластичности приближается к нулю. Необходим отжиг металла, чтобы восстановить исходную пластичность. При волочении обычных низкоуглеродистых сталей суммарные обжатия ε_{Σ} до очередного отжига не превышает 70–85 %. Значение ε_{Σ} зависит от многих факторов, в том числе от величины единичных обжатий: чем меньше единичные обжатия за один проход ε , тем больше суммарное обжатие ε_{Σ} , при котором производится отжиг металла. При получении проволоки заданных размеров, уменьшая единичные обжатия, число отжигов можно сократить. Но с уменьшением единичных обжатий при одном и том же суммарном обжатии неравномерность деформации по сечению прутка увеличивается, отчего возрастает неравномерность свойств по сечению и величина остаточных напряжений после волочения. При этом из-за роста числа пропусков снижается производительность процесса.

Волочение тонких и тончайших проволок – это очень длительный и дорогой процесс, сопровождаемый несколькими промежуточными отжигами. Медная проволока с малыми единичными обжатиями может быть протянута без отжига с суммарной вытяжкой $\lambda_{\Sigma} = 5000$. Это крайний случай. В другом крайнем случае при волочении высокоуглеродистой и легированной стали, наоборот, требуется отжиг почти после каждого пропуска.

Для малопластичных и труднодеформируемых сталей экономически выгоден процесс волочения в теплом состоянии, когда наклеп металла частично снимается за счет процессов возврата. При этом снижается сила волочения, можно увеличить единичную и суммарную вытяжки без опасности обрыва прутка. При производстве проволоки из вольфрама, молибдена и высоколегированных сталей теплое волочение в ряде случаев становится единственно реальным технологическим процессом получения готового изделия.

С другой стороны, горячее волочение металла, когда наклеп металла снимается полностью, невозможно. На выходе из волюки предел текучести

σ_{T1} и напряжение волочения σ_1 становятся равными, коэффициент запаса $\gamma = 1$, происходит обрыв металла. Ненаклепываемые металлы (например, свинец при комнатной температуре или сталь при температурах горячей деформации) волочить невозможно. С большими трудностями можно обеспечить процесс горячего волочения стали, если на выходе из волоки резко охлаждать металл, повышая тем самым значение σ_{T1} .

1.1.7. Трение и смазка при волочении

Характер деформации металла и сила волочения в значительной мере определяются условиями контактного трения. Сила трения и распределение ее по длине канала волоки зависят от сопротивления металла деформации, обжатия, противонапряжения, конструкции канала волоки и т. п. Но определяющим фактором является коэффициент трения μ . Выше отмечалось, что коэффициент трения при волочении, как и при других видах обработки металлов давлением, зависит не только от физических характеристик условий трения на контактной площадке, но и от напряжений нормального давления σ_n (см. рис. 1.2). Таким образом, в процессах обработки металлов давлением нельзя рассматривать коэффициент трения как чисто физическую характеристику условий трения. Однако в формировании значения коэффициента трения состояние трущихся поверхностей и физические свойства смазочного слоя играют решающую роль.

Физические условия трения во многом определяются качеством и количеством смазки между трущимися поверхностями. Различают сухое трение, когда между трущимися поверхностями отсутствует смазка. При наличии смазки толщиной в несколько молекул, но трущиеся поверхности имеют возможность при движении соприкоснуться друг с другом своими выступами, трение называется граничным. Это самый распространенный вид трения. Сила трения зависит как от качества смазки, так и чистоты (шероховатости) трущихся поверхностей. Если толщина смазочного слоя больше, чем высота неровностей трущихся поверхностей, то трение осуществляется внутри слоя смазки и полностью определяется свойствами смазочного слоя. Такое трение называется жидкостным. Следует заметить, что при высоких давлениях и температурах, встречающихся при волочении, свойства тонкого слоя смазки могут сильно отличаться от свойств такого же слоя при нормальных условиях. Слой смазки при высоких давлениях приобретает некоторые свойства кристаллического тела.

При волочении используют граничное и жидкостное трение. Жидкостное трение можно практически реализовать в сдвоенной секционной волоке (рис. 1.9). Первая (напорная) волока имеет внутренний диаметр калибрующего участка на 0,02–0,07 мм больше исходного диаметра проволоки D_0 . Соответственно, диаметр калибрующего участка второй волоки равен

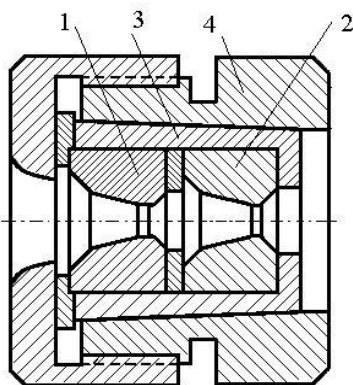


Рис. 1.9. Сдвоенная волока: 1 – напорная волока; 2 – рабочая волока; 3 – разрезная втулка; 4 – корпус.

диаметру готового прутка D_1 . При волочении в кольцевой зазор между напорной волокой и проволокой проходит смазка, которая накапливается в пространстве между первой и второй волоками. Давление в этом пространстве постепенно возрастает и в какой-то момент превышает значение радиального напряжения σ_r , возникающего при волочении во второй волоке. В этом случае смазка прорывается в канал второй волоки и разделяет трущиеся поверхности, образуя достаточно толстый слой для реализации жидкостного трения. В качестве смазки обычно выступает мыльный порошок,

который при уплотнении и частичном оплавлении в очаге деформации приобретает хорошие смазывающие свойства.

Естественно, при волочении в режиме жидкостного трения силы трения на контакте малы, и сила волочения минимальна. Стойкость волок увеличивается в 2–3 раза, появляется возможность увеличить единичные обжаты и суммарные обжаты до отжига. Однако образовавшийся слой смазки прорывается на переднюю сторону очага деформации, что отрицательно влияет на качество готовой проволоки. Во-первых, необходимы операции по удалению этой смазки. Во-вторых, слой смазки часто бывает неравномерным, поэтому фактический диаметр готовой проволоки после удаления смазки имеет разное значение по длине – проволока имеет продольную разнотолщинность. Современные сдвоенные волоки имеют клапаны, регулирующие давление смазки в пространстве между волоками, что позволяет выдержать толщину слоя смазки почти постоянной. Таким образом, при наличии регулировочного клапана разнотолщинность проволоки почти устраняется. В-третьих, под слоем смазки проволока имеет повышенную шероховатость и матовый вид. Заказчику чаще всего требуется проволока с зеркальной поверхностью, товарные качества матовой проволоки его не удовлетворяют. В основном, жидкостное трение применяется на предварительных операциях волочения.

На чистовых операциях применяется граничное трение. При этом за счет частичного срезания выступов поверхности проволоки выступами волоки шероховатость проволоки становится меньше, чем шероховатость канала волоки, проволока становится блестящей, товарные качества ее высоки. Показателем шероховатости поверхности служит средняя высота неровностей R_a , которая на готовой проволоке должна быть меньше 0,63

мкм, что соответствует зеркальной поверхности (11–13 классу чистоты по старому ГОСТу). Иногда в качестве показателя шероховатости применяется показатель R_z , характеризующий максимальную высоту неровностей. Показатели R_z и R_a связаны между собой соотношением $R_z \leq 4R_a$.

При граничном трении важную роль играет качество применяемой смазки. К смазке предъявляется много требований. Она должна быть нетоксичной, не разлагаться при хранении, быть достаточно дешевой и т. п. Но главные требования к ней связаны с поведением ее в процессе деформации. Смазка должна иметь хорошую адгезию к поверхности металла и не выдавливаться из очага деформации при волочении. Она не должна разлагаться при повышенных температурах, до которых разогревается проволока за счет деформационного тепла, и не реагировать с поверхностью волоки. Идеальной смазки, удовлетворяющей всем требованиям, нет.

При волочении крупных прутков из стали скорости невелики, но высоки радиальные напряжения σ_r , смазка легко выдавливается из очага деформации. Широко применяются густые вязкие активные смазки (типа солидола) с большим количеством наполнителей в виде присадок порошков графита, талька, дисульфида молибдена и других веществ, способствующих разделению трущихся поверхностей при высоких давлениях. Для этих же целей используются смазки, приготовленные из отходов мыловаренной промышленности. Такие смазки представляют собой соли жирных органических кислот, имеющих длинные молекулы, которые хорошо удерживаются в очаге деформации.

Для волочения стальной проволоки средних и больших размеров ($D_0 = 6,5\text{--}1,5$ мм) применяют смазку в виде мыльных порошков и мыльной стружки. Такая смазка называется сухой, хотя в процессе волочения сухая смазка ведет себя как жидкость (проявляет вязкие свойства и жидкотекучесть). Для удержания такой смазки на поверхности проволоки до начала волочения наносят подсмазочный слой. Этот слой, с одной стороны, должен прочно удерживаться на поверхности проволоки, а с другой – способствовать удержанию смазки при волочении. При смешивании с мыльной фракцией образуется общий слой смазки с улучшенными реологическими свойствами. При волочении с сухими смазками коэффициент трения находится в диапазоне 0,01–0,05 независимо от материала проволоки и волоки.

Тонкая стальная проволока протягивается с большими скоростями (до 2400 м/мин) и требует интенсивного охлаждения. Смазка должна также отводить тепло, выделяемое при волочении. Протягиваемая проволока и волоки погружаются в раствор жидкой смазки (обычно в мыльный раствор). Такой процесс называется мокрым волочением. При этом коэффициент трения стабилизируется на уровне 0,08–0,15. Стабильность смазки способствует получению точных размеров и надежности ведения процесса волочения (без обрывов). Мокрое волочение проходит всегда в условиях

граничного трения, что обеспечивает высокое качество поверхности проволоки. Следует обратить внимание на то, что при мокром волочении коэффициент трения сравнительно высок, поэтому ведутся непрерывные поиски более эффективных смазок.

Одним из способов уменьшения сил трения при волочении является придание виброколебаний волочильному инструменту. С помощью соответствующих источников, обычно пьезоэлектрических или магнитострикционных излучателей, к очагу деформации подводят поперечные, осевые или вращательные колебания звуковых или ультразвуковых частот. Конечно, волочение с применением виброколебаний усложняет процесс, однако коэффициент трения снижается существенно. В этом направлении поиски продолжаются.

Эффективно снижение коэффициента трения за счет увеличения твердости внутренней поверхности волок. При волочении средних и тонких размеров прутков (проволоки) применяют волокна, изготовленные порошковыми методами из твердых сплавов ВК-6 и ВК-8. Стальные волокна часто напыляют твердыми сплавами. При тончайшем волочении применяют алмазные волокна. Все эти мероприятия не только способствуют снижению

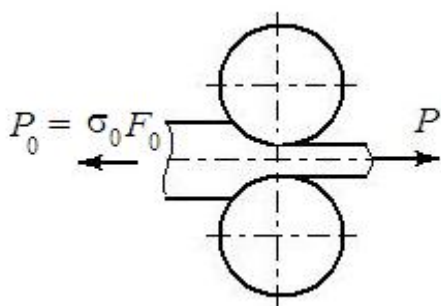


Рис. 1.10. Волочение в роликовой волоке

коэффициента трения при волочении, но и обеспечивают меньший износ канала волокна.

При производстве простых профилей в больших объемах и изготовлении точных фасонных профилей весьма эффективно волочение в роликовых волокнах (рис. 1.10). Два, три или четыре неприводных ролика образуют калибр требуемой формы, через который с помощью тянущего

усилия P протягивается изделие. Шейки роликов помещены в хорошо смазывающиеся подшипники, коэффициент трения в которых значительно ниже, чем на поверхности контакта при волочении через монолитную волоку. Сила волочения при этом значительно ниже, чем при волочении через цельные волокна. Опасность обрыва резко снижается.

1.1.8. Температурно-скоростные условия деформации

Теоретически скорость волочения в широком диапазоне ее изменения должна мало влиять на сопротивление металла деформации, поскольку процесс наклепа металла не зависит от скорости деформации, поэтому сила волочения не должна зависеть от скорости волочения. Но при волочении с большими скоростями могут значительно изменяться контактные

условия трения и температура металла, и зависимость силы волочения от скорости становится существенной, причем в большинстве случаев с ростом скорости сила волочения увеличивается. Однако, механическая работа, затрачиваемая на преодоления сопротивления деформации и внешних сил трения, почти полностью переходит в тепло, отчего разогреваются инструмент и металл. С увеличением скорости растет температура металла, поэтому сила волочения может падать. Опыты показали, что средняя температура, то есть температура средних слоев металла при волочении углеродистой проволоки почти не зависит от ее диаметра. При высоких скоростях средняя температура повышается до 250–350 °С. При этих температурах могут протекать процессы старения металла (выделение дисперсных частиц по границам зерен), отчего снижаются пластические свойства металла и повышается его прочность, увеличивается износ волок и возрастает сила волочения.

Поверхностные слои металла разогреваются до более высоких температур, при которых смазка может окисляться, что также влияет на условия деформации. В течение кратких промежутков времени температура поверхности может достигать 700 °С и выше, при которых начинают протекать процессы аустенизации металла, и при быстром охлаждении образуется поверхностный слой со структурой мартенсита. На канатной, кордной и других видах высокопрочной высокоуглеродистой проволоки хрупкие участки мартенсита недопустимы, так как приводят к местной концентрации напряжений и выкрошиванию металла. На проволоке с меньшим содержанием углерода такие участки также нежелательны, поскольку резко снижают ее усталостную прочность и могут привести к местному растрескиванию поверхности при эксплуатации изделий.

Таким образом, чрезмерный разогрев проволоки при волочении сдерживает скорость волочения и единичные обжатия. На современных высокоскоростных волочильных станах необходимо учитывать разогрев проволоки и строить маршрут волочения с учетом этого фактора. Экспериментально установлено, что в условиях граничного трения при волочении круглой проволоки на действующих волочильных станах средняя и поверхностная температуры металла могут быть определены по формулам Красильщикова:

$$\begin{aligned} t_{\text{cp}} &= t_0 + 0,45 \cdot 10^{-6} \sigma_{\varepsilon} \varepsilon, \\ t_{\text{п}} &= t_0 + 2,8 \cdot 10^{-6} \sigma_{\varepsilon} \sqrt[3]{dv\varepsilon}, \end{aligned} \quad (6)$$

где t_0 – начальная температура проволоки, v – скорость волочения, м/с и σ_{ε} – временное сопротивление металла на выходе из волоки, Н/мм².

Из формул (6) следует, что по условию разогрева проволоки единичные обжатия ε следует уменьшать по мере наклепа металла. Чем выше временное сопротивление, тем меньшие единичные обжатия. Скорость волочения

и диаметр проволоки не влияют на среднюю температуру металла. Это вызвано тем, что удельная работа деформации (работа, деленная на площадь поперечного сечения), определяющая температуру $t_{\text{ср}}$, слабо зависит от скорости волочения.

Скорость волочения существенно влияет на условия трения при волочении, что и определяет зависимость от нее поверхностной температуры металла $t_{\text{п}}$. По формуле (6) с повышением скорости температура металла возрастает. Действительно, работа сил трения в единицу времени растет. Но, с другой стороны, с повышением скорости смазка легче нагнетается в очаг деформации, меньше выжимается из него, поэтому коэффициент трения и силы трения должны снижаться. Особенно чувствителен к скорости процесс волочения в режиме жидкостного трения: чем выше скорость, тем больше смазки накапливается в пространстве между напорной и рабочей волоками и больше давление смазки в очаге деформации. Таким образом, чем выше скорость, тем легче достигаются условия жидкостного трения. Однако при очень высоких скоростях толщина слоя смазки между металлом и поверхностью рабочей волоки начинает снижаться. Это связано с тем, что при высоких скоростях количество захватываемой металлом смазки на единицу длины снижается. Кроме того, при повышении температуры поверхности металла вязкость смазки падает. Даже незначительные колебания скорости волочения заметно влияют на толщину слоя смазки в очаге деформации. Процесс волочения в режиме жидкостного трения протекает нестабильно. Особенно опасны высокие скорости волочения в начальный период, когда в очаге деформации еще нет смазки и температурное равновесие между металлом и волокой не установлено. Как правило, обрыв проволоки происходит в начале процесса волочения, особенно после длительных пауз.

Следует отметить, что при волочении, как и при других видах обработки давлением, различают понятия "скорость процесса (в данном случае волочения)" и "скорость деформации". Скорость волочения обычно измеряют в м/мин. Скорость деформации имеет размерность 1/с, она всегда определяется как изменение степени деформации в единицу времени:

$$\omega = \frac{d\varepsilon}{dt}, 1/\text{с},$$

По длине очага скорость деформации переменна, но ее можно усреднить:

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\varepsilon}{t},$$

где t – время прохождения металлом длины очага деформации.
В [2] предложена формула для волочения круглой проволоки:

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{6\nu\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\alpha}{(D_0 - D_1) \left(\frac{D_0^2}{D_1^2} + \frac{D_0}{D_1} + 1 \right)}.$$

Скорость деформации растет с увеличением обжатия ε , угла α и скорости волочения ν и с уменьшением размеров прутка D_0 .

В целом же при волочении при невысоких скоростях скорость деформации оказывает малое влияние на характер деформации металла, поскольку при волочении в холодном состоянии процессы разупрочнения металла практически не протекают.

1.2. ВОЛОЧЕНИЕ ПРУТКОВ НЕКРУГЛОЙ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

1.2.1. Деформация фасонных профилей

При волочении некруглых профилей важно обеспечить такие условия деформации, при которых исключаются искривление и скручивание прутка на выходе из волоки. Очевидно, для этого на поверхности контакта металла и волоки суммы сил и моментов должны быть равны нулю.

При волочении круглого прутка в круглой волоке (рис. 1.11, а) равенство нулю сил и моментов выполняются автоматически, если на контактной площадке условий трения одинаковы. Если посмотреть на очаг деформации с торца прутка, то увидим, что контуры прутка в сечении входа D_0 и выхода D_1 имеют общий центр окружностей в точке O . В плоскости поперечного сечения прутка металл течет по радиусам от контура D_0 до контура D_1 и далее в глубь сечения до точки O , поэтому радиусы являются линиями тока, устремляющимися к центральной точке O . Перпендикулярно линиям тока располагаются окружности – эквипотенциальные линии. В точках одной эквипотенциальной линии интенсивности деформаций равны.

Принятая терминология утвердилась в связи с тем, что линии тока и эквипотенциали аналогичны для всех плоских потенциальных полей различной физической природы – тепловых, электромагнитных, гидродинамических и т. п. В математической физике все потенциальные поля рассматриваются как единый класс задач, описываемых уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0,$$

где U – комплексная функция, описывающая линии тока и эквипотенциали. (В теории функций комплексного переменного эта функция состоит из действительной и мнимой частей, первая из которых описывает семейство

эквипотенциалей, а вторая – линий тока). Такая же картина наблюдается при распространении тепла в толстостенной трубе, имеющей диаметры наружный D_0 и внутренний D_1 и соответственно температуры поверхностей T_0 и T_1 . Эквипотенциали будут линиями равных температур. По тем же линиям тока и эквипотенциалам будет течь электрический ток в плоской электропроводной среде от контура D_0 к точке O , если на них подать потенциалы соответственно $\varphi = 1$ и $\varphi = 0$. Все промежуточные эквипотенциали имеют равные потенциалы в пределах $0 < \varphi < 1$. Среди них находится эквипотенциаль, соответствующая контуру готового профиля. Точка O также является эквипотенциалью (точнее, вырожденной эквипотенциалью или особой точкой). Таким образом, в разных разделах науки имеются однотипные задачи, к классу которых относится и картина течения металла при волочении. Все плоские потенциальные поля можно моделировать с помощью единой электрической модели. Существует прибор ЭГДА (электро-гидродинамическая аналогия), который позволяет моделировать все задачи этого класса.

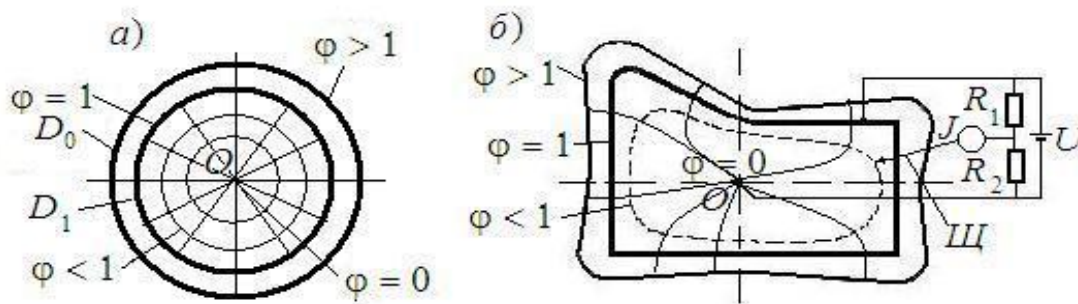


Рис. 1.11. Характер течения металла при волочении круглых (а) и прямоугольных (б) профилей

Теория плоских потенциальных полей применима не только для круглых, но и для профилей (контуров) с любой конфигурацией, все они отличаются только видом функции U . В теории функций комплексного переменного доказывается, что такая функция всегда существует, хотя найти ее не всегда просто. Доказано также, что функция U обязательно содержит особые точки, в которых ее нельзя использовать для описания процесса. Если функция U не содержит особых точек, то это постоянная величина. При волочении круглых профилей особой точкой является центр окружности O . При волочении профилей типа многоугольников важное значение имеют особые точки в углах многоугольного контура. Поскольку функцию U аналитически в общем виде записать невозможно, то ее моделируют с помощью прибора ЭГДА (во всех точках исследуемой области, кроме особых точек, в том числе угловых).

С этими ограничениями электро моделирование применимо для анализа течения металла в фасонных волокнах. Рассмотрим деформацию фасонного профиля "сапожок", контур которого соответствует потенциалу $\varphi = 1$ (рис. 1.11, б). Отметим, что контур готового профиля содержит угловые точки, в которых моделирование невозможно, в них контуры эквипотенциалей придется «дорисовывать». Центр тяжести профиля является центральной особой точкой и соответствует потенциалу $\varphi = 0$. Внутри контура с помощью прибора ЭГДА легко определяются эквипотенциали и линии тока. Моделирование осуществляем следующим образом. На электропроводной бумаге (с высоким электросопротивлением) рисуем электропроводной краской (с низким сопротивлением) контур готового профиля и подаем на него потенциал $\varphi = 1$, а в центр тяжести – потенциал $\varphi = 0$. Далее собираем мостиковую схему, как показано на рис 11, б, в которой сопротивления R_1 и R_2 задаются произвольно с помощью магазина сопротивлений, находящегося в приборе ЭГДА, а сопротивления R_3 и R_4 образует электропроводная бумага между искомым контуром и соответственно контурами $\varphi = 0$ и $\varphi = 1$. Искомый контур соответствует семейству точек, обеспечивающих нулевой ток в диагонали мостика ($J = 0$). Он находится с помощью щупа *Щ*. Меняя сопротивления R_1 и R_2 , будем поучать разные эквипотенциали в диапазоне $0 < \varphi < 1$. Все эквипотенциали, лежащие внутри контура $\varphi = 1$, принадлежат семейству одной функции U_1 .

Если нам требуется найти контур заготовки, лежащий вне контура $\varphi = 1$, то есть с потенциалом $\varphi > 1$, то среди полученных эквипотенциалей его не окажется. Контур заготовки будет эквипотенциалью уже другой аналитической функции U_2 . Заметим, что эта функция вблизи угловых точек контура также теряет свойства аналитичности, то есть в этих точках электро моделирование становится также неприменимым.

Новая функция U_2 является сопряженной с функцией U_1 , и может быть определена через нее. Мы не имеем аналитического описания этих функций, поэтому необходимо смоделировать обе функции на установке ЭГДА.

Эквипотенциали функции U_2 расходятся от контура профиля до бесконечности. В бесконечности они становятся окружностями с радиусом $R = \infty$. Для электро моделирования функции U_2 необходимо подать потенциал $\varphi = 1$ на контур профиля, а потенциал $\varphi = \infty$ – на окружность бесконечного радиуса R (то есть достаточно большого радиуса).

Чтобы найти наружный контур $\varphi > 1$ как контур семейства первой аналитической функции U_1 , требуется осуществить операцию аналитического продолжения функции U_1 за пределы контура профиля $\varphi = 1$. Так как обжатия при волочении невелики, то можно применить упрощенную графическую методику аналитического продолжения функции U_1 . При этом не требуется математическое описание самой функции. Выберем любую из близко расположенных к контуру эквипотенциаль, соответствующую

функции U_1 . Она находится внутри контура профиля, но мы найдем соответствующую ей вне контура. Для этого потребуется "вывернуть" первую эквипотенциаль наизнанку, то есть точки внутренней эквипотенциали переместим на такое же расстояние за пределы контура по перпендикуляру к нему. Такая операция дает приближенное очертание искомой эквипотенциали, то есть контура искомой заготовки. Продемонстрируем эту методику для профиля "сапожок" (рис. 1.11,б) и для прямоугольного профиля (рис. 1.12, а). Этот прием, естественно, неприменим в угловых точках, и вблизи них приходится контур заготовки дорисовывать. При волочении из такой заготовки линии тока будут устремлены к центральной точке O , которая также относится к тому же семейству эквипотенциалей. Такую методику нахождения контура заготовки называют *центральной*.

К сожалению, описанная теория, хотя и выглядит красивой, имеет много недостатков. Во-первых, мы не учли силы трения на поверхности контакта, которые всегда неравномерны по периметру фасонного профиля. И пока не удастся ввести некоторую другую функцию U_F , с помощью которой можно описать эту неравномерность. Во-вторых, нахождение контура заготовки путем выворачивания внутреннего контура наизнанку дает весьма приближенный результат, особенно при наличии особых угловых точек на контуре профиля. В-третьих, переходы от контура к контуру по эквипотенциалам хотя и обеспечивают плавность переходов, минимум энергии, затрачиваемой на течение металла, но, скорее всего, не всегда обеспечивают равномерность деформации по периметру профиля. Особенно это заметно при волочении сложных и плоских (вытянутых вдоль одной оси) профилей и профилей с контуром, имеющим вогнутые участки.

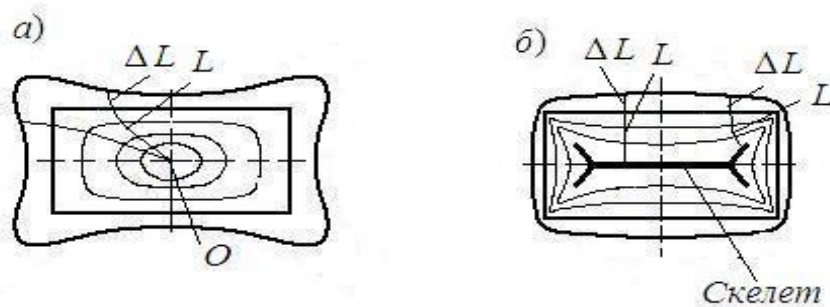


Рис. 1.12. Нахождение контура заготовки для волочения по центральной (а) и скелетной (б) методикам

Можно также организовать электромоделирование на основе функции U_2 . На электроустановке один потенциал $\varphi = 1$ подаем на контур заготовки, а другой $\varphi = \infty$ — на некоторую окружность очень большого радиуса. Все эквипотенциали окажутся вне контура заготовки, среди них будут также контуры профиля требуемой заготовки. При таком моделировании контур заготовки определяется однозначно. Если теперь контуры семей-

ству функции U_2 аналитически продолжить внутрь контура профиля, то придется "выворачивать" внешние эквипотенциали внутрь контура. Все внутренние «вывернутые» эквипотенциали будут принадлежать уже семейству функции U_2 . При деформации металла от контура заготовки до контура готового профиля, внутри контура $\varphi = 1$ будут реализовываться эквипотенциали этого же семейства как линии равных интенсивностей деформаций. С уменьшением значения потенциала φ внутренние эквипотенциали стягиваться к некоторому "скелету" (рис. 12, б). Скелет – это предельная эквипотенциаль $\varphi = 0$ семейства функции U_2 . Фактически реализуемые линии тока устремляются к ближайшим точкам скелета, а не к центральной точке. Методика нахождения профиля заготовки на основе функции U_2 называется *скелетной*.

Различие между центральной и скелетной методиками лучше всего проследить на прямоугольном профиле (рис. 1.12). Видно, что по центральной методике обжатие по большей стороне больше, чем по меньшей. При приближении к углам профиля обжатия резко возрастают. По скелетной методике обжатия распределены противоположным образом. С деформационных позиций обе методики и полученные профили заготовки оказались прямо противоположными. Какая же из методик лучше? Видимо, та, которая обеспечивает более равномерную деформацию по периметру профиля.

Проанализируем обе заготовки с этих позиций. Пусть длина произвольной линии тока от контура профиля до центральной точки (по центральной методике) или до скелета (по скелетной методике) равна L . Изменение ее длины от контура заготовки до контура профиля равно ΔL . Равномерной деформацией будем называть такую, при которой для всех линий тока по периметру профиля $\Delta L/L = \text{const}$. На заготовке, полученной по центральной методике, видно, что чем длиннее линия тока L , тем больше обжатие ΔL . Это примерно соответствует условию равномерности деформации $\Delta L/L = \text{const}$. По скелетной методике линии тока короче, в угловых точках длина их близка к нулю. По такой же закономерности изменяются изменения длин ΔL . Можно считать, что $\Delta L/L$ также примерно одинаково по периметру профиля. Таким образом, по обеим методикам примерно выполняется условие равномерности деформации. Более того, авторы одной и второй методики, доказывая свою правоту, экспериментально показали, что волочение в волоках, изготовленных по их методике, обеспечивает примерно равномерную деформацию по периметру профиля. Это наводит на мысль, что конфигурацией заготовки и линиями тока при волочении можно управлять, изменяя произвольно скелет профиля. В одном крайнем случае скелет представлен только одной центральной точкой O . В другом крайнем случае скелет представляет собой некоторую линию. Видимо, можно произвольно задавать любые скелеты, и в каждом случае

будет получаться своя форма контура заготовки, обеспечивающая условие равномерности деформации по периметру $\Delta L/L = \text{const}$.

В развитие этой идеи был предложен обобщенный метод, исключаящий саму операцию электромоделирования. Скелет профиля вычерчивается внутри контура заготовки произвольно, на основе опыта исследователя, а также на основе желаемого распределения линий тока внутри контура с учетом сил трения на контуре, и других условий. Меняя расположение и конфигурацию скелета, можно управлять течением металла при волочении, изменять направление линий тока и эквипотенциалей, при этом будем получать контуры заготовки разной конфигурации. Таким образом, мы сознательно выбираем контур заготовки под требуемый характер течения металла. В этом смысле, центральная и скелетная методики представляют собой крайние случаи обобщенной методики. Задав скелет в виде некоторой правдоподобной линии или семейства точек, затем примерно обозначив некоторые линии тока и измерив их длину L , мы находим из условия $\Delta L/L = \text{const}$ отдельные точки контура заготовки. По ним можно построить весь контур заготовки.

Обобщенную методику следует считать оптимальной, так как она позволяет подключить опыт и квалификацию расчетчика для поиска наилучшей конфигурации контура заготовки не только с позиций течения металла при волочении, но и по другим требованиям, которые не рассматривались с позиций функций комплексного переменного. Можно, например,

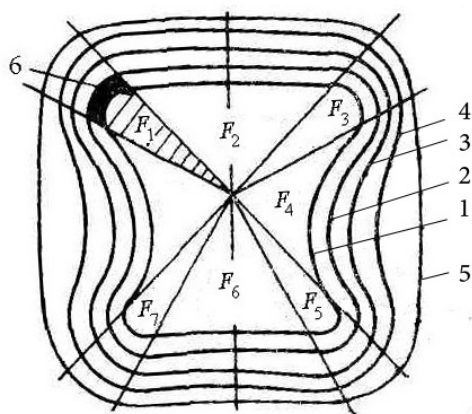


Рис.1.13. Калибровка фасонной проволоки

X-образного профиля по Хохрякову:

1 – готовый профиль; 5 – заготовка; 2-4 – промежуточные профили; 6 – обжатие элемента F_1

построить сначала контур заготовки по обобщенной методике, а затем скорректировать его с учетом фактического распределения сил трения по контуру, условий эксплуатации волоки, характера ее износа, удобства изготовления, требований по шероховатости и качеству поверхности готового профиля и т. д.

Необходимо отметить, что до разработки методов, основанных на электромоделировании, было разработано несколько других методов построения контура заготовки для волоче-

ния фасонного профиля, очень похожих на метод электромоделирования. Среди них можно отметить глазомерно-графический метод Зверева В. В., по которому на глаз намечают линии течения (от центральной точки), и

длину каждой из них увеличивают пропорционально ее длине. Метод Хохрякова Б. Д. основан на том, что площадь поперечного сечения готового профиля разбивают на несколько более простых площадей (рис. 1.13), и каждую из них увеличивают на заданный коэффициент вытяжки. Контуры каждой площади до и после волочения подобны. Существуют и другие методы, которые также можно рассматривать как некоторую разновидность описанного метода, основанного на электро моделировании.

1.2.2. Деформация прямоугольных профилей

При анализе деформации прямоугольной полосы выявлены особенности разных методов нахождения контура заготовки для волочения. Однако все они обеспечивают достаточно сложную конфигурацию контура заготовки и сложную для изготовления форму канала волокна. В связи с этим описанные центральный, скелетный и обобщенный методы конструирования канала волокна и контура заготовки для волочения прямоугольных профилей не применяются.

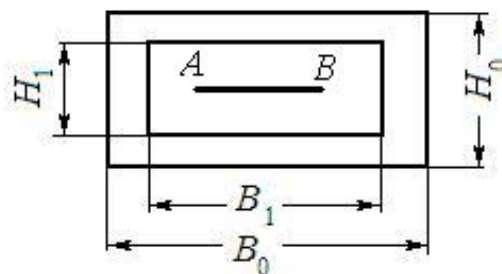


Рис. 1.14. Деформация прямоугольной полосы из прямоугольной заготовки, АВ — скелет

Разрабатываются другие методы построения профиля заготовки. Например, для прямоугольного профиля с размерами $H_1 \times B_1$ более естественной и удобной является заготовка с прямоугольным профилем поперечного сечения размерами $H_0 \times B_0$ (рис. 1.14). В работе [2] осуществлен анализ деформации металла при волочении прямоугольных профилей из прямоугольной заготовки.

Для характеристики деформации при волочении прямоугольных полос важны не только общие показатели λ и ε , но и показатели обжатия по каждой стороне:

- абсолютные обжатия $\Delta B = B_0 - B_1$ и $\Delta H = H_0 - H_1$ и
- их соотношение в виде показателя $a = \frac{\ln(B_0 / B_1)}{\ln(H_0 / H_1)}$.

Заметим, что при волочении, в отличие от прокатки, нет уширения, поэтому контур готового профиля $H_1 \times B_1$ целиком находится внутри контура заготовки $H_0 \times B_0$, и во всех точках контура ΔB и ΔH больше нуля.

Эффективность волочения прямоугольного профиля во многом определяется формой и размерами выбранной прямоугольной заготовки с размерами H_0 и B_0 . Заготовка, как и раньше, должна обеспечить наименьшую не-

равномерность деформации по сечению, наименьшую кривизну и скручивание полосы на выходе из волокна. Кроме того, заготовка должна обеспечить требуемую суммарную деформацию по сторонам ΔB и ΔH , чтобы получить необходимую шероховатость готового профиля (обычно добиваются зеркальной поверхности изделия с шероховатостью $R_a < 0,63$, для получения которой требуется 2-3 перехода).

Г. Прейслер считает, что при идеальном течении металла, при отсутствии трения на контакте деформация будет равномерной, а затраты энергии на волочения минимальными, если контуры прямоугольного профиля и заготовки подобны: $B_0/B_1 = H_0/H_1$, при этом отношение $a = 1$. Однако Зыков Ю.С. [2] теоретически и экспериментально показал, что подобные заготовки обеспечивают равномерность деформации только при волочении квадратных профилей, а для прямоугольных профилей оптимальное значение $a_{оп} < 1$. На практике удобно принимать $\Delta B = \Delta H$, но оптимальные значения $a_{оп}$ обеспечиваются при $\Delta B < \Delta H$. С учетом не только неравномерности деформации, но и неравномерности распределения трения по сторонам, стойкости волокон и качества поверхности профиля даже для квадратного профиля оптимальное значение должно быть ниже 1 ($a_{оп} < 1$). Если $a > a_{оп}$, то возрастает сила волочения, ухудшается качество поверхности профиля, увеличивается износ волокон.

Оптимальное значение $a_{оп}$ возрастает с увеличением вытяжки λ и резко снижается при возрастании отношения сторон B_1/H_1 . С увеличением отношения B_1/H_1 возрастает также опасность обрыва профиля. При отношениях сторон $B_1/H_1 > 4$ выбирают показатель $a_{оп} = 0$, что соответствует отсутствию обжатия по боковой стороне: $\Delta B = 0$. При наличии противонатяжения обжатие ΔB возрастает. Зыков Ю.С. рекомендует формулу для определения ΔB , соответствующего значению $a_{оп}$ (без учета противонатяжения):

$$\frac{\Delta B}{B_1} = \frac{4}{3} \left(\frac{\sqrt{\lambda} - 1}{3H_1/B_1 - 1} \right).$$

Как и при волочении круглых профилей существуют оптимальные углы волокна $\alpha_{оп}$, значения которых увеличиваются при возрастании λ и μ . С увеличением противонатяжения значение $\alpha_{оп}$ снижается. При увеличении отношения B_1/H_1 оптимальные углы $\alpha_{оп}$ увеличиваются, но интенсивность их роста ослабевает, и при $B_1/H_1 > 4$ оптимальные углы остаются постоянными.

Минимальное усилие волочения достигается тогда, когда металл по обоим сторонам одновременно входит в контакт с волоком, т. е. длины зоны контакта по обоим сторонам профиля равны: $l_B = l_H$. Однако на практике применяют также такие углы волокна, когда сторона B вступает в контакт позже, чем сторона H . При этом сила волочения немного возрастает, но

при переточке изношенных волок на больший размер обеспечиваются меньшие затраты.

Сила волочения при деформации прямоугольного профиля всегда выше, чем равновеликого по площади круглого профиля. Это связано как с большей поверхностью контакта, так и с большей неравномерностью деформации. С учетом этого в приведенные формулы для расчета силы волочения (5) необходимо вводить коэффициент формы профиля, который равен 1 для круглого профиля и всегда больше 1 для более сложных профилей. Для прямоугольных полос этот коэффициент зависит также от отношения сторон B_1/H_1 . Существуют также отдельные формулы для расчета силы волочения прямоугольных профилей.

1.2.3. Деформация металла в роликовой волоке

Процесс деформации металла в роликовых волоках (рис. 1.15) протекает легче и стабильнее, чем при прокатке на прокатном стане или волочении в монолитной волоке. Сила волочения P значительно меньше, деформация металла более равномерна, чем в монолитной волоке, отчего свойства металла равномернее. Можно регулировать настройку роликов до и в процессе волочения, что обеспечивает дополнительные преимущества роликовых волок.

Роликовые волокы широко используются при производстве прямоугольных, треугольных, шестигранных и других профилей, круглой и плющеной проволоки, шлицевых валов, деталей автомобиля и других изделий. Для примера, на рис. 1.15 показан процесс волочения треугольной полосы из круглой заготовки в трехроликовой волоке.

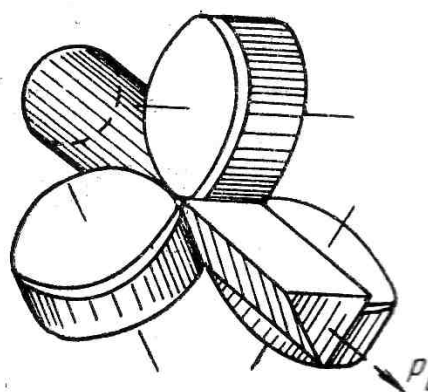


Рис. 1.15. Волочение треугольного профиля в роликовой волоке

Роликовые волокы могут содержать деформационный узел в виде роликовых, шариковых или дисковых конструкций.

Недостаток роликовых волок очевиден: жесткость их значительно ниже, чем у монолитных волок, поэтому точность готового профиля ниже. Как конструкция роликовая волока сложнее, поэтому ломается чаще, чем обычная волока. Настройка ее также значительно сложнее.

Деформацию металла в двухроликовых волоках (рис. 1.16) можно сравнивать с прокаткой силой Q в неприводных валках при наличии переднего натяжения P . В теории продольной прокатки рассматривался предельный случай прокатки, когда в очаге деформации отсутствует зона отстав-

ния, и весь металл движется со скоростью, превышающей окружную скорость валков. При волочении в роликовой волоке зона отставания также почти всегда полностью отсутствует. Но при волочении в роликовых волоках полоса по скорости опережает ролики больше, чем при прокатке.

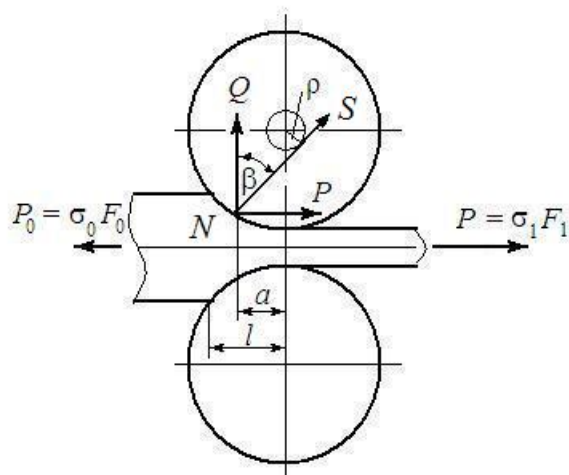


Рис. 1.16. Силы, действующие на ролики при волочении в роликовой волоке

Допустим, в обоих случаях деформируется прямоугольная полоса от размеров $h_0 \times b_0$ до $h_1 \times b_1$. При прокатке с увеличением силы переднего натяжения P сила прокатки Q снижается, зона опережения в очаге деформации увеличивается и зона отставания уменьшается.

При волочении в роликовой волоке привод роликов отсутствует. Волочение осуществляется только за счет энергии силы P . В очаге деформации реализуются две силы: нормальная сила Q , приложенная в

некоторой точке N , расположенной на расстоянии плеча a от оси валков, и сила трения T , направленная горизонтально. равнодействующая этих сил S должна проходить через центр валка, так как суммарный момент этих сил должен был быть равным нулю. Однако в подшипнике валка будет действовать сила трения $T_{тр} = \mu_{ш} S$, где $\mu_{ш}$ – коэффициент трения в подшипниках.

На преодоление этой силы требуется увеличить тянущую силу P на величину ΔP . Общая сила волочения будет равна сумме $P + \Delta P$. Момент добавочной силы – силы трения в подшипниках – равен

$$M_{до} = \dot{Q}_{до} \cdot \frac{D_{до}}{2} = S \cdot \mu_{ш} \cdot \frac{D_{до}}{2} = S \cdot \rho.$$

Такой момент реализуется в том случае, когда равнодействующая S условно проходит по касательной к окружности радиусом ρ . Эта окружность называется окружностью трения а ее радиус ρ – радиусом трения, который равен:

$$\rho = \mu_{ш} \cdot D_{до} / 2,$$

где $D_{ш}$ – внутренний диаметр подшипников (или диаметр шейки роликов).

С другой стороны, добавочная сила образует момент

$$M_{доб} = \Delta P \cdot D / 2,$$

где D – диаметр ролика.

Приравняв $M_{доб}$ и $M_{тр}$, находим добавочную силу:

$$\Delta P = 2S \cdot \rho / D.$$

В связи с тем, что угол трения β между силой Q и равнодействующей S всегда мал, можно записать также:

$$\dot{I}_{\text{дд}} = Q \cdot \rho.$$

Более точно сила Q связана с силой R геометрическими соотношениями:

$$Q = S \cdot \cos \beta, \quad \beta = \arcsin \frac{2(a + \rho)}{D},$$

Тяговая сила P (с учетом добавки ΔP) и сила Q , действующая на ролики волоки, также взаимно уравновешены, то есть сумма моментов и проекции сил на ось равны нулю. По любому из этих условий можно найти одну из сил, если вторая известна. Например, для 2-роликовой волоки сумма проекций сил на ось волочения дает:

$$P/2 = Q \cdot \operatorname{tg} \beta = Q \frac{a + \rho}{R},$$

откуда

$$Q = P \cdot \frac{R}{2(a + \rho)}.$$

Получен результат, отличный от прокатки с передним натяжением: если при прокатке с ростом силы натяжения P сила прокатки Q падала, то при волочении в роликовой волоке с ростом одной вторая сила также возрастает.

Силы трения в подшипниках 2-роликовых волок всегда невелики, поэтому можно считать $\rho = 0$, тогда

$$Q = \frac{PR}{2a}$$

При волочении в многороликовой волоке, содержащей n роликов, это выражение превращается в формулу Шилкова В.Б., в которой также не учитываются силы трения в подшипниках:

$$Q = \frac{PR}{na}. \quad (7)$$

Приведенные формулы для расчета силовых параметров применимы также для волочения сложных профилей, если заготовку и готовый профиль заменить соответственными прямоугольными полосами.

При волочении в роликовых волоках (с любым количеством роликов) сила волочения может быть вычислена по формуле

$$P = k \sigma_{\text{т}} \ln \lambda \cdot F_1,$$

где $\ln \lambda$ – показатель вытяжки, F_1 – площадь поперечного сечения полосы на выходе из волоки, $\sigma_{\text{т}}$ – средний предел текучести металла, который усредняют по начальному и конечному значению: $\sigma_{\text{т}} = 0,5(\sigma_{\text{т}0} + \sigma_{\text{т}1})$.

Коэффициент k можно принять равным 1,3–1,4 для учета работы сил контактного трения и потерь, связанных с вращением роликов в подшипниках.

При волочении в роликовой волоке зона опережения всегда значительно более развита, чем зона отставания, поэтому коэффициент плеча приложения равнодействующей $\psi = a/l$ при одинаковых условиях при волочении больше, чем при прокатке. С ростом сопротивления вращению роликов волоки зона опережения будет возрастать. В предельном случае зона отставания полностью исчезает. При дальнейшем увеличении сопротивления вращению роликов прекращается, и процесс протекает как волочение через неподвижную волоку.

Экспериментально установлено, что такие параметры, как относительное обжатие, ширина полосы, коэффициенты контактного трения и трения в подшипниках не оказывают влияния на положение равнодействующей и значение плеча a , хотя, конечно, с ростом любого из этих параметров сила волочения P и сила прокатки Q возрастают. Но существенное влияние на положение равнодействующей оказывают степень упрочнения металла, жесткость роликов, противонапряжение и отношение D/h_0 , называемое относительным диаметром роликов. С ростом показателя упрочнения (наклепа) металла равнодействующая, как и при холодной прокатке, смещается к выходному сечению. При волочении мягкого металла на жестких роликах равнодействующая расположена почти посередине дуги контакта и $a = 0,5l$. При снижении жесткости валковой системы, увеличении твердости деформируемого металла и увеличении коэффициента наклепа металла n (в известной формуле для предела текучести $\sigma_T = \sigma_{T0} (1 + \varepsilon^n)$) сила Q увеличивается и перемещается к сечению выхода, коэффициент приложения равнодействующей $\psi = a/l$ уменьшается. С ростом относительного диаметра D/h_0 он также снижается, а сила волочения при этом возрастает.

Металл, из которого изготовлены ролики, также оказывает существенное влияние на положение точки приложения равнодействующей. При переходе от стальных углеродистых к легированным и высоколегированным роликам сила волочения падает (при волочении в одних условиях). На твердосплавных роликах она еще меньше, так как уменьшается упругое сплющивание роликов и меньше энергии расходуется на деформацию металла и роликов. Коэффициент плеча равнодействующей ψ растет, и точка приложения равнодействующей смещается в сторону сечения входа.

Интересно влияние на силовую картину противонапряжения P_0 . Как и при прокатке, при заднем натяжении положение точки приложения равнодействующих сил смещается в сторону выходного сечения, так, чтобы сохранялось равновесие очага деформации, при этом коэффициент ψ уменьшается. При прокатке заднее натяжение приводило к снижению давления металла на ролики и к снижению силы прокатки Q . Но при волочении в

роликовой волоке, как и при деформации в монолитной волоке, с ростом противонапряжения P_0 тянущая сила P возрастает и, в соответствии с формулой Шилкова (7), сила Q будет возрастать.

Рассмотрим характеристики деформации в роликовых волоках.

При одинаковой высотной деформации доля металла, устремляемая в длину, при волочении в роликовых волоках будет больше, чем при прокатке. В связи с этим, логарифмический показатель поперечной деформации

$$A = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{h_0}{h_1}},$$

то есть уширение, при волочении в роликовой волоке всегда меньше, чем при прокатке. Наибольшее влияние на величину поперечной деформации в роликовой волоке оказывают два параметра: напряжение противонапряжения σ_0 (точнее, отношение σ_0/σ_{T0} , где σ_{T0} – исходный предел текучести металла) и относительная ширина полосы b_0/h_0 . С ростом σ_0/σ_{T0} и b_0/h_0 показатель A снижается, причем значительно резче, чем при прокатке. При меньших, чем при прокатке, значениях указанных параметров уширение становится равным нулю ($A = 0$). При относительной ширине полосы $b_0/h_0 = 8-10$ поперечная деформация становится ничтожной. Еще большее влияние на уширение оказывает противонапряжение. Уже при $\sigma_0/\sigma_{T0} = 0,4$ волочение может протекать без уширения, и дальнейшее увеличение противонапряжения сопровождается утяжкой полосы по ширине. Показатель уширения A будет отрицательным. Такой эффект при прокатке недостижим даже при очень больших переднем и заднем натяжениях.

Указанные выше цифровые значения нельзя считать абсолютными, они сдвигаются в ту или иную сторону в зависимости от других технологических факторов. Опыты показывают, что в широком диапазоне изменения геометрических размеров полосы с увеличением обжатия $\varepsilon = \Delta h/h_0$ показатель уширения A снижается (знаменатель дроби растет быстрее, чем числитель). Но абсолютное уширение $\Delta b = b_1 - b_0$ с ростом обжатия возрастает. Напомним, что при прокатке такая зависимость наблюдается только на широких полосах (примерно $b_0 > l$, где l – длина дуги контакта), но на узких очагах деформации при прокатке показатель уширения A увеличивается с ростом обжатия.

Коэффициент трения влияет на уширение при волочении в роликовой волоке так же, как и при прокатке: с ростом коэффициента трения, на широких очагах уширение уменьшается, а на узких – увеличивается. С увеличением диаметра роликов D (лучше пользоваться отношением D/h_0) длина дуги контакта $l = \sqrt{0,5\Delta h \cdot D}$ возрастает, очаг деформации становится более узким и показатель уширения A увеличивается.

Большое практическое значение имеет волочение круглой полосы в гладких роликах (плющение). Уширение при плющении больше, чем при волочении прямоугольной полосы, так как внеконтактные объемы металла препятствуют продольному течению металла.

При волочении круглой заготовки на квадратную или прямоугольную полосу в роликовой волоке, содержащей четыре ролика, по периметру заготовки наблюдается высокая неравномерность деформации. В углах профиля происходит значительная утяжка металла. Поэтому невозможно получить из круга квадратный (или прямоугольный) профиль с острыми углами за один ход волочения. Увеличение диаметра исходной заготовки не дает желаемого результата, так как при этом увеличивается обжатие и тяговое усилие и, как следствие, растут растягивающие напряжения в очаге деформации, ведущие к дополнительной утяжке металла вблизи углов профиля. С ростом диаметра заготовки утяжка увеличивается. Диагональ полученного квадрата почти не зависит от размеров заготовки в широком интервале значений. Увеличение диаметра заготовки приводит только к увеличению энергозатрат и обрыву тягового конца профиля при волочении. В связи с этим целесообразно использовать заготовку минимального диаметра, но достаточного для получения заданной диагонали квадрата и острых углов за несколько переходов волочения.

При волочении квадрата через две четырехроликовые волокы, установленные последовательно, также невозможно получить профиль с острыми углами. В этом случае волочение во второй волоке протекает с большим противонапряжением, которое вызывает утяжку профиля. Если обе волокы установить раздельно, то, распределяя обжатия между ними, можно в больших пределах регулировать утяжку профиля. Казалось бы, при одновременном волочении через две волокы можно получить большую суммарную вытяжку, чем через одну, но из-за большой утяжки в углах такой режим волочения нецелесообразен и почти не применяется. Волочение через две волокы одновременно оправдано только тогда, когда требуется разгрузить подшипниковые узлы и за счет этого увеличить скорость процесса.

1.3. ВОЛОЧЕНИЕ ТРУБ

1.3.1. Волочение без оправки.

Волочением без оправки (рис. 1.17) получают трубы из углеродистых и легированных марок стали диаметром от 0,1 до 480 мм с толщиной стенки от

0,01 до 40 мм. Исходной заготовкой служат бесшовные и сварные трубы после операций обработки поверхности и подготовки структуры металла для волочения.

Отметим, что здесь приведены лишь наиболее существенные сведения по волочению круглых труб, схемы которых приведены на рис 1.1, поэто-

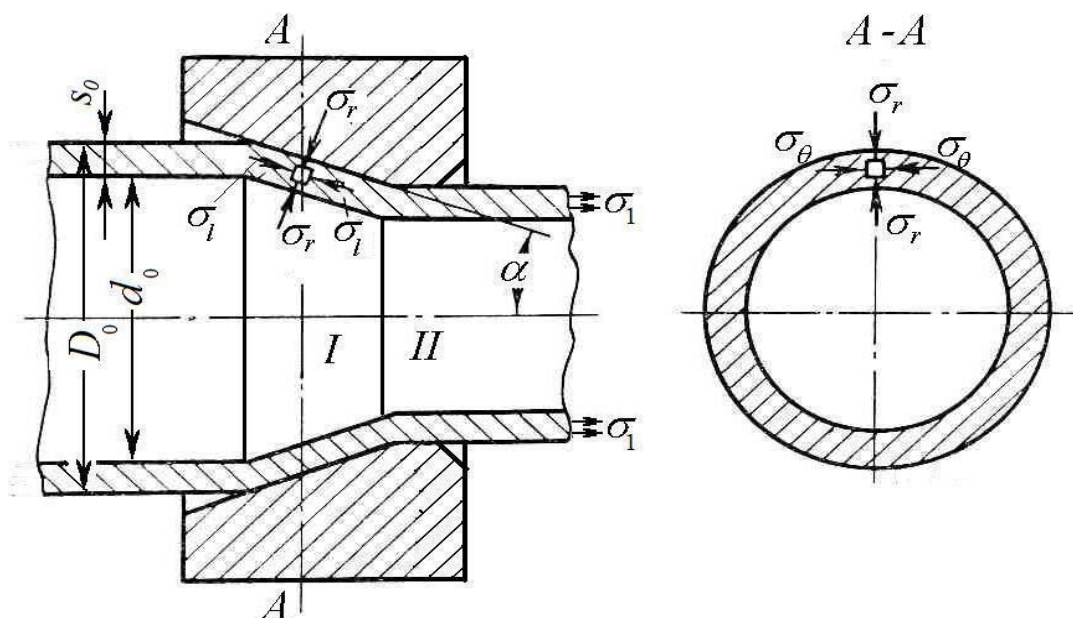


Рис. 1.17. Схема безоправочного волочения

му для более полного ознакомления с теоретическими и технологическими проблемами волочения труб необходимо обратиться к [1] и другим литературным источникам.

Волочение без оправки – самый простой способ получения труб точных размеров с высокой чистотой поверхности по наружному диаметру. К закованному концу исходной заготовки с наружным и внутренним диаметром соответственно D_0 и d_0 прикладывается тянущее усилие P (напряжения σ_l), обеспечивающее процесс. Видно, что при волочении происходит сначала осаживание трубы (участок I) и затем калибровка ее по наружному диаметру (участок II). Обжатия на последнем участке отсутствуют, поэтому наибольшее влияние на все параметры волочения оказывают условия деформации на участке I.

На этом участке на элементарный объем металла действуют сжимающие σ_r и σ_θ и растягивающие напряжения σ_l . Максимальные σ_l и минимальные σ_r из них определяют условие пластической деформации:

$$\sigma_l + \sigma_r = \beta \sigma_T,$$

где коэффициент Лодэ β можно принять равным 1. Отсюда следует, что с ростом одного из напряжений σ_l или σ_r другое убывает. По длине очага

деформации в направлении волочения осевое напряжение σ_l возрастает, а радиальное σ_r падает.

Так как наименьшее сопротивление течению будет в направлении радиуса, то в этом направлении потечет наибольшая доля металла при деформации. Толщина стенки трубы S будет увеличиваться. Однако растягивающие осевые напряжения σ_l вызывают удлинение трубы и, следовательно, ее утонение. Если утонение стенки больше, чем утолщение, то в целом труба будет утоняться. Такую трубу называют толстостенной. Наоборот, тонкостенные трубы при волочении увеличивают толщину стенки S .

Важным параметром, определяющим характер деформации трубы по толщине стенки, является отношение S/D_0 . Для промышленных труб это отношение находится в пределах от 0,01 до 0,3. Условно по этому параметру трубы разделяют на особо тонкостенные ($S/D_0 < 0,1$), которые наиболее интенсивно утолщают стенку, тонкостенные ($0,1 < S/D_0 < 0,2$) и толстостенные ($S/D_0 > 0,2$). Так как тонкостенные трубы при деформации увеличивают толщину стенки, то при этом сопротивление течению в радиальном направлении постепенно увеличивается и интенсивность утолщения стенки снижается. Аналогично, утонение стенки на толстостенных трубах снижает интенсивность утонения. При средних значениях отношения S/D_0 наблюдается эффект, когда в начальный момент волочения труба является толстостенной, поэтому толщина стенки ее снижается, но затем в процессе волочения она переходит в разряд тонкостенных и толщина стенки начинает возрастать. Точно так же первоначально тонкостенные трубы в процессе волочения могут переходить в разряд толстостенных. Лишь при больших отношениях S/D_0 утонение стенки происходит до конца волочения, и труба на протяжении всего процесса волочения останется толстостенной. Очевидно также, что с уменьшением отношения S/D_0 (то есть с увеличением диаметра трубы) сопротивление течению металла в радиальном направлении будет убывать, поэтому интенсивность утолщения тонкостенной трубы будет возрастать, и труба на протяжении всего процесса волочения будет оставаться тонкостенной. В [1] приведены формулы, позволяющие вычислить утонение или утолщение стенки при конкретных условиях волочения.

Основной недостаток процесса безоправочного волочения состоит в том, что внутренний диаметр готовой трубы не обрабатывается инструментом. Точность трубы по внутреннему диаметру не высока. Часто внутренняя поверхность становится морщинистой. Кроме того, при безоправочном волочении невозможны большие обжатия по наружному диаметру, так как из-за потери устойчивости трубы на поверхности появляются продольные складки. Волочение без оправки не обеспечивает получения точных труб с достаточно тонкой стенкой. Этих недостатков не имеют способы волочения труб с применением оправок.

1.3.2. Волочение на короткой закрепленной оправке

Перед волочением на короткой закрепленной оправке (рис. 1.18) заготовку смазывают по внутренней поверхности и насаживают на стержень, удерживающий оправку в очаге деформации. Далее стержень закрепляют, передний конец трубы помещают в захваты тянущего устройства волоочильного стана и осуществляют процесс волочения. Смазка (и подсмазочные слои) по наружному диаметру наносятся так же, как при волочении сплошных профилей. Одним из недостатков рассматриваемого способа волочения состоит в том, что длина заготовки не может быть длиннее стержня, поэтому длина готовой трубы также ограничена. Кроме того, велико количество ручных операций по насаживанию заготовки на стержень, закреплению его, заправке трубы в захваты тянущего устройства, а после волочения – освобождению стержня и снятию готовой трубы. Все это сдерживает производительность процесса и делает труд волочильщика монотонным.

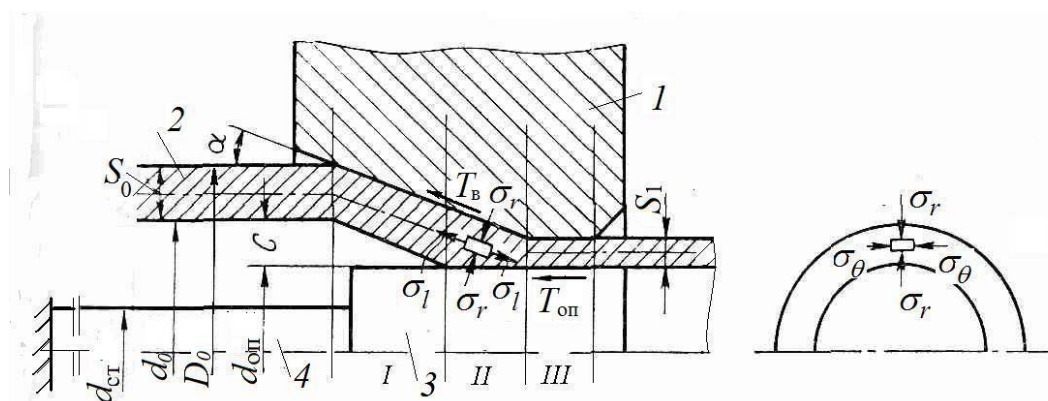


Рис. 1.18. Волочение трубы на короткой закрепленной оправке

Видно, что при волочении на короткой неподвижной (закрепленной) оправке деформационная зона состоит из трех участков – I, II и III. На первом осуществляется осаживание заготовки без оправки, поэтому закономерности деформации на этом участке ничем не отличаются от рассмотренных при безоправочном волочении. Второй участок является основным, на нем происходит уменьшение наружного диаметра D_0 и толщины стенки S . На этом участке действуют сжимающие напряжения σ_r и σ_θ и растягивающие σ_l . Силы трения между трубой и волоокой $T_в$ и на оправке $T_{оп}$ действуют в сторону, противоположную направлению волочения, что создает значительную силу волочения и увеличивают склонность металла к обрыву. На величину силы волочения оказывает влияние также степень утолщения трубы на первом участке осаживания. Утолщение ее не должно

быть большим, поэтому делают малым зазор C между внутренним диаметром d заготовки и диаметром оправки $d_{\text{оп}}$: $C = d - d_{\text{оп}}$. Необходимо так подбирать зазор C , чтобы внутренний диаметр трубы при волочении на участке I почти не изменялся.

На третьем участке пластическая деформация почти отсутствует, однако на преодоление сил трения расходуется энергия, поэтому напряжения волочения на этом участке также увеличиваются. В целом, при волочении на неподвижной оправке сила волочения значительно выше, чем при безоправочном волочении. В этом случае назначают меньшие единичные обжатия, чем при безоправочном волочении.

При волочении длинных труб небольшого диаметра волочение на короткой оправке становится затруднительным, так как при малом диаметре стержня $d_{\text{ст}}$ прочность его становится недостаточной, стержень может разорваться. Для таких труб применяется незакрепленная плавающая оправка.

1.3.3. Волочение на плавающей оправке

Плавающая оправка (рис. 1.19) состоит из трех участков. Первый из них имеет диаметр $d_{\text{опн}}$, превышающий внутренний диаметр готовой трубы на такую величину, чтобы

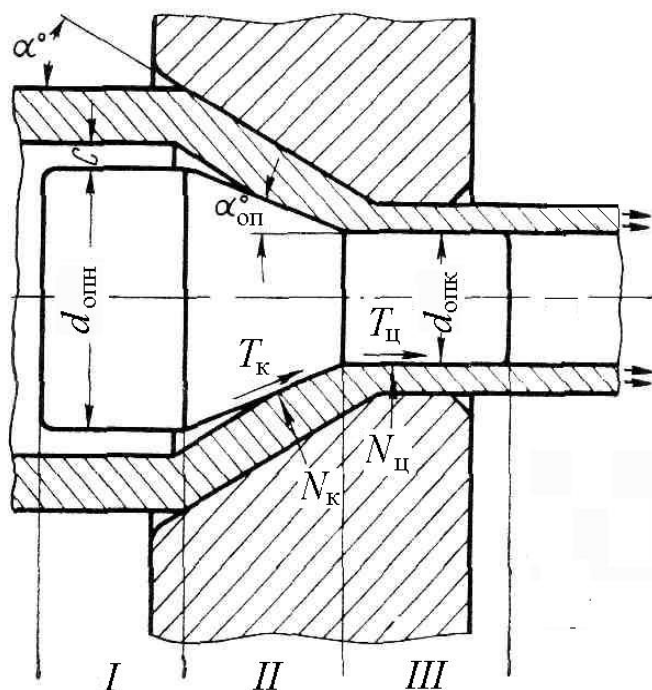


Рис. 1.19. Волочение на плавающей (самоустанавливающейся) оправке

оправка при волочении не могла пройти внутрь трубы. Участок II – конусный (рабочий), на котором осуществляется сначала осадка, а затем утонение стенки трубы. Как и при волочении на закрепленной оправке стремятся уменьшать зазор C между внутренним диаметром заготовки и диаметром оправки $d_{\text{опн}}$, чтобы на участке осадки не происходило большого утолщения трубы. На участке III труба калибруется, пластическая деформация на этом участке незначительна.

Плавающую оправку называют также самоустанавливающейся, так как положение ее внутри трубы устанавливается самопроизвольно. Оно определяется равенством нулю проекций всех сил, действующих на нее:

$$\Sigma N_k \sin \alpha_{\text{оп}} - \Sigma T_k \cos \alpha_{\text{оп}} - \Sigma T_{\text{ц}} = 0$$

В начале волочения оправку вставляют в трубу, далее положение ее устанавливается автоматически за счет действующих сил. Для правильного течения процесса волочения важно выбрать угол $\alpha_{\text{оп}}$ конусного участка. Необходимо соблюдать условие $\alpha_{\text{оп}} < \alpha$, в противном случае в начале волочения на оправке не будет достаточных сил, чтобы противодействовать сумме сил $T_{\text{ц}}$ и T_k , действующих в горизонтальном направлении. За счет этого оправка может продвинуться слишком далеко по ходу процесса и зажать трубу в канале волокна, произойдет обрыв трубы. Обычно выбирают угол α немного более 5° , а угол $\alpha_{\text{оп}}$ на 1° меньше угла α .

В процессе волочения на плавающей оправке неизбежны колебания всех сил, определяющих равновесное положение оправки. Причин может быть очень много: нестабильность условий трения, неоднородность свойств металла и т. д. В результате этого оправка в процессе волочения совершает некоторые возвратно-поступательные осевые перемещения. Это приводит к некоторой разнотолщинности готовой трубы, к нестабильности процесса и даже обрыву трубы. Стабильность процесса в значительной мере зависит от геометрии оправки, качества ее поверхности, условий ее смазки, и конечно, от параметров волочения металла.

Волочение на плавающей оправке позволяет производить трубы неограниченной длины, с намоткой готовой продукции на катушки или в бунты. Очень широко оно применяется для производства труб небольшого диаметра. Экспериментально установлено, что в большинстве случаев при одинаковых деформационных условиях силы волочения на самоустанавливающейся оправке меньше, чем на закрепленной оправке. Предложено несколько конструктивных разновидностей плавающих оправок, обеспечивающих более высокую стабильность процесса и меньшую силу волочения. При соответствующем подборе углов самоустанавливающейся оправки удастся значительно облегчить подачу смазки в очаг деформации и уменьшить силы трения. В связи с этим в реальных технологических процессах часто переходят от волочения на закрепленной оправке к волочению на самоустанавливающейся оправке.

Однако процессы волочения на закрепленной и плавающей оправках имеют общий недостаток: внутренняя поверхность трубы формируется в условиях движения ее относительно оправки. При этом возможны риски и задиры на этой поверхности, проконтролировать которые очень трудно.

1.3.4. Волочение на длинной подвижной оправке.

Отмеченного выше недостатка лишено волочение на длинной подвижной оправке (рис. 1.20). На длинной оправке получают наиболее точные и качественные по внутренней поверхности трубы, хотя по стоимости они наиболее дорогие. Перед волочением внутрь трубы-заготовки вводят стержень из твердой стали, длина которого больше длины готовой трубы. Далее волочение трубы со стержнем (оправкой) внутри осуществляется как сплошного прутка. Оправка при этом, естественно, пластически не деформируется. После волочения требуется дополнительная операция извлечения оправки из трубы, что увеличивает ее стоимость. При волочении сила P прикладывается одновременно к трубе и оправке, но на толстых трубах иногда захватывается только труба, и оправка движется за счет сил трения между оправкой и трубой.

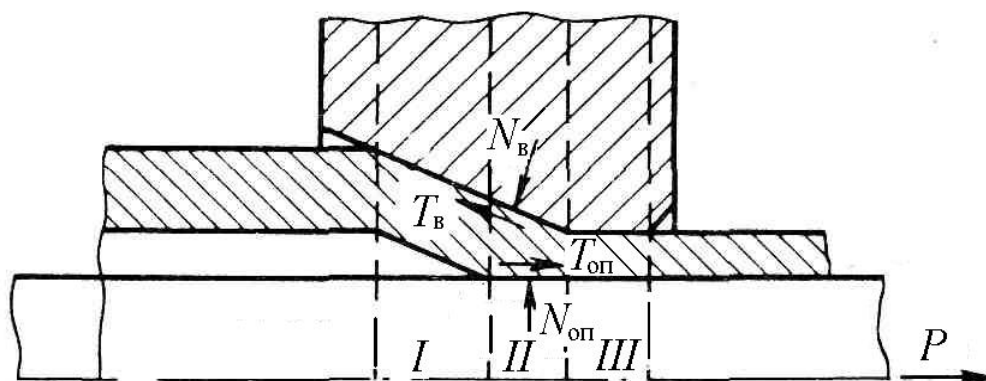


Рис. 1.20. Схема волочения на длинной подвижной оправке

Из схемы деформации трубы видно, что деформационная зона состоит из трех участков. На первом осуществляется также безоправочное обжатие, как и в рассмотренных выше случаях. Здесь так же происходит некоторое утолщение стенки трубы. На втором участке внутренний диаметр трубы остается постоянным и равным диаметру стержня (оправки). Наружный диаметр трубы имеет возможность изменяться значительно. Стенка трубы деформируется очень интенсивно. Труба при этом сильно удлиняется и скользит по оправке. Интенсивность скольжения максимальна в начале участка II, а к концу этого участка убывает практически до нуля. Естественно, чем больше вытяжка, тем больше величина скольжения металла по оправке. На участке III, деформация металла и скольжение его относительно оправки практически прекращаются. Экспериментально показано, что полезно поверхность оправки не смазывать и даже делать ее шероховатой. За счет повышенных сил трения на оправке скольжение ме-

талла уменьшается, качество внутренней поверхности готовой трубы улучшается.

Перемещение металла относительно оправки со скольжением определяет направление сил трения между ними. На схеме рис 1.20 видно, что между волокой и наружным диаметром трубы силы трения T_v , как всегда, направлены против, а на оправке $T_{оп}$ – по ходу волочения. В этом основное отличие процесса волочения на длинной оправке от волочения на неподвижной оправке (см. рис. 1.18). Чем больше $T_{оп}$, тем резче снижаются продольные растягивающие напряжения в металле, и можно дать более высокие деформации за переход, чем при волочении на закрепленной оправке. Опасность обрыва трубы практически отсутствует. Кроме того, на участках II и III металл находится в состоянии трехстороннего сжатия, пластичность его повышается, что дает возможность деформировать его без отжига с высокими суммарными обжатиями. Число переходов между отжигами значительно больше, чем при волочении на неподвижной оправке.

Г л а в а 2

ТЕХНОЛОГИЯ ВОЛОЧЕНИЯ НА КРУПНЫХ ЗАВОДАХ

2.1 ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ

2.1.1.Сортамент продукции, получаемой волочением

Основным видом продукции, получаемой волочением, является проволока разной формы поперечного сечения. Наиболее распространена круглая проволока. По ГОСТ 2333 – 57 производят круглую проволоку толстую $\varnothing 6,0 - 8,0$ мм, среднюю $\varnothing 1,6 - 6,0$ мм, тонкую $\varnothing 0,4 - 1,6$ мм, тончайшую $\varnothing 0,1 - 0,4$ мм и наитончайшую диаметром менее 0,1 мм. Минимальный диаметр проволоки равен 0,005 мм. В сортамент входит более 7000 типоразмеров стальной проволоки.

В общем выпуске наибольшую долю занимает проволока обыкновенного качества, изготавливаемая из низкоуглеродистых или низколегированных марок стали. Однако опережающими темпами развивается производство проволоки повышенной и высокой прочности с пределом прочности до 4000 кН/мм^2 и выше из высоко- и среднеуглеродистых марок стали. Повышаются требования к металлокорду, канатам, арматуре и другим ответственным изделиям, требующим высокопрочную проволоку. Интенсивно наращивается производство стальной проволоки с покрытием в виде цинка, алюминия, хрома, пластмасс и лаков. Все больше требуется стальной проволоки с медным покрытием, применяемой на сварочных автоматах.

Растет также потребность в проволоке из цветных металлов – алюминия, латуни, никеля, цинка и др. В данном разделе мы будем рассматривать только традиционную технологию производства стальной проволоки из углеродистых марок стали, так как по объему производства она значительно превышает проволоку из легированных сталей и цветных металлов.

Важным видом метизной продукции является холоднокалиброванный прокат (сокращенно, «калиброванный прокат»). Как известно на прокатных станах могут производить горячекалиброванный прокат, свойства которого отличны от рассматриваемого калиброванного проката. Эта технология не связана с волочением, поэтому ее рассматривать также не будем.

Основная доля калиброванного проката выпускается в виде круглых профилей диаметром от 8 – 10 до 250 мм. Так как волочение таких профилей осуществляется за 1 – 2 пропуска, то заготовкой для них служит круглый прокат несколько большего диаметра. Заготовка поступает в виде бунтов или прутков, полученных на сортовых станах горячей прокатки. Значительно реже заготовка производится горячим прессованием. Калиброванный прокат, в отличие от горячекатаного или горячепрессованного, не содержит на поверхности окалины и имеет точность по размерам в пределах $\pm 0,1$ мм. Точность горячекатаного сортового проката значительно ниже (например, для круга $\varnothing 30$ мм допуск составляет $+0,5 - 0,7$ мм). Калиброванный прокат используется на высадочных, резательных, шлифовальных и других станках-автоматах. Потребность в нем непрерывно растет. Некоторые современные прокатные станы могут прокатывать металл по точности калиброванного проката. Однако полностью заменить калиброванный прокат горячекалиброванным пока не удастся.

Третью группу продукции, при производстве которых волочение является главной технологической операцией, составляют точные фасонные профили. Объем их производства невелик, но по номенклатуре изделий они весьма разнообразны. В сортаменте некоторых зарубежных стран (например, в Германии) содержится более 10000 профилеразмеров точных фасонных профилей. Существует несколько технологических схем их производства. Наиболее распространены следующие:

- горячая прокатка или горячее прессование – волочение,
- горячая прокатка (прессование) – холодная прокатка – волочение,
- горячая прокатка (прессование) – волочение – волочение,
- горячая прокатка (прессование) – волочение в роликовых волоках,
- горячая прокатка – волочение – операции резания и шлифовки и т. д.

Точные фасонные профили относятся к группе дорогой продукции. Они значительно сокращают расход металла у потребителя, позволяют экономить на трудозатратах и увеличивать производительность при изготовлении машиностроительных деталей.

2.1.2. Подготовка металла к волочению

Начальные операции в любом производстве всегда направлены на контроль поступающего исходного металла: проверяется соответствие свойств металла документации, контролируется химсостав металла, выявляются видимые (невооруженным глазом или с помощью приборов) поверхностные дефекты и т. п. Все эти операции имеют очень важное значение. Качество и объем этих операций зависит от организационных и инструментальных возможностей предприятия. На мелких предприятиях входной контроль ограничивается внешним осмотром металла и анализом документации. На крупных предприятиях предпочитают иметь собственную инструментальную базу, с помощью которой проверяют не только внешний вид металла, но и механические свойства, химический состав и другие характеристики металла. На таких предприятиях идет непрерывное совершенствование входного контроля поступающей в производство продукции и, прежде всего, за счет установки новых совершенных приборов. Подробно операции приемки исходного металла для волочения мы рассматривать не будем. Отметим лишь, что качество заготовки для волочения зависит от технологии прокатки на станах горячей прокатки и организации производства на заводе-изготовителе. В связи с этим каждый завод, производящий волочильную продукцию, сам выбирает структуру операций входного контроля поступающего металла..

Для волочения проволоки средних размеров ($\varnothing 1,6 - 6,0$ мм) в качестве заготовки применяется катанка диаметром $6,3 - 5,0$ мм в виде бунта массой до 2,7 т (и выше), полученная на проволочных станах горячей прокатки. Для закрепления терминологии отметим еще раз, что для производства **проволоки** средних размеров заготовкой является **катанка**.

На современных высокоскоростных непрерывных проволочных станах осуществляют термомеханическую обработку катанки, чтобы обеспечить структуру металла, необходимую для волочения. Для средне- и высокоуглеродистых сталей структура катанки представляет собой мелкопластинчатый или глобулярный сорбит, придающий металлу высокую пластичность и высокую прочность. Требуемая структура металла достигается на проволочном прокатном стане путем быстрого режимного охлаждения катанки с прокатного нагрева до температуры $550 - 600$ °С с последующим медленным охлаждением. Структура сорбита обеспечивает высокую степень деформации без обрывов проволоки при волочении.

Низкоуглеродистые стали, для которых структура сорбита не обязательна, при таком режиме охлаждения имеют минимальный слой окалины, что облегчает ее снятие перед волочением.

Для производства калиброванного металла используют **сортовой прокат** с разных сортовых прокатных станов горячей прокатки, поэтому

структура металла. точность и толщина слоя окалины на поверхности заготовки для волочения калиброванных прутков сильно зависят от технологии горячей прокатки подката.

Для третьего вида волочильной продукции – точных фасонных профилей – заготовкой служат горячекатаные или прессованные простые или фасонные профили, которые производятся на различных станах или прессах, часто устаревших конструкций с нестабильной технологией. Такая заготовка может иметь на поверхности слой окалины разной толщины и состава, размеры ее обычно колеблются в очень широких пределах, а структура металла может не соответствовать требуемой для волочения.

Как видно, для всех видов заготовки, применяемой для волочения, требуются подготовительные операции, в результате которых снимают окалину и стабилизируют размеры подката перед волочением. К подготовительным относятся также операции нанесения на подготовленную поверхность подмазочных слоев, удерживающих смазку в очаге деформации в процессе волочения. В процессе волочения важны также операции термообработки, обеспечивающие необходимую структуру металла. Все эти операции, включая также саму операцию волочения, имеют большое значение для обеспечения высокого качества готовой проволоки, а также существенно влияют на технико-экономические показатели производства в целом.

Под качеством изделия, полученного волочением, подразумевается:

- высокая точность по геометрическим параметрам,
- свободная от окалины поверхность с требуемой шероховатостью,
- высокие механические и эксплуатационные свойства металла, зависящие от структуры металла.

2.1.2.1. Снятие окалины

Окалину снимают механическим путем или травлением в кислотах. Распространены технологии, когда до 90–95 % окалины удаляют механическим путем, а остальное стравливают в кислотных ваннах.

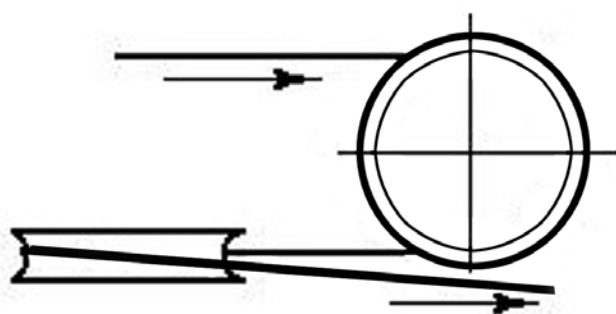


Рис. 2.1. Удаление окалины в роликовом окатиноломателе.

Самым дешевым способом снятия окалины является обработка прутков или бунтов исходной заготовки на роликовом окатиноломателе, включающем две пары перегибных роликов (рис. 2.1). За счет двойного перегиба все поверхностные слои металла получают не-

большую пластическую деформацию, непластичная окалина при этом разламывается. Затем ее счищают щетками, установленными после перегибных роликов. Количество оставшейся на поверхности окалина зависит от жесткости щеток. Очень жесткие щетки снимают всю окалину и часть основного металла. Примерно такие же щетки применяются на иглофрезерных установках в прокатных цехах, Но при обработке жесткими щетками на поверхности металла остаются риски, которые сохраняются и даже увеличиваются при дальнейшем волочении. Качество волоченного металла резко снижается. Предпочитают использовать более мягкие щетки. Однако при этом около 5 – 10 % окалина остается на поверхности металла, которую необходимо стравливать в кислотных растворах.

Как показывает опыт японских предприятий, практически полное снятие остатков окалина после роликового окалиноломателя обеспечивают также дробеструйные установки, на которых на поверхность металла с большой скоростью подаются мелкие стальные дробинки. После такой обработки поверхность металла вполне пригодна для волочения даже без нанесения подмазочных слоев, но при применении специальных смазок.

Методом двойного перегиба удаляют окалину на круглых и мелких квадратных профилях, Так обрабатывается почти вся катанка. Более сложные по форме, а также крупные заготовки таким способом обрабатывать нельзя.

К механическим можно отнести также абразивно-порошковые методы удаления окалина. Существует много их разновидностей, но основные из них используют свойства порошков из ферромагнитных материалов в магнитном поле образовывать жесткий абразивный конгломерат, плотно облегающий металл. Проходя через такой полужесткий инструмент, поверхность металла почти полностью очищается от окалина. Разработано много конструкций агрегатов для очистки окалина. Абразивный порошок может подаваться в виде эмульсии, но "мокрый" процесс очень неудобен в эксплуатации. Распространен способ прижатия сухого порошка к металлу с помощью магнитного поля. Для обработки немагнитных (иногда и магнитных) материалов применяют также установки, в которых немагнитные абразивные материалы без применения магнитного поля механически прижимаются к обрабатываемому металлу

Во всех магнитных методах после обработки металл необходимо размагничивать (дополнительная операция). Кроме того, на всех установках такого типа должен быть ряд дополнительных операций по удалению остатков порошка с поверхности металла. Эти операции оказались не совсем отработанными и дорогими. В целом, абразивно-порошковые методы очистки окалина сравнительно дороги. Кроме того, пока не удастся полностью исключить операцию финишного травления металла после такой обработки. Поэтому абразивно-порошковые методы очистки поверхности

металла робко внедряются в массовое производство. Часто в ущерб выгоде удобно осуществлять только одну операцию травления.

На последних калибровочных агрегатах оказалось целесообразным получать готовый прутки с требуемыми (и даже более жесткими) допусками по размерам путем обточки заготовки резцами без применения последующего волочения. За одну операцию обточки удаляется не только слой окалина, но и поверхностный слой, который может содержать дефекты.

Травление в кислотах остается самым распространенным и надежным способом полного удаления окалина с поверхности как простых, так и сложных профилей. Одним из главных преимуществ травления заключается в том, что поверхность металла становится очень благоприятной для волочения – "растравленной", не содержащей рисок и дефектов, с равномерно шероховатой поверхностью со средним значением высоты неровностей $Ra = 3 - 8$ мкм. Это способствует дальнейшему удержанию подмазочных слоев и самой смазки при волочении. Качество поверхности металла после травления выше, чем после любого вида механической обработки.

Травление обычно осуществляется путем погружения бунта или пакета прутков в кислотную ванну. Для ускорения процесса и более равномерного травливания металла иногда применяют перемешивание травильного раствора.

Травильное отделение в волочильных цехах – очень трудный участок с точки зрения условий труда и экологии. Все "мокрые" технологии, и особенно травление в кислотных ваннах, не желательны в прокатных и волочильных цехах из-за грязи, образующейся вокруг ванн. Особенно вредны для человека и оборудования выделения паров кислот. Чтобы их уменьшить, в состав кислотной ванны вводят пенообразующие вещества, которые при реакции с кислотой образуют пену, покрывающую зеркало ванны на 2 – 3 см. Часто зеркало травильной ванны покрывают мелкими полиэтиленовыми шариками, однако, при этом вредное воздействие паров кислот полностью не устраняется. Разрабатываются другие способы защиты зеркала ванн.

2.1.2.2. Свойства окалина

Эффективность механических способов очистки металла и травления в кислотах зависит от структуры и свойств поверхностной окалина, которая образуется при горячей прокатке заготовки. Скорость роста окалина и ее фазовый состав зависят, в основном, от температуры и скорости прокатки и условий охлаждения после прокатки. Наличие примесей и легирующих элементов сильно влияет на процесс окисления металла.

При высокотемпературном окислении в окатине образуется три слоя оксидов: наружный твердый, но хрупкий слой гематита Fe_2O_3 , средний

плотный и прочный слой магнетита Fe_3O_4 и внутренний, прилегающий непосредственно к металлу, сравнительно рыхлый слой вюстита FeO (точнее, вюстит – ограниченный твердый раствор $\text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4$). На современном проволочном стане при смотки катанки в бунт при температуре 1070°C образуется окалина толщиной до $35 - 50$ мкм, состоящая из 37 % гематита, 16 % магнетита и 47 % вюстита. Конечно, указанные цифры зависят от типа стана и технологии прокатки. С уменьшением температуры конца прокатки толщина окалины в целом и толщина наименее желательного слоя магнетита уменьшаются, что снижает общие затраты на удаление окалины. На легированном металле окалина прочная, и затраты на ее удаление увеличиваются. У кипящих марок стали общая толщина окалины и количество магнетита выше, чем у спокойных сталей.

Состав окалины по-разному влияет на эффективность снятия окалины при механических способах и травлении. При двойном перегибе хрупкий слой гематита Fe_2O_3 и магнетита Fe_3O_4 легко разламываются и удаляются щетками. На поверхности металла остается небольшая часть вюстита $\text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4$, который удаляется травлением в кислоте. Если подвергать травлению в серной кислоте окалину без ее предварительного разламывания, то прочные и плотные слои гематита и магнетита резко замедляют процесс. Магнетит вообще не реагирует с серной кислотой. При абразивно-порошковой очистке, наоборот, лучше снимаются верхние слои гематита и магнетита, но хуже удаляется слой вюстита. После такой обработки травление становится необходимой операцией. Чем более легирован металл, тем требуется большее усилие прижатия абразивного порошка к металлу. На спокойных марках стали усилие прижатия выше, чем на кипящих. При абразивной обработке, как и при травлении, эффективность съема окалины возрастает с уменьшением слоя гематита.

При травлении металла большое значение имеет состав кислотной ванны. Обычно применяют 20–25 %-ный раствор серной кислоты H_2SO_4 (при такой концентрации скорость травления максимальна), при температуре ванны 95°C (с повышением температуры раствора на каждые 10°C скорость травления удваивается, но при температуре выше 96°C резко возрастает испарение кислоты). Кислота проникает в разломы магнетита и вступает в реакцию с вюститом. Магнетит отделяется от металла за счет образующегося при реакции водорода и оседает на дне кислотой ванны. Но водород вреден, когда он проникает в поверхностные слои здорового металла, охрупчивая их.

Для предотвращения водородной хрупкости в кислотную ванну добавляют ингибиторы. Состав их может быть самым разнообразным, и идеальных ингибиторов не существует. С одной стороны, ингибиторы должны образовывать тонкую масляную пленку на поверхности металла и предотвращать диффузию водорода в металл, но, с другой стороны, толщина этой

пленки не должна быть большой, так как пленка может образовать грязные подтеки на поверхности металла при волочении и термообработке после волочения.

После травления металл в виде бунтов или пакетов прутков промывается сначала в горячей, затем в холодной воде. При этом с поверхности металла полностью удаляются следы кислоты и шлама (грязи и частичек окалины). Затем металл направляется на следующую технологическую операцию – нанесение подсмазочного слоя на его поверхность.

В прокатном производстве при подготовке металла для холодной прокатки листа почти все заводы перешли на солянокислотное травление. В волочильных цехах такой переход протекает медленнее.

Соляная кислота одинаково эффективно и быстро реагирует со всеми оксидами. Травление протекает значительно быстрее, чем в серной кислоте. Качество травления очень высокое, почти полностью отсутствует водородная хрупкость. Скорость процесса значительно повышается, поэтому при больших объемах производства стоимость травления получается даже ниже, чем при сернокислотном травлении, хотя сама соляная кислота значительно дороже серной. Но соляная кислота летуча и очень агрессивна, пары ее вредны для здоровья и окружающего оборудования, малейшие утечки ее паров экологически опасны. Для солянокислотного травления уже не применимы открытые ванны, нужны специальные закрытые емкости. Сам процесс травления организован совершенно иначе. Кроме того, соляная кислота требует специальных условий ее хранения и транспортировки, других условий техники безопасности. В волочильном производстве объемы обрабатываемого металла значительно меньше, чем в прокатном, и соляную кислоту применяют реже. Переход с сернокислотного на солянокислотный способ травления часто становится экономически нецелесообразным. С развитием производства пластмасс количество соляной кислоты увеличивается, стоимость ее снижается, что способствует более широкому ее применению взамен серной.

Легированные марки сталей имеют окислы сложного состава, и травление их происходит значительно продолжительнее, и затраты на травление значительно больше, чем на углеродистых сталях. Для ускорения процесса в сернокислотные ванны добавляют соляную и азотную кислоты.

Весьма эффективным травильным составом является расплав гидрата натрия NaN , который восстанавливает окислы железа (и других металлов) до металлического состояния. При этом почти исключаются потери металла с окалиной, отсутствуют перетрав и водородная хрупкость, улучшается качество поверхности металла, сокращается цикл травления металла, не выделяется вредных газов в атмосферу. На ряде заводов такой способ снятия окалины внедрен с большим экономическим эффектом. Процесс ведут при $360\text{--}370^\circ\text{C}$ в течение 5–7 мин, затем металл промывают в холодной

воде и слегка протравливают в серной кислоте. Однако травление в гидроокиси натрия внедряется медленно из-за высокой стоимости реактивов и особых требований к технике безопасности.

На некоторых небольших фирмах по производству неответственных видов проволоки после обработки в роликовых окалиноломателях и очистки металла щетками не применяют травления и не наносят подсмазочные слои. Волочение проволоки со следами окалины на поверхности, конечно, снижает стойкость волок, требует щадящих режимов волочения и не обеспечивает высокого качества металла, но значительно удешевляет продукцию.

2.1.2.3. Нанесение подсмазочных слоев

Перед нанесением подсмазочного слоя на поверхность катанки (или проволоки) ее тщательно промывают сначала в горячей, а затем в холодной воде. При этом интенсивно растворяются и удаляются остатки кислоты, соли и шлам. Иногда перед промывкой используются щелочные растворы для нейтрализации кислотного налета. Последующая промывка предусматривает также удаление остатков щелочей.

Подсмазочный слой играет очень важную роль при волочении. С одной стороны, он должен плотно схватываться с поверхностью металла, а с другой – удерживать смазку при волочении, препятствуя ее выдавливанию из очага деформации. Обычно подсмазочный слой состоит из двух слоев – нижнего, непосредственно прилегающего к металлу, и верхнего, предотвращающего нижний слой и удерживающего смазку при волочении.

Наиболее дешевым и эффективным нижним подсмазочным слоем для углеродистой проволоки является тонкий слой гидроокиси железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (ржавчины). Операция его нанесения называется желтением (по цвету покрытия). После травления и промывки бунта или пакета прутков в горячей воде металл вывешивается на несколько минут над промывочной ванной, и процесс желтения протекает самопроизвольно.

Помимо этого для нанесения нижнего подсмазочного слоя применяют другие способы. Омеднение после травления (и промывки) обеспечивает тонкий и прочный подсмазочный слой. Оно осуществляется путем погружения металла в водный раствор сернокислой меди (медного купороса CuSO_4) с добавлением свободной серной кислоты. Омедненная проволока хорошо ведет себя при волочении, но она дорога и отличается повышенной коррозией при длительном хранении на складе. Медненная проволока широко используется в сварочных автоматах, но не применяется при производстве канатов.

Более высокой адсорбционной способностью обладает подсмазочный слой, состоящий из солей ортофосфорной кислоты H_3PO_4 . Проволоку про-

пускают через агрегат, состоящий из размоточной катушки, ванны с раствором солей ортофосфорной кислоты, в которой металл должен пребывать не менее 5–10 мин, и намоточной катушки. Микропористая фосфатная пленка хорошо сцепляется с поверхностью металла, равномерно распределяется по длине проволоки, хорошо удерживает смазку при волочении и не теряет своих свойств до температуры 600 °С. Стойкость волок при волочении фосфатированного металла в 4–12 раз выше, чем прошедшего желтение. Однако все химические реакции фосфатирования протекают медленнее.

Некоторые высоколегированные стали не удается фосфатировать. Их покрывают солями щавелевой кислоты $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – оксалатами. На проходном агрегате на 10–15 мин металл погружают в раствор солей щавелевой кислоты. В ванну с раствором оксалатов добавляют активаторы (NaCl, KCl и др) для лучшего соединения покрытия с основой. Прочное оксалатное покрытие хорошо удерживает смазку и обеспечивает высокую скорость волочения (до 6 м/с). Однако адсорбционная способность оксалатного покрытия ниже, чем фосфатного.

По нижнему наносят верхний подсмазочный слой. Чаще всего такой слой состоит из слоя извести (оксида кальция CaO). Он необходим, с одной стороны, для предотвращения от повреждения нижнего покрытия при хранении и транспортировке бунта проволоки, а с другой, – для лучшего захватывания смазки, применяемой при волочении. Для известкования металла погружают бунт или пакет в ванну с известковым молочком (суспензией CaO в воде), нагретым до температуры 80–90 °С, и далее покрытие высушивают. Процедуры погружения и сушки проволоки повторяют от 2 до 7 раз. Но известковое покрытие гигроскопично и загрязняет территорию и атмосферу цеха известковой пылью.

Для нанесения верхнего подсмазочного слоя применяют также жидкое стекло. Но такое покрытие также гигроскопично. Известь и жидкое стекло успешно заменяют бурой ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$), которая не гигроскопична, или составами на основе борной кислоты H_3BO_3 . Покрытие бурой или стеклом прочнее, но дороже, чем известью.

После всех перечисленных операций нанесения покрытий следуют промывка и сушка металла. Обычно сушку проводят в сушилах с электрическим или газовым нагревом при температуре 300 – 400 °С. При этом также удаляется водород, образовавшийся на поверхности металла при травлении, благодаря чему снижается водородная хрупкость проволоки.

2.1.2.4. Острение прутков

Перед волочением передний конец прутка (бунта) заостряют, чтобы заправлять в волоку для захвата тянущим устройством. Существует несколь-

ко машин для острения. Для мелких круглых профилей и проволоки, для волочения которых используется бунтовой подкат, применяют ковочные вальцы, схема действия которых приведена на рис 2.2. Обжатие переднего конца прутков или бунтов перед волочением осуществляется в ручном режиме путем многократной прокатки с кантовками переднего конца. Ролики при этом вращаются в сторону человека, задающего металл в ролики. Задают передний конец в тот момент, когда расстояние между роликами определяется заходным участком калибра. После обжатия на рабочем участке калибра металл роликами выбрасывается на задающего. После кантовки операциюковки переднего конца прутка повторяют.

Острение прутков – операция ручная и сдерживает непрерывность процесса в целом. Производительность резко увеличивается при использовании бунтового подката взамен пруткового. Увеличивается производительность, сокращаются потери металла при острении, появляется возможность автоматизировать операции подготовки металла к волочению и сам процесс волочения. На поточных линиях концы бунтов можно сваривать между собой на стыкосварочной машине, однако при этом необходимо зачищать сварный грат, важно также подбирать размеры свариваемых концов бунтов и пр. Процесс становится неудобным, поэтому предпочитают острить концы каждого бунта отдельно. При производстве крупных калиброванных прутков (от 80 до 18 мм и даже ниже) на поточных линиях перед волочильным станом устанавливают гидравлический или механический заталкиватель, с помощью которого передний конец прутки (или бунта) принудительно заталкивается в волоку на длину, достаточную для захвата его тянущим устройством стана. В этом случае необходимость в операции острения подката отпадает, и весь процесс получения калиброванного проката на поточной линии легче автоматизируется.

Наряду с ковочными вальцами могут применяться другие машины, способные утонять конец прутка или бунта на некотором расстоянии. Например, применяют обточку переднего конца круглого подката. Однако большие потери металла и высокая трудоемкость являются существенными недостатками такого метода. В некоторых цехах для производства калиброванного металла применяют ротационно-ковочные машины. На крупных размерах подката применяют предварительный нагрев переднего конца металла токами высокой частоты.

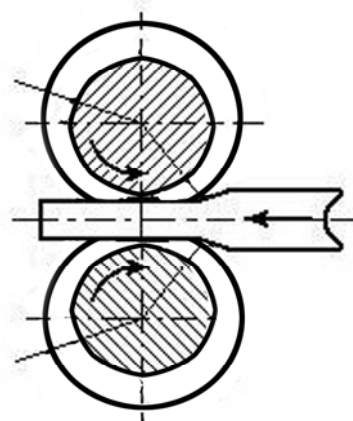


Рис. 2.2. Ковочные вальцы для острения прутков

При производстве труб очень распространено острение заготовки на ковочных молотах или радиально-ковочных машинах при ручной задаче отдельных труб под деформирующий инструмент. Иногда применяют нагрев заковываемого конца перед острением.

Наибольшие проблемы возникают при острении фасонных прутков. Обжимные вальцы становятся дорогими, так как требуют особой калибровки роликов. Применяются разрывные машины, на которых с помощью локального подогрева в процессе растяжения формируется достаточно длинная шейка. Преимущество метода состоит в том, что заготовка таким способом разделяется на две, каждая из которых имеет заостренный конец. Если профиль поперечного сечения заготовки имеет вертикальную ось симметрии, то обе заготовки можно протягивать в одной волоке. При отсутствии симметрии для левой и правой заготовки требуются разные волокни.

Иногда передний конец заготовки утоняют путем травления в кислотах. Применяют также электрохимические методы травления. Как видно, во всех случаях острение фасонных прутков является достаточно трудоемкой и дорогой операцией.

2.2. Волочильные станы

2.2.1. Станы однократного волочения

Все волочильные станы можно разделить на два типа: с прямолинейным и круговым движением протягиваемого металла. Станы первого типа могут иметь приводную тележку (рис. 2.3, *а*), закрепленную на конечной или бесконечной цепи или на рейке, или гусеничное тяговое устройство (рис. 2.3, *б*). Тележка на стане первой конструкции может иметь один, два или три захвата, что позволяют протягивать до трех ниток металла одновременно. Несмотря на это такие станы считают станами однократного волочения, поскольку металл за одну операцию волочения проходит только через одну волоку.

Заправка металла в захваты осуществляется автоматически. Волочение производится в одну сторону, а в обратную сторону тележка перемещается вхолостую. Скорости и производительность на таких станах невелики, длина протягиваемого прутка ограничена длиной цепи. На них производят прутки и трубы небольшой длины. Основное достоинство цепных станов – простота конструкции и дешевизна.

Гусеничные волочильные станы (рис. 2.3, *б*) имеют захваты, закрепленные между двумя бесконечными цепями. С их помощью прутки непрерывно продвигаются через волоку, поэтому длина готового изделия может быть значительно больше, чем на цепных станах. На вход стана подается

бунтовой подкат, а на выходе имеются ножницы, разрезающие пруток на мерные длины. Гусеничные станы могут иметь несколько последовательных секций. Они предназначены для производства прутков, калиброванного проката и труб. Одну или несколько секций легко встроить в полностью автоматизированную поточную линию для производства, например, калиброванного проката диаметром до 25 мм. Исходный бунт (подкат) предварительно проходит отдельные агрегаты для снятия и подготовки поверхности для последующего волочения, а затем поступает на поточную линию. Если требуется, первой технологической операцией может быть термообработка металла. На выходе из агрегата получаются полностью подготовленные для заказчика пакеты прутков определенной длины и веса. В состав поточной линии входят механизмы для правки исходного бунта, острения, смазки, волочения и последующих операций правки, полировки, контроля качества, резки на требуемые длины, торцовки (если требуется), консервационного промасливания, сборки пакетов, взвешивания, упаковки и пр.

При производстве проволоки, калиброванного проката и труб применяют также волочильные станы с круговым движением протягиваемого металла, то есть с намоткой готовой продукции на барабан. Станы барабанного типа весьма разнообразны (на рис. 2.3 – в, з, д и е). Самые простые – станы однократного волочения (рис. 2.3, в). имеют один разматыватель 6 для бунтового подката, один приемный барабан 7 и волоку между ними. Исходный бунт металла проходит предварительно операции снятия окалины и нанесения подсма-

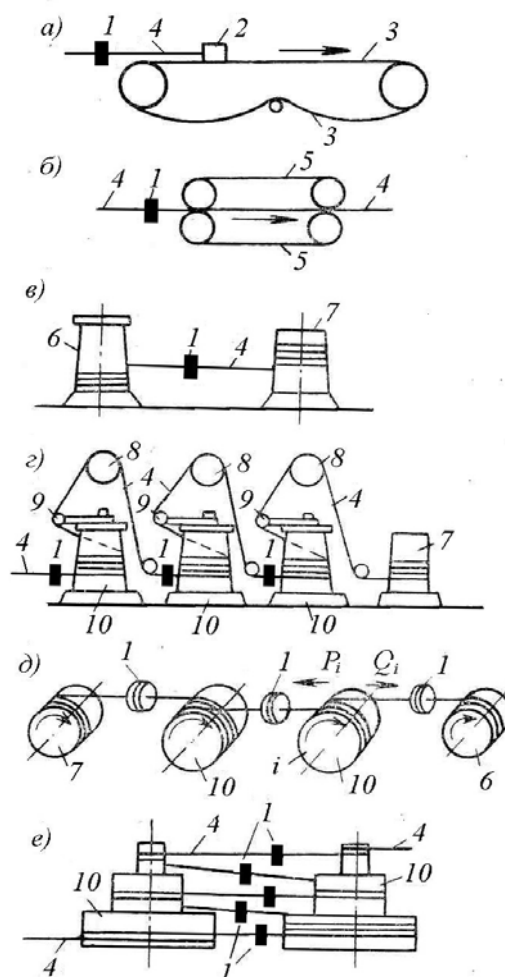


Рис. 2.3. Типы волочильных станков: а) – цепной; б) – гусеничный; в) – барабанный однократного волочения; г) – магазинный; д) – со скольжением; е) – со ступенчатым барабаном; 1 – волока; 2 – тележка с захватами; 3 – цепь; 4 – металл; 5 – гусеничное тяговое устройство; 6 – разматочный барабан; 7 – приемный барабан; 8 – направляющий ролик; 9 – поводок; 10 – тянущий барабан

зочных слоев (а если требуется, то и термообработку металла). Затем передний конец его после острения на острильной машине задается в волоку и автоматически захватывается тянущим устройством, соединенным с приемным барабаном. Весь бунт протягивается за одну операцию. На станах данного типа скорость волочения может меняться ступенчато с помощью коробки передач. Производительность их невелика.

2.2.2. Станы многократного волочения без скольжения проволоки

Более распространены станы многократного волочения, на которых за одну установку осуществляют несколько переходов. Для толстой проволоки используют многократные машины без скольжения металла относительно барабана. На таких станах должно жестко соблюдаться условие постоянства объема металла, расходуемого в одну секунду:

$$F_i \cdot V_i = \text{const}, \quad (8)$$

где F_i – площадь поперечного сечения и V_i – скорость движения проволоки на i – том барабане.

Последнее условие можно записать для двух соседних барабанов с номерами $(i - 1)$ и i в следующем виде:

$$F_{i-1} \cdot V_{i-1} = F_i \cdot V_i.$$

Обозначив в i – м пропуске вытяжку и отношение скоростей двух соседних барабанов соответственно:

$$\lambda_i = F_{i-1} / F_i \quad \text{и} \quad v_i = V_i / V_{i-1}, \quad \text{получим} \quad \lambda_i = v_i \quad (9)$$

Из этого условия вытекает, что при жесткой конструкции стана с заданными скоростями барабанов вытяжку λ_i нельзя назначать произвольно, вытяжки определяются конструкцией стана, точнее, скоростями вращения барабанов стана.

Однако по ряду причин условие (9) при многократном волочении не соблюдается: исходная заготовка (катанка) может иметь разную толщину по длине, в процессе волочения происходит износ волоки, и площадь F_i сечения со временем постепенно увеличивается, возможны также другие причины. Несоблюдение условия (8) неизбежно приводит к обрыву проволоки, поэтому на станах, работающих без скольжения проволоки относительно барабана, должны применяться различные средства для регулирования скорости проволоки V_i .

На станах магазинного типа (рис. 2.3, з) проволоку можно накапливать на каждом барабане или сматывать с него в зависимости от характера несоблюдения условия постоянства секундного расхода металла. Если i – тый барабан вращается быстрее, чем требуется по условию (9), то с $(i - 1)$ -го проволока должна сматываться, чтобы не произошло обрыва проволоки между барабанами. Сматывание осуществляется с помощью поводка 9,

свободно вращающегося на оси $(i - 1)$ -го барабана. При обратном соотношении скоростей барабанов тот же поводок обеспечивает намотку лишних витков проволоки на $(i - 1)$ -й барабан. Рабочий, следя за состоянием барабанов, вручную переключает их скорости, не допуская скопления проволоки на отдельных из них. На том барабане, на котором осталось мало витков, скорость на ступеньку увеличивается. Скорость, наоборот, снижается, когда барабан переполнен. Следовательно, в каждый конкретный момент времени условие (9) не выполняется, но за длительный промежуток времени оно соблюдается точно.

Стан очень прост по конструкции, не требуется сложных систем регулирования скоростей двигателей, применяются самые дешевые асинхронные двигатели. Недостаток состоит в том, что при сбрасывании каждого витка с $(i - 1)$ -го барабана проволока скручивается вокруг своей оси на 180° , механические свойства ее при этом снижаются. На таких станах можно во-лочить только круглую проволоку.

Казалось бы, количество барабанов на стане многократного волочения должно быть таким, чтобы обеспечить получение готовой продукции на выходе за одну установку. Но это условие может быть нарушено скоростными возможностями каждого барабана. Понятно, что скорости барабанов должны возрастать от начала к концу волочения. Может оказаться так, что на первых барабанах скорости будут недопустимо малыми, а на последних - недопустимо большими. Тогда приходится менять одну машину на две машины меньшей кратности.

На рис. 2.4 приведена схема стана петлевого типа, на котором отсутствуют поводки, регулирующие сход проволоки с барабанов, но условие постоянства секундного объема автоматически регулируется за счет изменения натяжения проволоки на натяжном ролике 5. Каждый барабан приводится отдельным двигателем постоянного тока 1 через червячную передачу 2 и 3. Как и в машинах магазинного типа, на каждый барабан 4 наматывается 6 – 12 витков проволоки. После первого и всех последующих барабанов проволока проходит через подвижный натяжной ролик 5, а затем через неподвижный ролик 6. Ролик 5 при своем перемещении за счет натяжения (или ослабления) проволоки поворачивает рычагом 7 и перемещает соединенный с ним движок реостата, в результате чего скорость двигателя изменяется в соответствии с условием (8).

Однако, на таких станах при строго заданных вытяжках по проходам в соответствии с условием (8) длительное волочение невозможно из-за износа волок, разнотолщинности исходной проволоки и других возмущающих факторов. Стан становится негибким и неудобным. Можно снабдить стан системой автоматического регулирования скоростей барабанов, отрабатывающей износ волок и другие возмущения. Но стан с таким приводом становится дорогим, так как система управления приводом и сами

приводные двигатели усложняются. Кроме того, требуются надежные датчики непрерывного измерения размеров подката по его длине в процессе волочения. Тем не менее, несмотря на дороговизну станы, работающие на таких принципах, внедряются в производство. Для стабилизации параметров волочения и уменьшения износа волок, применяется регулируемое противонатяжение.

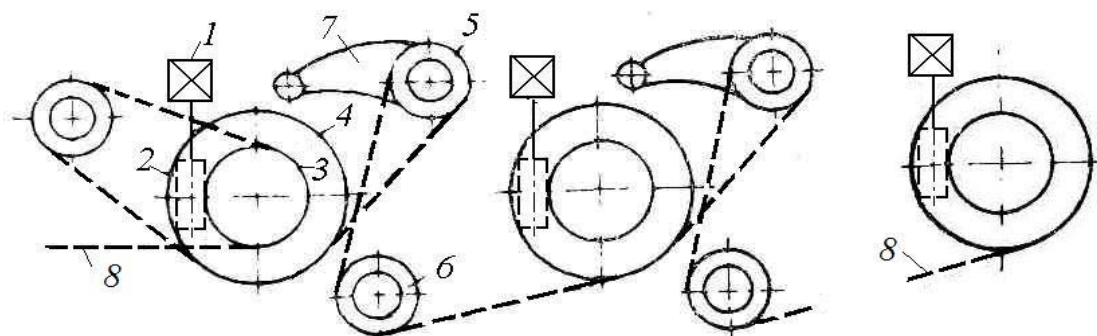


Рис. 2.4. Схема стана петлевого типа: 1 – электродвигатель; 2 – червяк; 3 – червячное колесо; 4 – барабан; 5 – натяжной ролик; 6 – не приводной ролик; 7 – рычаг; 8 – проволока.

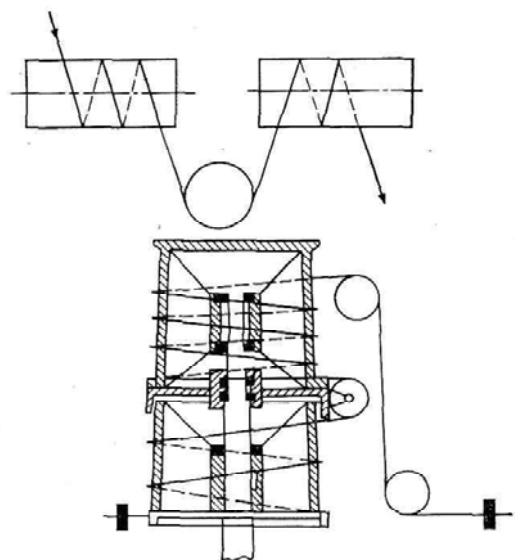


Рис. 2.5. Сдвоенный барабан.

На станах магазинного и петлевого типа легко конструктивно устраняется также главный недостаток таких машин – скручивание проволоки при волочении. Для этого применяют сдвоенные барабаны (рис. 2.5). Видно, что на одном барабане проволока закручивается в одну сторону, а на втором – в другую. Но двойное скручивание еще в большей мере сказывается на механических свойствах проволоки.

Имеется несколько конструктивных решений, позволяющих регулировать скорости барабанов с целью выполнения условия (9). Вместо электрического привода может быть использован привод от гидромоторов, регулировка которых осуществляется значительно проще.

2.2.3. Станы многократного волочения со скольжением проволоки

Чаще всего, особенно при волочении тонкой проволоки, применяются прямоточные станы барабанного типа, работающие со скольжением проволоки относительно барабанов, которые на таких станах принято называть тяговыми шайбами. Конструкции станов разнообразны. По сравнению со станами магазинного типа такие станы более быстроходны, имеют меньшие диаметры барабанов, следовательно, менее инерционны. На таких станах каждой волоке соответствует одна тяговая шайба (рис. 2.3, д). Каждая из шайб вращается со своей линейной скоростью B_i , несколько превышающей скорости V_i схода проволоки с этой шайбы. Условие постоянства секундного объема автоматически регулируется за счет проскальзывания проволоки относительно барабана.

При волочении тонких и тончайших проволок применяются два или несколько многоступенчатых барабанов (рис. 2.3, е). Диаметры ступеней (шайб) барабанов рассчитываются так, чтобы линейные скорости B_i их вращения также немного превышали скорости V_i схода проволоки с этих ступеней. Ступенчатые барабаны после заправки металла в волокна полностью погружаются вместе с проволокой в ванну со смазывающей и охлаждающей эмульсией для стабилизации температурного режима волочения.

В обеих разновидностях станов число витков проволоки на каждой шайбе (ступени) всегда неизменно и не превышает 3 – 4. Проволока при волочении проскальзывает относительно шайбы и отношение

$$E_i = \frac{B_i - V_i}{B_i} = 1 - \frac{V_i}{B_i} \quad (10)$$

называется коэффициентом скольжения или скольжением. Обычно скольжение определяют в %. Из условия (9) следует:

$$V_i = V_n F_n / F_i \quad \text{и} \\ E_i = 1 - \frac{V_n F_n}{B_i F_i}, \quad (11)$$

где n – номер последней волоки ($i = 1, 2, \dots, n$)

Таким образом, при волочении скорость проволоки V_i и коэффициент скольжения E_i на любом i – том барабане зависят от текущей F_i и конечной F_n площади поперечного сечения проволоки и скорости ее намотки на приемный барабан V_n . Значения их совершенно не зависят от скоростей остальных промежуточных тяговых барабанов

При скольжении проволоки за счет сил трения на i – той тяговой шайбе возникает сила Q_i (см. рис 2.3, д), которая связана с силой волочения P_i уравнением Эйлера:

$$Q_i = \frac{P_i}{e^{2\pi m f}}, \quad (12)$$

где m – число витков проволоки на шайбе и f – коэффициент трения при скольжении проволоки относительно шайбы. Видно, что при $B_i > V_i$ сила Q_i направлена по ходу волочения и уравнивает силу волочения P_i в соответствии с уравнением Эйлера. При этом сила Q_i по величине значительно меньше силы волочения P_i . Для следующей волоки сила Q_i является силой противонапряжения. Если бы скорости были обратными, то есть при $B_i < V_i$, сила Q_i имела бы противоположное направление и в уравнении (12) силы P_i и Q_i поменялись бы местами. Сила противонапряжения Q_i по значению многократно превысила бы P_i . Был бы превышен предел текучести металла, и проволока порвалась. Таким образом, условие $B_i > V_i$ является обязательным условием безобрывного волочения проволоки на станах, работающих со скольжением. В связи с этим коэффициент скольжения E_i всегда должен быть больше 1. Условие

$$E_i > 1 \quad (13)$$

также следует считать условием безобрывности проволоки при волочении.

Из уравнения (11) следует, что для обеспечения нормального течения процесса необходимо на всех шайбах обеспечить условие:

$$\frac{V_n F_n}{B_i F_i} > 0 \quad \text{или} \quad \frac{F_i}{F_n} > \frac{V_n}{B_i}. \quad (14)$$

Отсюда следует, что общая вытяжка во всех последующих волоках (после i – той) должна быть больше отношения конечной скорости волочения к окружной скорости i – той шайбы.

Для двух соседних шайб неравенство (14) запишется в виде:

$$\frac{V_{i-1} F_{i-1}}{B_i F_i} > 0$$

или, учитывая, что $B_{i-1} > V_{i-1}$:

$$\frac{F_{i-1}}{F_i} > \frac{B_i}{V_{i-1}} > \frac{B_i}{B_{i-1}}$$

Отношение скоростей двух соседних шайб B_i и B_{i-1} определяется только конструкцией стана и не может изменяться. Если обозначить его через v_i , то получим важное неравенство, которое также можно трактовать как условие безобрывного волочения проволоки:

$$\lambda_i > v_i \quad (15)$$

Из этого неравенства следует, что вытяжку в каждом пропуске нельзя назначать произвольно, она должна быть больше отношения скоростей двух соседних барабанов, определяемого конструкцией стана. В нормальном процессе вытяжки убывают от первой к последней шайбе, поэтому на

стане отношение скоростей шайб также должно убывать в том же направлении. В последнем пропуске обычно

$$v_n = B_n / B_{n-1} = 1.05 - 1.15,$$

что и определяет минимальную вытяжку в этом пропуске (и минимальную вытяжку за весь процесс волочения). Такая минимальная вытяжка гарантирует, что при случайном нарушении условия (8) проволока не оборвется. Вытяжка в последней волоке, очевидно, не должна быть меньше относительного допустимого увеличения площади поперечного сечения в результате износа волокна $\zeta = (F_{n \text{ изн}} - F_n) / F_n$.

Из приведенных выше рассуждений следует также, что максимальное скольжение E должно быть в первых и постепенно убывать к последним пропускам. Однако более рациональными считаются режимы, в которых в первых пропусках скольжения невелики и постоянны. Но такие режимы трудно осуществимы на практике.

Чем больше вытяжки по переходам, тем больше скольжение металла относительно шайб. Само по себе скольжение вредно: значительное количество энергии расходуется на трение, поверхность проволоки сильно разогревается, на ней появляются царапины, шайбы и барабаны испытывают повышенный износ с образованием на их поверхности глубоких прорезей. Таким образом, коэффициенты скольжения по пропускам не могут быть слишком малыми, но и большие их значения недопустимы. Коэффициенты скольжения и соответственно вытяжки по пропускам должны находиться в оптимальных пределах (обычно в пределах 1,1 – 1,4).

Большое влияние на скольжение оказывает число витков на каждой шайбе. Естественно, чем больше витков, тем меньше скольжение, причем зависимость очень резкая. Больше 3 – 4 витков применять нельзя, так как увеличивается налипание проволоки на шайбу. При волочении тонких проволок число витков снижают, для наитончайшей проволоки оно равно 1,5 – 2.

Существует также оптимальное отношение диаметра шайбы $D_{\text{ш}}$ к диаметру проволоки D . Оно определяется скоростными условиями работы стана. Из условий обрывности следует также выбирать кратность стана: чем больше волок, тем больше вероятность обрыва в одной из них и труднее выполнить все приведенные выше соотношения. С другой стороны увеличение количества барабанов (шайб) для получения требуемой суммарной вытяжки за одну установку на стане желательно с позиций интенсификации процесса волочения.

2.2.4. Комбинированные станы. Поточные линии

На современных станах для производства калиброванного проката и проволоки применяют комбинированные станы, на которых несколько после-

довательных операций осуществляются в единой поточной линии агрегатов с высокой степенью механизации и автоматизации этих операций. В калибровочном производстве широкое распространение получили комбинированные станы фирмы «Шумаг». На них поступает подкат с предварительно подготовленной поверхностью, прошедшей операции освобождения от окалины и нанесения подмазочных слоев. На комбинированном стане объединены следующие операции: размотка бунта, острение, правка, волочение, правка готового прутка, резка на мерные длины, окончательная правка, формирование пакетов. Далее в составе агрегата, а чаще всего на отдельной установке, осуществляют контроль качества полученного продукта.

Для получения калиброванного металла в последнее время на комбинированных агрегатах стали применять резание в плавающих резцовых головках вместо волочения. Набор операций на таких станах сокращается, а качество поверхности готового проката улучшается. В этом случае применяют только механическое удаление окалины перед станом (без травления). Проточка прутка по поверхности имеет ряд преимуществ по сравнению с волочением. Обточка не дает наклепа поверхности прутка, поэтому стойкость инструмента при холодной вытяжке или высадке увеличивается. Кроме того, при точении удаляются возможные поверхностные дефекты, что повышает качество изделий на холодновысадочных автоматах. Поэтому, несмотря на значительные потери металла при обточке, за счет большего выхода более качественной продукции и меньшего процента брака при холодной высадке в целом процесс получается более выгодным.

Известна поточная линия, которая после традиционного оборудования для волочения имеет холодновысадочный автомат. В литературе описана поточная линия, содержащая разматыватель, окалиноломатель механиче-

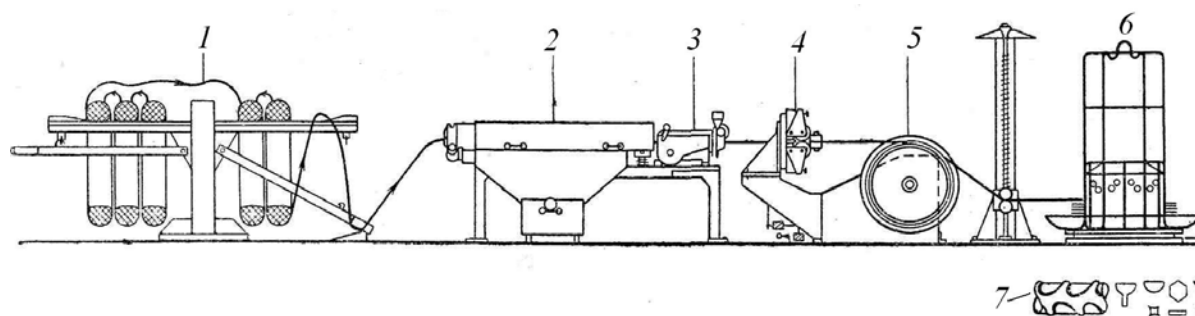


Рис. 2.6 Схема поточной линии для механической очистки, волочения и профилирования проволоки: 1 – разматыватель; 2 – устройство для механического удаления окалины; 3 – волокодержатель; 4 – профилирующий аппарат; 5 - волочильный барабанный стан; 6 – намоточное устройство; 7 – образцы профилей, изготовляемых на данной линии.

ского типа, дробеметную установку, устройство для нанесения подмазочного слоя и однобарабанный волочильный стан. С. И. Губкиным и В. С. Мурас предложена схема стана, на котором чередуются процессы волочения и профилирования проволоки.

На рис. 2.6 приведена схема поточной линии для механической очистки, волочения и профилирования проволоки. Как видно, на этой линии производят не только круглую проволоку, но и арматуру и некоторые точные фасонные профили. На рис. 2.7 показана схема поточной линии для производства из катанки $\varnothing 6,5$ мм тонкой высокопрочной канатной или пружинной проволоки $\varnothing 1,2 - 1,6$ мм. На ней катанка после разматывателя 1

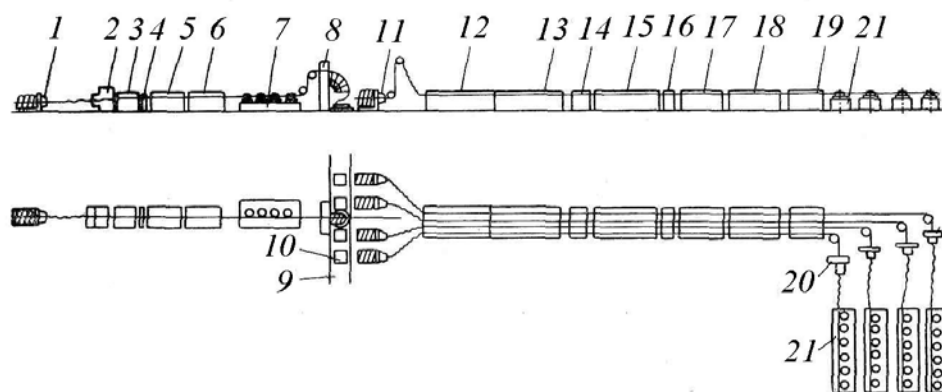


Рис. 2.7. Поточная линия для обработки и волочения канатной проволоки диаметром 1,2 - 1,6 мм.

проходит окалиноломатель 2, ванны травления 3 с серной кислотой, затем после промывки в ваннах 4 подвергается нанесению подмазочных слоев (извести, стекла, буры) в ваннах 5 и после сушила 6 поступает на стан 4-кратного волочения 7. Далее проволока через накопитель 8 через транспортер 9 с помощью кантователей 10 поступает на размоточное устройство 11 и подвергается в четыре нитки термической обработке (патентированию), то есть нагреву в ванне 12 и быстрому охлаждению в ваннах с расплавленной селитрой 13. После промывки в ваннах 14 проволоку вновь протравливают в кислотной ванне 15 промывают в воде 16 и наносят подмазочные слои — слой меди в ванне 17 и в ванне 18 слой извести или фосфата. После сушила 19 проволока с накопителем 20 подается на станы 6-кратного волочения 21 и далее наматывается на шпули и отправляется в канатный цех.

2.3. Термообработка металла при волочении

В волочильных цехах, как и в других цехах, в которых основные технологические операции связаны с обработкой металлов давлением, применяют разные виды и режимы термической обработки готового изделия. Если ис-

ходный металл поступает на волочение со свойствами, которые требуется улучшить, то в волочильном цехе первой технологической операцией (перед снятием окалины) становится термообработка исходного подката. Это, в основном, операции отжига с нагревом до температуры выше точки A_{c1} и различными режимами охлаждения металла после нагрева. Патентирование, как один из видов отжига, распространенный в волочильных цехах, применяется как начальная операция, так и на промежуточных стадиях волочения проволоки для подготовки ее к последующим операциям волочения. Режимы патентирования мы подробнее рассмотрим ниже.

Кроме того, большой набор операций термообработки применяется после волочения применительно к требованиям заказчика на готовое изделие. Эти операции формируют определенную структуру металла, обеспечивающую требуемые механические и эксплуатационные свойства

В процессе волочения металл наклепывается, запас его пластичности расходуется, и после определенной степени суммарной деформации необходим отжиг металла, возвращающий исходные свойства металла. Проволока из низкоуглеродистых сталей иногда поставляется заказчику в наклепанном виде и поэтому не отжигается (проволока общего назначения, сварочная и пр.), но большая часть проволоки поставляется в отожженном состоянии.

Отжиг (патентирование) заключается в нагреве металла до состояния аустенита (то есть выше точки A_{c1}) и последующем охлаждении до комнатной температуры по соответствующему графику. Для низкоуглеродистых сталей скорость охлаждения мало влияет на механические свойства стали, поэтому такую проволоку нагревают и затем охлаждают на воздухе в мотках. Для низкоуглеродистой проволоки важно обеспечить минимальную толщину окалины на поверхности, поэтому все операции при отжиге проходят с минимальными затратами времени.

Для волочения средне- и высокоуглеродистых сталей наилучшие сочетания свойств достигаются при структуре металла в виде сорбита, то есть при чередовании мелкого феррита и мелкопластинчатого или глобулярного перлита. К этой группе продукции относятся главным образом канатные и пружинные марки проволоки, а также рояльная, кордная и другие виды высокопрочной проволоки. Структура сорбита обеспечивает высокую пластичность при высокой прочности металла. Такое сочетание свойств необходимо как для работы проволоки в готовом изделии, так и при волочении. Пластичность металла позволяет осуществить значительную суммарную деформацию металла до очередного отжига, а прочность способствует безобрывности процесса.

Патентировочный агрегат включает в себя размоточное устройство, после которого расположена проходная печь для отжига, далее расположена ванна с расплавом солей или селитры, за которыми располагаются намо-

точные катушки. Обработка проволоки осуществляется сразу в несколько ниток. Большое значение для патентованной проволоки имеет чистота ее поверхности, поэтому при нагреве и прохождении через расплавы солей она защищается от окисления защитными газами. В состав агрегата может входить также ванна с расплавом цинка для получения оцинкованной проволоки. Применяются также операции покрытия проволоки оловом, алюминием, кадмием и другими металлическими и неметаллическими материалами.

Наилучшая структура металла достигается при быстром охлаждении проволоки от температуры аустенизации (выше A_{c1}) до температуры 550 – 600 °С и длительной выдержке при этой температуре для прохождения процессов глобулизации цементита в перлите. При указанной температуре на S -диаграмме наблюдается самый короткий промежуток времени начала и конца распада аустенита и достигается наиболее полное его превращение. Межпластинчатое расстояние в перлите минимальное и находится на уровне 0,08 – 0,10 мкм, что при дальнейшей выдержке при этой температуре обеспечивает структуру мелкоглобулярного перлита с максимальными характеристиками по пластичности и прочности.

Для готовой канатной и пружинной проволоки иногда требуются повышенный предел упругости, повышенное удлинение, светлая поверхность, поэтому после операции патентирования применяют завершающую операцию – низкотемпературный отпуск.

Легированные и высоколегированные марки сталей термически обрабатываются почти в обязательном порядке после волочения по самым различным режимам в зависимости от химсостава и требований к готовой проволоке (прутку). Рассмотрим для примера обработку проволоки из стали ШХ15. Химический анализ стали ШХ15 приведен в табл. 1. Термическая обработка шарикоподшипниковой стали, назначается в соответствии с критическими точками и диаграммой состояния системы Fe-Cr. Железо-хромистые сплавы в твердом состоянии образуют непрерывный ряд твердых растворов. До концентрации 2.0 % хром растворяется во всем интервале температур твердого и жидкого состояния железа. Область γ - твердого раствора под влиянием хрома суживается, а переход α - Fe в γ - Fe затрудняется.

Таблица 1

Химический состав стали ШХ15:

Сталь	C	Cr	Mn	Si	S	P	Ni	Cu
ШХ15	0.95-1.05	1.30-1.65	0.2-0.4	0.17-0.37	0.02	0.027	0.3	0.25

В тройных сплавах «железо – углерод – хром» последний в большей части связывается углеродом в карбиды. В заэвтектоидных сталях типа

ШХ15 железохромистые карбиды полностью растворяются в аустените при нагреве до $890 - 900^{\circ}\text{C}$.

Свободные атомы хрома, находясь в феррите шарикоподшипниковой стали, замещают железо в узлах решетки, не вызывая ее значительного искажения, поэтому твердый раствор хрома в железе мало изменяет его свойства, лишь ударная вязкость несколько повышается с 26 до 30-32 кгм/см². Наоборот, твердый раствор хрома в аустените существенно изменяет его свойства. Заметно увеличивается твердость и затрудняется деформируемость аустенита.

Шарикоподшипниковая сталь по требованиям ГОСТ 801-60, должна иметь структуру зернистого перлита. Для получения такой структуры используется сфероидизирующий отжиг. Отжиг применяется как для смягчения металла перед обработкой резанием, так и для подготовки металла к последующей закалке.

Существуют следующие виды сфероидизирующего отжига:

А) одноступенчатый

Б) двухступенчатый

В) маятниковый

Г) изотермический

Д) с использованием ТВЧ

Е) отжиг после закалки с температуры прокатки.

Конечно, все виды отжига стали ШХ15 мы рассматривать не будем. Наиболее простым является одноступенчатый отжиг. Существуют два вида одноступенчатого отжига заэвтектоидной стали: при температуре ниже точки A_{c1} (низкотемпературный сфероидизирующий отжиг) и выше A_{c1} (высокотемпературный сфероидизирующий отжиг). Отжиг при температуре ниже A_{c1} имеет технологическое сходство с операцией отпуска, здесь не происходит каких-либо аллотропических превращений. Процесс сфероидизации пластинчатых карбидов совершается путем растворения углерода карбидов и диффузии, приводящей к образованию карбидов глобулярной формы, отвечающей минимуму поверхностной энергии. Чем выше температура, тем быстрее идет сфероидизация. Низкотемпературный сфероидизирующий отжиг ведут при температуре, максимально приближающейся к A_{c1} , т.е. $700 - 720^{\circ}\text{C}$, учитывая то, что перлитное превращение в стали начинается при 730. Однако низкотемпературный отжиг совершается крайне медленно. Сфероидизация пластинчатого перлита заметна лишь после 20 – 25- часовой выдержки. Поэтому низкотемпературный отжиг не получил широкого промышленного применения.

Отжиг при температуре выше точки A_{c1} сопровождается перекристаллизацией при превращении перлита в аустенит. Структурно свободные

карбиды растворяются в аустените тем в большей степени, чем выше температура нагрева и больше выдержка.

При охлаждении стали ШХ15 выпадение карбидов в глобулярной форме происходит до температуры 840-845 °С. Оптимальным считается интервал $790^{+20}_{-10}^{\circ}$, в котором обеспечивается наибольшая однородность структуры. Однако с повышением температуры до 840-845 °С повышается твердость металла. Это верхняя граница температур для получения структуры зернистого перлита. Конец превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ при температуре 760 °С определяет нижнюю границу. При низких температурах отжига (780 °) перлитное превращение успевает завершиться в течение 5-10 мин.. При нагреве металла выше A_{c1} на 30-40 ° тонкая сетка карбидов коагулирует и частично растворяется за 30-40 мин., поэтому для завершения процесса коагуляции указанное время считается достаточным.

2.4. Маршруты волочения

Будем рассматривать только случай волочения круглого профиля из круглого подката, для других схем волочения общие подходы к разработке маршрутов идентичны.

Под маршрутом подразумевается последовательность операций волочения от исходного прутка диаметром D_0 до конечного диаметра D_n за n переходов. При этом обязательно выдвигается тот или иной критерий, минимизация или максимизация которого обеспечивает оптимальный режим волочения в целом. Таким образом, задача построения оптимального режима волочения основана на общих принципах нахождения оптимальных решений. Напомним, что все задачи оптимизации всегда содержат следующие обязательные элементы:

- критерий оптимизации; в математически правильно поставленной оптимизационной задаче критерий представляет собой некоторый функционал и обязательно должен принимать экстремальное (минимальное или максимальное) значение, однако в технологических задачах не всегда критерий удастся выразить в виде математического функционала и не всегда добиваются экстремальных решений; технически оптимальным считают также такое решение, которое приближается или даже обозначает движение к математически оптимуму;
- модель процесса, которая представляет собой совокупность всех формул, по которым рассчитываются все параметры процесса;
- ограничения, которые следует учитывать при построении маршрута; сюда входят предельные конструктивные и технологические параметры (длина участков стана, максимально возможная скорость, ограничения по

силовым и энергетическим параметрам и, максимально допустимые вытяжки, допустимый перегрев волок, условия трения и т. д);

– метод нахождения оптимального решения; существуют математических методы поиска экстремума, но для решения технологических задач всегда достаточно лишь наметить стратегию и реализовать один или несколько шагов на пути движения к математическому оптимуму. Технологи могут считать маршрут оптимальным тогда, когда критерий оптимизации находится на достаточно высоком уровне.

В математической или технологической оптимизационной задаче большое значение имеет выбор критерия оптимизации. При выборе маршрута волочения критериями могут быть:

- производительность, которая должна быть максимальной;
- рациональное распределение коэффициентов запаса γ_i по проходам при минимальном количестве проходов n ;
- равномерность загрузки стана по пропускам по силе волочения P_i (или другим энергосиловым параметрам);
- общий расход энергии за все n проходов, естественно, он должен быть минимальным;
- показатели качества готовой продукции, которыми могут быть самыми разными – предел текучести, количество поверхностных и внутренних трещин, шероховатость поверхности и т. д.; естественно, качество металла должно быть на максимальном уровне.

Можно предложить еще несколько критериев оптимизации, в том числе комплексных, построенных как комбинация из нескольких перечисленных критериев.

Рассмотрим конкретную задачу. Перечень задач можно продолжать, но общий подход к их решению остается общим.

1) Пусть требуется определить количество пропусков n при рационально распределенных по пропускам коэффициентах запаса γ_i . Пусть коэффициенты запаса должны находиться в пределах заданных значений и монотонно возрастать по ходу волочения. Такая постановка задачи актуальна, например, на станах однократного волочения.

Пусть рациональные коэффициенты запаса должны укладываться в пределы допустимых значений 1,3 – 1,8, эти значения назначает расчетчик. Найденное решение в такой постановке будем считать оптимальным.

Нам заданы:

- все ограничения и расчетные формулы (модель процесса);
- диаметры исходной и конечной продукции (пусть проволоки) D_0 и D_n ;
- исходные характеристики металла перед волочением – предел текучести σ_0 и коэффициент наклепа m ; при этом текущий предел текучести σ_{Ti} вычисляется по формуле:

$$\sigma_{Ti} = \sigma_{T0} (1 + \varepsilon_{\Sigma i})^n,$$

где $\varepsilon_{\Sigma i}$ – суммарная степень деформации;

Коэффициент запаса рассчитывается по формуле $\gamma_i = \frac{\sigma_{\dot{\alpha}i}}{\sigma_{li}}$,

где напряжение волочения σ_{li} вычисляется по формуле (6 или 7),
единичная степень деформации

$$\varepsilon_i = (D_{i-1} - D_i)/D_i,$$

суммарная степень деформации

$$\varepsilon_{\Sigma i} = (D_0 - D_i)/D_i.$$

Стратегия решения будет такова: сначала создадим «любое» решение, а затем будем его улучшать.

Алгоритм решения задачи представим в виде следующей блок-схемы.

1. Выбираем произвольное достаточно большое число переходов n .
2. Рассчитываем суммарную и среднюю вытяжку:

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{D_0^2}{D_n^2}; \quad \lambda_{\bar{n}\delta} = \sqrt[n]{\lambda_{\Sigma}}$$

3. Среднюю вытяжку присваиваем всем пропускам: $\lambda_i = \lambda_{\text{ср}}$.

4. Так как $\lambda_i = D_{i-1}^2 / D_i^2$, то определяем все диаметры по проходам D_i . По приведенным выше формулам вычисляем единичные ε_i и суммарное $\varepsilon_{\Sigma i}$ обжатия, напряжение волочения σ_{li} , предел текучести σ_{Ti} и коэффициенты запаса γ_i по проходам.

3. Если коэффициенты запаса γ_i будут очень большими (а они такими будут при большом n), их можно уменьшить и «загнать» в пределы допустимых значений, уменьшив число n . Поэтому $n = n - 1$ и переход к п. 2. Остановиться можно на любой итерации.

4. По приведенному алгоритму мы получили «любое» решение, которое можно рассматривать как допустимое. Если оно чем-то не устраивает, его можно вручную скорректировать, задав меньшее число пропусков n или другие вытяжки λ_i . При «ручных» методах после нескольких проб часто расчет заканчивают и печатают таблицу распределения вытяжек (и других параметров волочения) по пропускам.

При использовании ПЭВМ результат можно еще улучшить, если попытаться найти наименьшее число пропусков и распределить вытяжки по пропускам в соответствии с каким-нибудь критерием оптимизации. Пусть, например, мы добиваемся того, чтобы коэффициенты запаса по пропускам были равномерными по пропускам от почти минимального до почти максимального значения в пределах заданного интервала (по возрастанию по ходу волочения). Лучше всего можно это сделать, ведя расчет в *Excel*. Для этого составляем первоначальную экселевскую таблицу с исходным решением. Первый столбец таблицы отражает вытяжки по пропускам, а последний – коэффициенты запаса. В промежуточных столбцах находятся

все расчетные параметры процесса волочения. Далее начнем улучшать таблицу, используя только логику. То есть, задаем какие-то другие вытяжки и оцениваем результат по коэффициентам запаса. Кстати, такая «человеко-машинная» методика расчета, при которой контроль и оценка результатов расчета осуществляется полностью человеком, а компьютер выполняет лишь рутинные расчеты, в настоящее время практически полностью заменила расчеты по жестким машинным программам. Такое сочетание машинных и человеческих возможностей позволяет значительно экономить время расчета.

Применительно к нашей постановке задачи мы предлагаем следующий алгоритм улучшения первого решения, хотя, конечно, расчетчик может предложить любую свою логическую схему:

1. Если равномерное распределение вытяжек $\lambda_i = \lambda_{\text{ср.}}$ обеспечивает коэффициенты запаса ниже нижнего значения заданного предела во всех пропусках, то уменьшаем число пропусков n и повторяем весь расчет заново. Соответственно, при малом числе пропусков все коэффициенты запаса могут быть выше верхнего уровня допустимых значений. Тогда n необходимо снижать. Кстати, полезно в расчетах получить обе ситуации, чтобы определить $n_{\text{макс}}$ и $n_{\text{мин}}$, в пределах которых находится оптимальное число проходов n .

2. В нашей постановке (при большом n) необходимо сначала снижать число проходов. Нормально, когда при расчете оказалось, что в первых проходах коэффициенты запаса выше предельного значения, а в последних – в пределах допустимой области или даже ниже ее. Это значит, что в первых проходах следует увеличить вытяжку, а в последних соответственно уменьшить. Вытяжки могут меняться произвольно, но всегда следует соблюдать условие:

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdots \lambda_n = \lambda_{\Sigma}.$$

3. При небольшом навыке удастся загнать все коэффициенты запаса в заданные пределы. Если это сделать удалось, то дальше менять n не будем. Иначе следует дальше уменьшать n . При найденном n мы получили второе допустимое решение, и если оно нас устраивает, то расчет заканчивается. Но в этом решении распределение коэффициентов запаса по пропускам произвольно. Улучшим это распределение. Не меняя n , перераспределяем вытяжки λ_i (соблюдая при этом вышеприведенное равенство по суммарной вытяжке) будем добиваться такого распределения коэффициентов запаса, при котором первое значение (в первом проходе) приближается к нижней, а последнее значение (n -й проход) – к верхней границе заданного интервала. Если к тому же коэффициенты запаса будут плавно меняться по проходам, то такое решение будем считать оптимальным. Можно повторить расчет при других значениях n в интервале от $n_{\text{макс}}$ до $n_{\text{мин}}$. Расчет заканчива-

ется на любой стадии по решению расчетчика, и найденный им вариант считается оптимальным.

4. Далее следует оформление результатов и расчет таблиц и графиков, подготовка презентации и т. п. Особое место занимает изготовление чертежей и самих волок. Вопросам технологии изготовления волок посвящено достаточно много литературы, поэтому мы не будем излагать этот раздел в данном учебном пособии.

Г л а в а 3

ВОЛОЧЕНИЕ ПРУТКОВ И ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

3.1. ВОЛОЧЕНИЕ ПРУТКОВ И ПРОВОЛОКИ В УСЛОВИЯХ ОАО «ЦНИИМ» (С-Петербург).

3.1.1. Оборудование и номенклатура изделий специализированного пружинного производства ОАО «ЦНИИМ»

В минипроизводстве волочение является одним из распространённых способов пластической обработки сталей и сплавов не только для получения полуфабрикатов нужного сечения, но и формирования требуемых структуры и свойств материала. Широкий спектр задач, которые ставятся перед волочением, определяет не только разнообразие волочильного и иного вспомогательного и подготовительного оборудования (термического, рихтовочного, острильного, заточного, шлифовального и т.д.), но и тип производства в целом. Тип производства определяется, прежде всего, объёмом производства, номенклатурой и размерами партии выпускаемой продукции. В настоящее время нередко заказы «в штуках, метрах, килограммах». Подобные заказы не могут исполняться на крупных предприятиях, на которых состав оборудования, персонал и вся инфраструктура направлена на высокопроизводительный выпуск больших серий продукции одного типоразмера. Такие предприятия специализируются прежде всего по типам сплавов. Например, «Красный Выборжец» – медь и медные сплавы, «Севкабель» – проволока из алюминия и меди, «ВСМПО «АВИСМА» – полуфабрикаты из титановых сплавов и т.д. Существуют стали и сплавы специального назначения, обладающие специфическими свойствами: высокая прочность, жаропрочность, высокие упругие характеристики (пружинные материалы), эффект памяти формы, сверхэластичность и т.д. Выпуск продукции из подобных материалов, как правило, малыми партиями целесообразно осуществлять в условиях мелкосерийного производ-

ства, например, такого, как специализированное пружинное производство, созданное в ОАО «ЦНИИМ» (Центральный научно-исследовательский институт материалов). Данное производство специализируется на выпуске полуфабрикатов и пружин различных типов из сплавов на основе титана, никеля, ниобия, никелида титана и других металлических материалов, обладающих нетривиальными свойствами. Подобные материалы, несмотря на своё разнообразие, созданы, как правило, на основе высоколегированных, труднодеформируемых, термо- и термомеханически упрочняемых

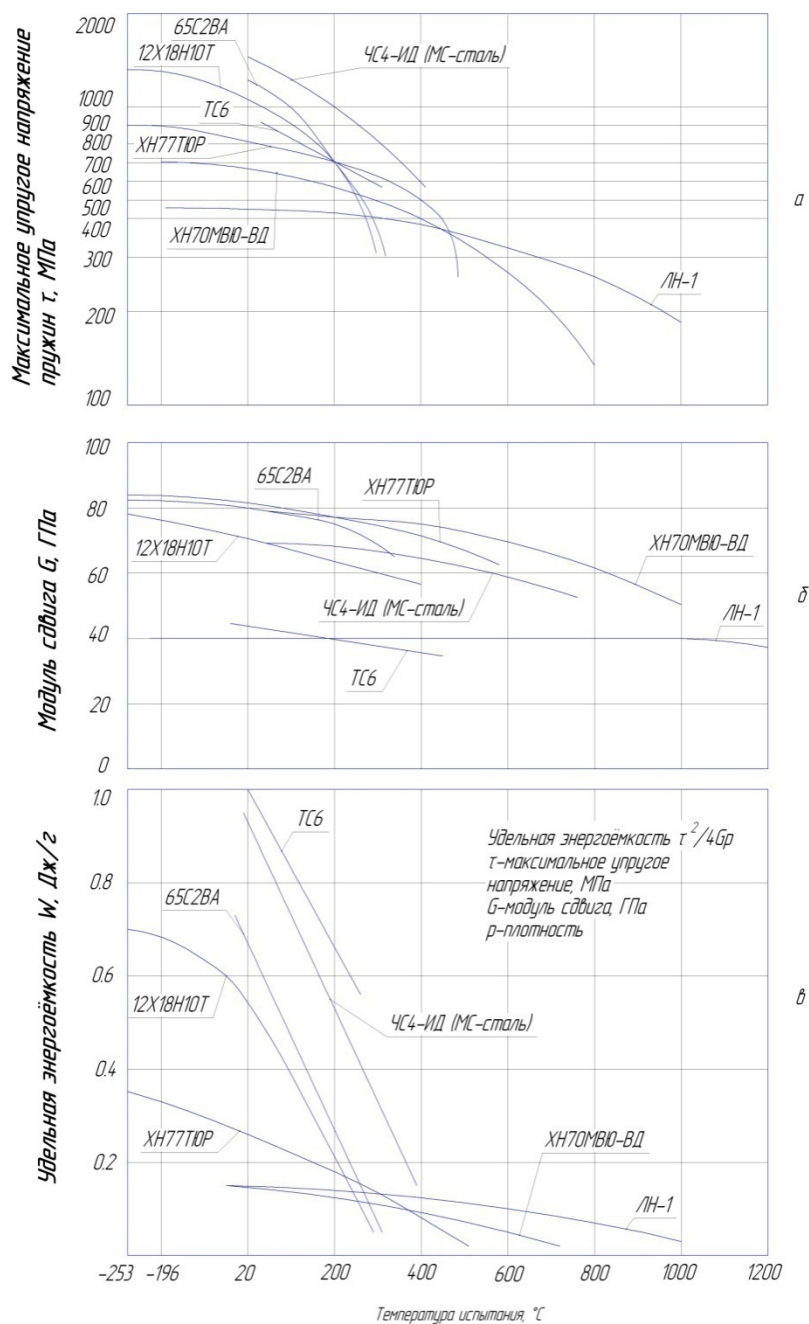


Рис.3.1 Основные характеристики пружинных материалов

сплавов [4]. Данные сплавы занимают особое место по основным пружинным характеристикам: модуль сдвига, максимальные упругие напряжения, удельная энергоёмкость (рис. 3.1). Из всех известных пружинных материалов самыми жаропрочными являются сплавы на основе никеля ХН70МВЮ-ВД (ЭИ-828-ВД), ХН77ТЮР (ЭИ-437 Б), ниобия Нб10В5МЦУ (ЛН-1), а титановый сплав ТС6, работоспособный до температуры 300 °С, имеет самую высокую удельную энергоёмкость [4-6]. Сплавы на основе никелида титана обладают эффектом памяти формы и сверхэластичностью [7,8]. Кроме того, все эти материалы характеризуются высокой коррозионной стойкостью, а никелид титана – биосовместимостью с тканями человека, что позволяет достаточно широко и успешно применять сплавы на его основе в различных областях медицины [9-11].

Существует ещё одна общая особенность этих материалов. В силу своей специфики данные материалы либо совсем не выпускаются «большой» промышленностью, либо крупные предприятия производят из этих сплавов полуфабрикаты больших сечений. Так, ОАО «Металлургический завод «Электросталь» выпускает из сплава ЭИ 828-ВД горячекатаные прутки диаметром более 14 мм, ОАО «ВСПМО АВИСМА» – из сплава ТС6 прутки диаметром 8-100мм, ХМЗ им. Юдина производит из ниобиевого сплава ЛН-1 только прутки диаметром 70 мм, а никелид титана серийно не выпускается. Изготовление различных полуфабрикатов и волочение проволоки меньших размеров из данных сплавов осуществляется в ОАО «ЦНИИМ» по собственным разработанным технологическим схемам.

Волочение в ОАО «ЦНИИМ» осуществляется на участке, в состав которого входит следующее оборудование:

- волочильное: цепной волочильный стан с усилием 20 тонн (рис.3.2), волочильные станы барабанного типа (рис.3.3) ;
- термическое: печи камерные, муфельные, проходные, вакуумные (рис.3.4), установка электроконтактного нагрева для отжига проволоки и прутков пропусканием электрического тока (рис.3.5);
- вспомогательное: станок бесцентрового шлифования (рис.3.6), правильная машина (рис.3.7);
- подготовительное: острильная машина (рис.3.8), заточной и точильно-шлифовальные станки, установка для шлифования и восстановления волок (рис.3.9), токарные и фрезерные станки;
- испытательное и измерительные приборы: испытательные машины растяжения и сжатия, кручения, пирометры, инфракрасная тепловизионная камера (тепловизор), термопары и т.д.

Волочильное оборудование, разнообразное по типам, конструкции, принципу действия, назначению [12,13], представлено в данном производстве цепным и однократными станами барабанного типа (см.п.2.2).

Цепной волочильный стан с усилием 20 тонн (рис.3.2) предназначен для волочения прутков диаметром до 25 мм. Минимальный диаметр прутка, получаемого на данном стане, составляет 4 мм. Длина прутков ограничена длиной станины (10 метров). На цепном стане предусмотрены 3 скорости



Рис. 3.2 Цепной волочильный стан



Рис.3.3 Волочильный стан барабанного типа



Рис.3.4 Вакуумные печи

волочения: 2,17; 2,93 и 4,89 м/мин. Цепные станы отличаются плавностью хода, а также строгим совпадением оси волоки и прикладываемого кареткой с захватами тянущей силы, что особенно важно при волочении крупных сечений. Цепные станы просты по конструкции и в эксплуатации, предназначены для пруткового волочения, размер партии может быть минимальным, вплоть до одного прутка. Для волочения прутков и проволоки диаметром от 6 мм и ниже предназначены вертикальные и горизонтальные станы барабанного типа (рис.3.3). Диаметры барабанов зависят от диаметра протягиваемой проволоки, со снижением диаметра материала уменьшается размер барабана. На производстве ОАО «ЦНИИМ» имеются станы как вертикальные, так и горизонтальный, с диаметрами барабанов от 550 мм до 120 мм, что позволяет протягивать проволоку диаметром до 0,4 мм. На стане с горизонтальным барабаном диаметром 420 мм установлен регулятор напряжения, позволяющий менять скорость волочения от 0 до 10 м/мин. Выбор данного волочильного оборудования обусловлен ещё и тем, что высоколегированные сплавы титана, никеля, ниобия, никелид титана и др. в процессе холодной деформации интенсивно упрочняются [14-16]. Данные сплавы весьма чувствительны к скорости деформации, поэтому при их холодном волочении необходимо применять более низкие скорости, чем при волочении стали [16].

Для обеспечения волочения имеется разнообразное вспомогательное и подготовительное оборудование, а также различные печи и установка скоростного электроконтактного нагрева. Данный набор оборудования

позволяет изготавливать проволоку из различных металлических материалов самими малыми партиями, с заданными структурой и свойствами.

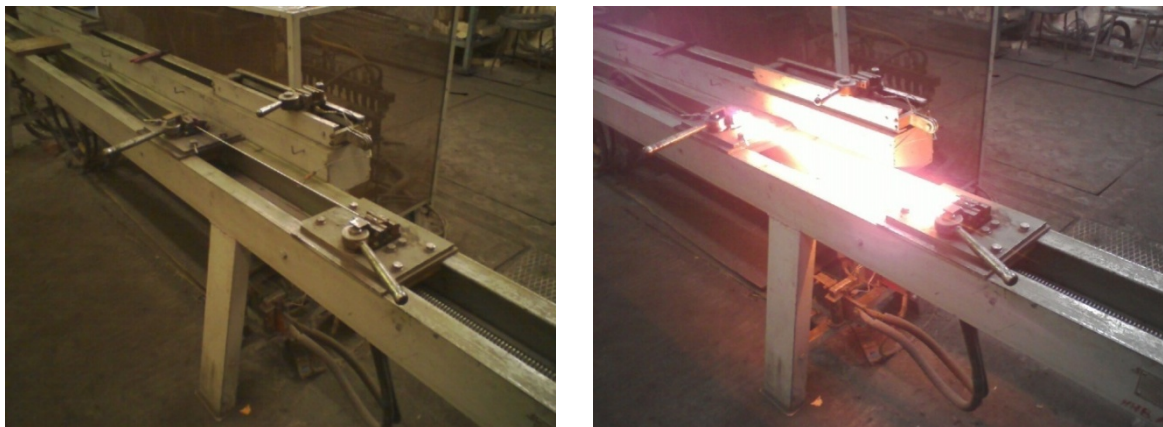


Рис.3.5 Установка электроконтактного нагрева



Рис.3.6 Станок бесцентрового шлифования

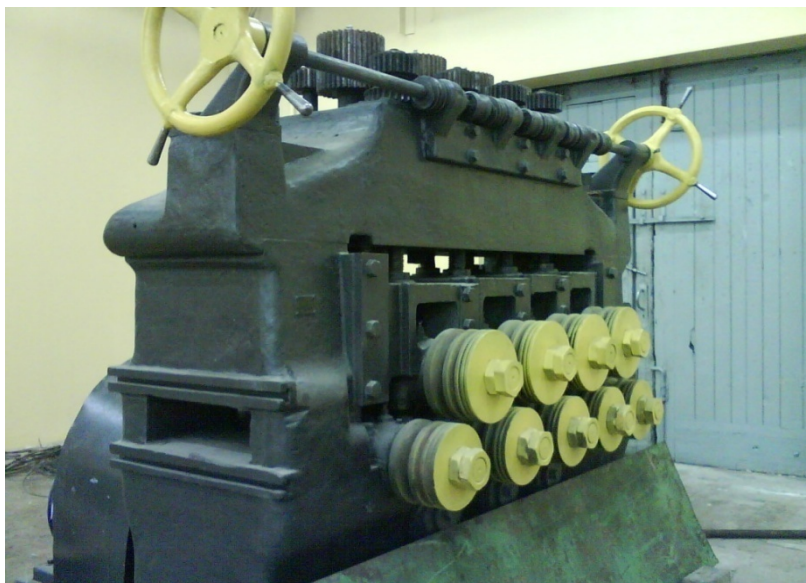


Рис.3.7 Правильная машина



Рис. 3.8 Острильная машина

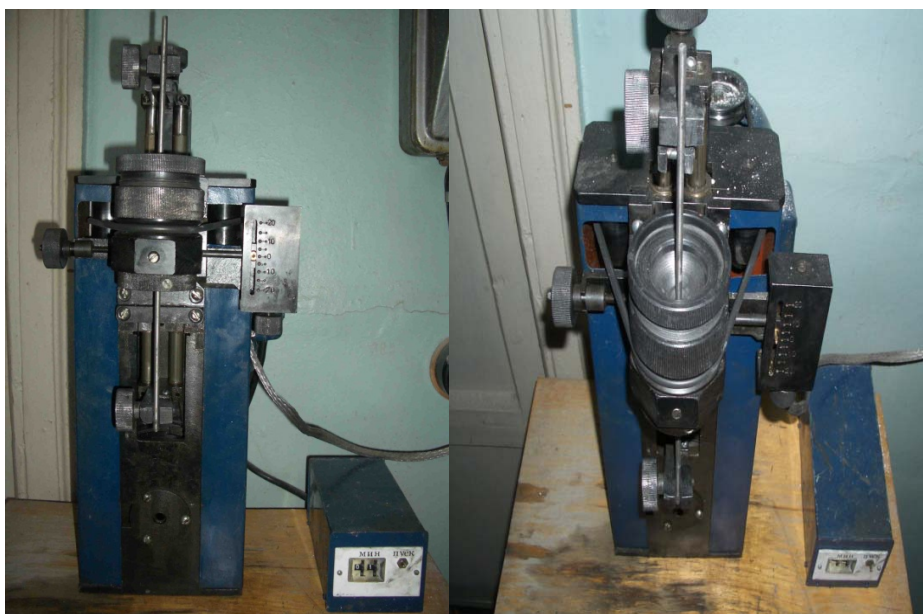


Рис.3.9 Станок для шлифования и восстановления волок

3.1.2. Выбор смазки

Одним из основных вопросов, которые возникают при отработке технологии и производстве проволоки из указанных выше сплавов, является выбор технологической смазки. Все эти сплавы склонны к налипанию на инструмент [14-17], что накладывает дополнительные требования к выбору смазки.

Все существующие способы волочения разделяют по виду применяемой смазки на две группы: мокрое и сухое волочение [18]. Волочение с применением жидких смазок (мокрое волочение) используют, как правило, при производстве проволоки тонких сечений с большими скоростями, чтобы обеспечить стабильные температурные условия проволоки и волоки. Для волочения проволоки больших и средних диаметров (более 3 мм) применяют сухие смазки (по аналогии такой вид волочения называют сухим. Но нельзя путать сухое и мокрое волочение с сухим, граничным и жидкостным видами трения при волочении – см. 1.1.7).

Сухая смазка более эффективна, чем жидкая, поскольку образует толстую смазочную пленку между протягиваемым материалом и инструментом. Волочение при наличии толстой пленки обеспечивает условия, близкие к гидродинамическому (жидкостному) трению. Механизм действия смазки при сухом волочении можно рассматривать как образование и разрушение локальных толстых гидродинамических пленок [18].

Мокрое волочение создает обычно условия граничного трения, что не обеспечивает разделение поверхностей протягиваемого материала и инст-

румента и приводит к их контакту, налипанию, образованию задиров и обрывам проволоки. Различие сухого и мокрого волочения отражается на величинах коэффициента трения [18]. При сухом волочении коэффициент трения находится в диапазоне 0,01 – 0,05 независимо от материалов протягиваемого металла и волокна. При мокром волочении коэффициент трения зависит от природы жидкой смазки, материала и чистоты рабочей поверхности инструмента и колеблется в интервале 0,08 – 0,15.

Наиболее эффективными для волочения материалов, склонных к налипанию на инструмент, являются режимы гидродинамического трения [16,19], которые создаются принудительной подачей смазки (как твердой, так и жидкой) в очаг деформации. При этом между трущимися поверхностями образуется устойчивый смазочный слой, полностью их разделяющий. Наиболее простым и распространенным способом гидродинамического волочения является волочение с использованием сборных (сдвоенных) волокон (см. рис.1.9). Таким способом на ОАО «ОЗТМиТС» («Опытный завод тугоплавких металлов и твердых сплавов») осуществляется волочение ниобиевой проволоки. Для облегчения захвата смазки поверхностью проволоки протягиваемый материал перед проходом подвергают кратковременному отжигу на воздухе при температуре 500 – 600 °С (для образования окисленного слоя с более шероховатой поверхностью), а само деформирование осуществляют на высоких скоростях.

Применение сборных волокон при изготовлении прутков и проволоки из труднодеформируемых сплавов номенклатуры ОАО «ЦНИИМ» не обеспечивает стабильности процесса волочения, поскольку высокие прочностные характеристики этих сплавов требуют более высокого уровня давления смазки перед рабочей волокой. При прорыве смазки в очаг деформации при таких давлениях качество поверхности металла резко ухудшается. Проведение предварительного окисления или иных способов подготовки поверхности под гидродинамическое волочение усложняет технологический процесс. Волочение прутков отличается более низкими скоростями, чем проволоки, что также затрудняет применение сборных волокон.

Для изготовления прутков и проволоки из перечисленных выше сплавов применяются обычные волокна. Однако необходимо подобрать специально твердую смазку, обладающую высокой способностью к сцеплению с деформируемым материалом, эффективную при волочении материалов с высокой прочностью. В ЦНИИМе разработана смазка в виде смеси мелкодисперсного графита и жидкого стекла (водного раствора силиката натрия) [20]. Такую смазку в полужидком виде наносят на поверхность протягиваемого материала тонким равномерным слоем (не более 0,1 мм), а затем просушивают.

Для волочения используются твердосплавные волокна с рабочими углами 9–15°, что обеспечивает захват необходимого количества смазки при

волочении прутков и проволоки с частными деформациями $\varepsilon = 10\text{--}25\%$. Повышение частных деформаций, а также использование волок с большими рабочими углами приводит к выдавливанию смазки из очага деформации, налипанию материала на инструмент, образованию задиров и обрывам проволоки.

Визуальный анализ поверхности прутков, протянутых с данной смазкой, показал, что на них после каждого прохода остается смазочный слой толщиной не менее 0,01 мм. Предложенная смазка достаточно прочная, слой ее не разрушается в процессе волочения и полностью исключает контакт между трущимися поверхностями. При этом шероховатость поверхности холоднотянутых прутков и проволоки из сплавов никеля, титана и ниобия не превышает $Ra\ 1,25$. Смазки разработки ЦНИИМ, состоящие из жидких и твердых компонентов, после сушки образует прочную пленку, и могут обеспечить в очаге деформации эффект, близкий к гидродинамическому трению.

При таком способе волочения предъявляются повышенные требования к качеству рабочих поверхностей обычных волок, как твердосплавных, так и из искусственных алмазов. В таких волоках роль нагнетателя смазки в очаг деформации выполняет внеконтактная часть рабочего конуса волоки. Смазка за счет сцепления с поверхностью проволоки затягивается в очаг деформации. При этом сцепление смазки с поверхностью протягиваемого материала должно быть больше, чем сцепление смазки с поверхностью канала волоки. Чем больше разность этих сцеплений, тем эффективней подача смазки в очаг деформации. Следовательно, чем выше качество рабочей поверхности волоки, особенно в случае волочения проволоки из материалов, склонных к налипанию на инструмент, тем эффективней подача смазки на контактную поверхность очага деформации. Поэтому при изготовлении, ремонте и перешлифовке волок используют специальные станки (рис.3.9). Полировку поверхностей волок осуществляют с помощью алмазных порошков или паст, нанесённых на отрезок проволоки. Пропущенная через волоку проволока совершает возвратно-поступательные движения, а волока вращается вокруг своей оси. Съём материала волоки и качество поверхности определяется временем обработки, а профиль волоки – углом её наклона в станке. В работе [13] отмечено, что рабочая поверхность, отполированная алмазным порошком, увеличивает количество нагнетаемой смазки в 1,5–2 раза по сравнению с волоками, отполированными порошком карбида бора.

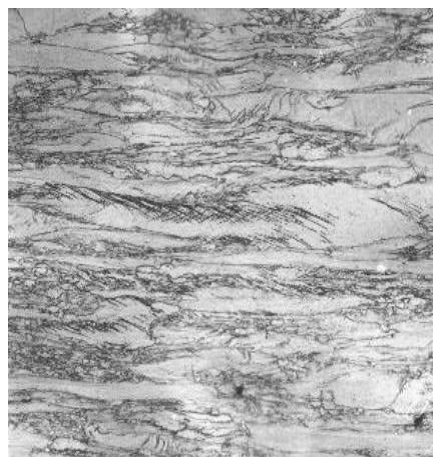
3.1.3. Волочение проволоки из титановых сплавов

Титановые сплавы с термически нестабильной β -фазой, и прежде всего сплав ТС6 (Ti – основа; 10,5% Cr – 7% V – 4% Mo – 3% Al – 1% Zr), в последнее время находят достаточно широкое применение в разных областях машиностроения и, в первую очередь, для изготовления упругих элементов различного типа [4,14]. По сравнению с известными пружинными сталями 60С2А и 65С2ВА титановые сплавы имеют меньшую плотность, низкий модуль упругости, высокие прочностные и упругие свойства, что обеспечивает высокую энергоёмкость пружин (выше стальных примерно в 2 раза). Кроме того, титановые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, морской воде и атмосфере. В качестве пружинных материалов предпочтение имеют β – сплавы в связи с высоким уровнем прочностных и упругих характеристик при их термомеханической обработке. При этом, сплав ТС6 в термоупрочнённом состоянии является самым высокопрочным отечественным титановым сплавом. Кроме того, β -титановые сплавы обладают высокой пластичностью при деформации при комнатной температуре. Образующаяся после закалки ОЦК решетка β -фазы имеет существенно большее число систем скольжения, чем ГПУ решетка α -фазы в α - или $(\alpha+\beta)$ -сплавах. Высокая технологичность сплава ТС6 позволяет проводить его волочение с суммарными деформациями до 75-80% [14], тогда как $(\alpha+\beta)$ -сплавы, например, ВТ16, деформируются волочением вхолостую лишь со степенями не более 40% [21]. Сплав ТС6 имеет высокие значения коэффициента β -стабилизации $K_\beta = 2,5$, молибденового эквивалента упрочнения β -фазы $[Mo]_{\text{экв}} = 27,6$ и алюминиевого эквивалента упрочнения $[Al]_{\text{экв}} = 6$ за счет дисперсионного твердения при выделении α -частиц. Эти показатели находятся на одинаковом уровне с лучшими зарубежными аналогами [22].

Для производства винтовых пружин различного назначения (для кручения, сжатия, растяжения) в широком диапазоне силовых параметров необходимы полуфабрикаты разных сечений (диаметром от 1 мм до 12 мм). Однако промышленностью освоено лишь производство прутков диаметром 8 мм и более. ОАО «Корпорация «ВСПМО-АВИСМА» может поставлять заготовку для волочения в виде механически обработанных прутков диаметром 8 мм. Данные прутки в состоянии поставки имеют однородную рекристаллизованную структуру с зерном 3 балла (рис.3.10, а) и обладают без предварительной термообработки достаточным уровнем механических свойств для волочения: $\sigma_B = 900...950$ МПа; $\sigma_{0,2} = 850...900$ МПа; $\delta=25...30$ %; $\psi = 60...65$ %.



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 3.10 Структуры сплава ТС6, $\times 100$

а. горячекатаный пруток диаметром 8 мм в состоянии поставки

б. волочение $\varepsilon = 60\%$, закалка с температуры 700°C

в. волочение $\varepsilon = 60\%$, закалка с температуры 750°C

г. волочение $\varepsilon = 60\%$, закалка с температуры 800°C

д. волочение $\varepsilon = 60\%$, закалка с температуры 900°C

Особенностью поведения титана и его сплавов при волочении является их склонность к налипанию на волоку вследствие низких антифрикционных свойств металла и сложности создания на поверхности разделительных (подсмазочных) слоев. Кроме того, титановые сплавы, а тем более высоколегированный сплав ТС6, имеют достаточно высокую прочность даже в отожженном состоянии и обладают явно выраженной склонностью к упрочнению при холодной деформации [14,16]. Все это вызывает повышенные усилия деформирования и ставит сплав ТС6 в ряд труднодеформируемых материалов [16]. Для уменьшения усилия волочения и повышения качества поверхности при волочении проволоки из сплава ТС6 применяли разработанную в ЦНИИМ смазку, о которой говорилось выше.

При производстве проволоки малых сечений (до 1мм) волочение осуществляют в несколько пропусков с промежуточными разупрочняющими отжигами. Волочение прутков с диаметра 8,0 мм до диаметра 4,0–5,0мм проводят на цепном стане (рис.3.2) , а дальнейшее – на волочильном стане барабанного типа (рис.3.3). Скорость волочения составляет 2,17; 2,93 и 4,89 м/мин на цепном стане и 1–20 м/мин на станах барабанного типа. В качестве инструмента используют твёрдосплавные волокни с углом заходного конуса 9–15°. При волочении проволоки сечением менее 1,8 мм применяют волокни из искусственных сверхтвёрдых материалов (искусственных алмазов). Частные деформации составляют 8 – 18%.

При проведении разупрочняющих отжигов на воздухе в процессе холодного волочения титановых сплавов не всегда удается избежать нежелательного охрупчивания металла вследствие низкой стойкости его против высокотемпературного окисления. При взаимодействии титана с газами не только образуется окисел на поверхности металла, но и происходит внедрение атомов кислорода, азота в его кристаллическую решетку. Это крайне отрицательно сказывается на качестве и функциональных свойствах изделий [23,24]. Кроме того, при этом в поверхностных слоях происходит изменение фазового состава титанового сплава и перераспределение легирующих элементов, что приводит к структурно-фазовой неоднородности продукции. Надо отметить, что и сам фазовый состав сплава оказывает определенное влияние на процессы их взаимодействия с газами. Сплавы со значительным количеством β -фазы значительно меньше взаимодействуют с газами в интервале температур до 900°С , чем сплавы с α -структурой [24]. Сплав ТС6, являющийся псевдо β -сплавом[22], отличается более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с другими титановыми сплавами.

Одним из технологических приёмов, уменьшающих отрицательное воздействие газонасыщения, является скоростная термическая обработка сплава, многократно снижающая, прежде всего, продолжительность нахождения материала при высоких температурах. Достоверно установлено,

что процесс взаимодействия титана с газами определяется диффузионными процессами в поверхностной зоне [24]. Диффузия азота, кислорода, углерода происходит только в поверхностном слое, глубина которого зависит от температуры и продолжительности взаимодействия с воздухом. Водород же, как быстро диффундирующий элемент, равномерно распределяется по всему объему и газонасыщенного слоя не образует.

Из всех газовых элементов решающее влияние на свойства при термообработке оказывает кислород. Применение скоростной термической обработки уменьшает эффект взаимодействия с газами, прежде всего с кислородом. При скоростном нагреве существенно увеличиваются пластические свойства сплава [24].

После ряда единичных пропусков требуется разупрочняющий отжиг металла. Обычно при отжиге после нагрева осуществляют охлаждение на воздухе, но при этом скорости охлаждения на мелких изделиях очень велики, поэтому в литературе по волочению мелких профилей эту технологическую операцию чаще называют закалкой. При волочении титановых сплавов мы будем также называть разупрочняющий отжиг закалкой. Электроконтактный скоростной нагрев при такой закалке обладает рядом преимуществ по сравнению с другими способами нагрева. Он прост и обеспечивает высокое качество поверхности прутков и проволоки. Кроме того, он обеспечивает оксидирование очень тонкого поверхностного слоя с минимальными последствиями для структурно-фазового состава сплава. Это позволяет существенно повысить качество и износостойкость поверхности проволоки, что очень важно при её последующем волочении. Авторам [25], используя скоростной нагрев для оксидирования, удалось повысить износостойкость сплава ВТ9 почти в 2 раза. Подбором режимов скоростного электроконтактного нагрева можно уменьшить или совсем исключить образование окислов на поверхности.

Кроме того, исследования в области фазовых и структурных превращения при скоростном нагреве некоторых 2-х фазных титановых сплавов [24] позволило установить ряд важных закономерностей для теории фазовых превращений в неравновесных условиях:

1. Смещение температурного интервала $\alpha+\beta\rightarrow\beta$ превращения в область более высоких температур, что при ускоренном нагреве является общей закономерностью.

2. При скоростях нагрева вплоть до 1500 °C/с $\alpha+\beta\rightarrow\beta$ превращение протекает по диффузионному механизму.

3. Скоростной нагрев позволяет эффективно управлять концентрацией составляющих β -твердого раствора и тем самым формировать особые структурные состояния в закаленных титановых сплавах.

Основное влияние скоростной нагрев оказывает на рекристаллизацию сплавов с β -структурой. Высокие пластические характеристики материала в закалённом β -состоянии обеспечиваются при формировании в сплаве мелкозернистой структуры с размером зерна, не превышающим 25 – 30 мкм. Мелкое зерно, как известно, способствует повышению пластичности материала, что очень важно при волочении проволоки. Наиболее эффективным способом получения равноосной мелкозернистой структуры в β -титановых сплавах является холодная деформация и последующая закалка после скоростного нагрева [26].

Вопросам полигонизации и рекристаллизации холоднодеформированных листовых β -сплавов, прежде всего сплава ВТ15, при быстром нагреве посвящена серия работ [27-30]. Авторами данных работ показано, что при проведении закалки от одинаковых температур в случае контактного электронагрева размер зерна меньше, чем при обычном печном нагреве. Увеличение скорости электроконтактного нагрева уменьшает размер зерна при равных температурах, повышает температуры начала и конца рекристаллизации, скорость рекристаллизации. Однородность структуры в случае скоростного электроконтактного нагрева также выше, чем при печном нагреве. Рассматривая вопрос о влиянии кратковременных выдержек при скоростном нагреве на кинетику рекристаллизации титановых сплавов, установили, что увеличение длительности выдержки при термообработке приводит к снижению температуры прохождения рекристаллизации [26].

В наших исследованиях на сплаве ТС6 также использована установка для электроконтактного нагрева проволоки при ее термообработке. Скорость нагрева на данной установке составляет 60 – 300°C/с и зависит также от сечения проволоки. Максимальная скорость в 300°C/с достигается при термообработке проволоки диаметром 2 мм. Для больших сечений применяются скорости в интервале 60 – 300°C/с. В качестве одного из способов измерения температуры нагрева на данной установке применяется метод тепловизионного контроля с помощью инфракрасных камер (тепловизоров). При правильной настройке и выборе коэффициента излучения этот метод имеет ряд преимуществ: простота, мобильность, стабильность показаний, возможность сохранения результатов измерения. Типичная термограмма, снятая после закалки проволоки из сплава ТС6, представлена на рис.3.11.

На рис.3.10 приведены полученные нами в сплаве ТС6 характерные структуры, формирующиеся в проволоке после холодного волочения из прутков диаметром 8 мм, затем скоростного нагрева (60 °C/с) до различных температур под термообработку, выдержки в течение 10 секунд и охлаждения на воздухе. Данные показали, что холодное волочения с последующей закалкой позволяет получить мелкозернистую структуру.

При изготовлении тонкой проволоки из сплава ТС6 в условиях мелко-серийного производства промежуточную термическую обработку холоднодеформированного материала также проводят на установке электроконтактного скоростного нагрева (см. рис. 3.5). Промежуточную закалку проводят, как правило, при температуре 780–800 °С. Температура нагрева назначена таким образом, чтобы получить однофазное β -состояние с мелким зерном. Температура полиморфного превращения сплава ТС6 составляет 780–810 °С, а перегрев выше данных температур приводит к росту размеров и степени неоднородности зерна, которые происходят в результате вторичной и собирательной рекристаллизации (рис. 3.10).

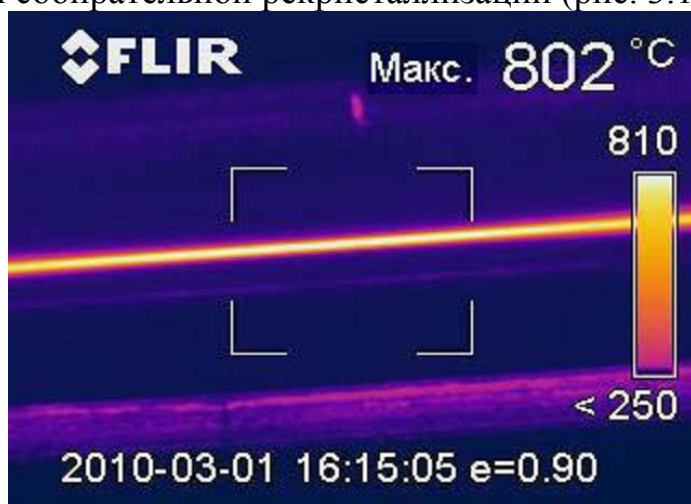


Рис. 3.11 Термограмма закалки проволоки из сплава ТС6

Одним из основных показателей технологичности материала при волочении является склонность к упрочнению при холодной деформации. Для оценки показателя упрочнения, а также определения степени суммарной деформации, при которой необходима закалка металла, строят кривые упрочнения. Механические свойства определяют по результатам испытаний на растяжение. При производстве проволоки представляет интерес исследование свойств материала не на стандартных образцах, а на отрезках проволоки, отобранных при различных степенях деформации. Очевидно, что при растяжении проволоки характеристики пластичности будут занижены по сравнению с испытанием стандартных образцов на разрывных машинах, однако эти результаты будут отражать реальнее свойства протягиваемого материала. На рис 3.12, а представлены зависимости механических свойств проволоки из сплава ТС6 от степени холодной деформации при волочении с диаметра 8 мм из горячекатаного состояния до диаметра 4 мм.

Анализ кривых упрочнения при волочении показывает, что с увеличением суммарной степени деформации ε до 25–30 % прочностные характеристики металла интенсивно возрастают до значений $\sigma_b = 1250$ и $\sigma_{0.2} = 1240$ МПа.

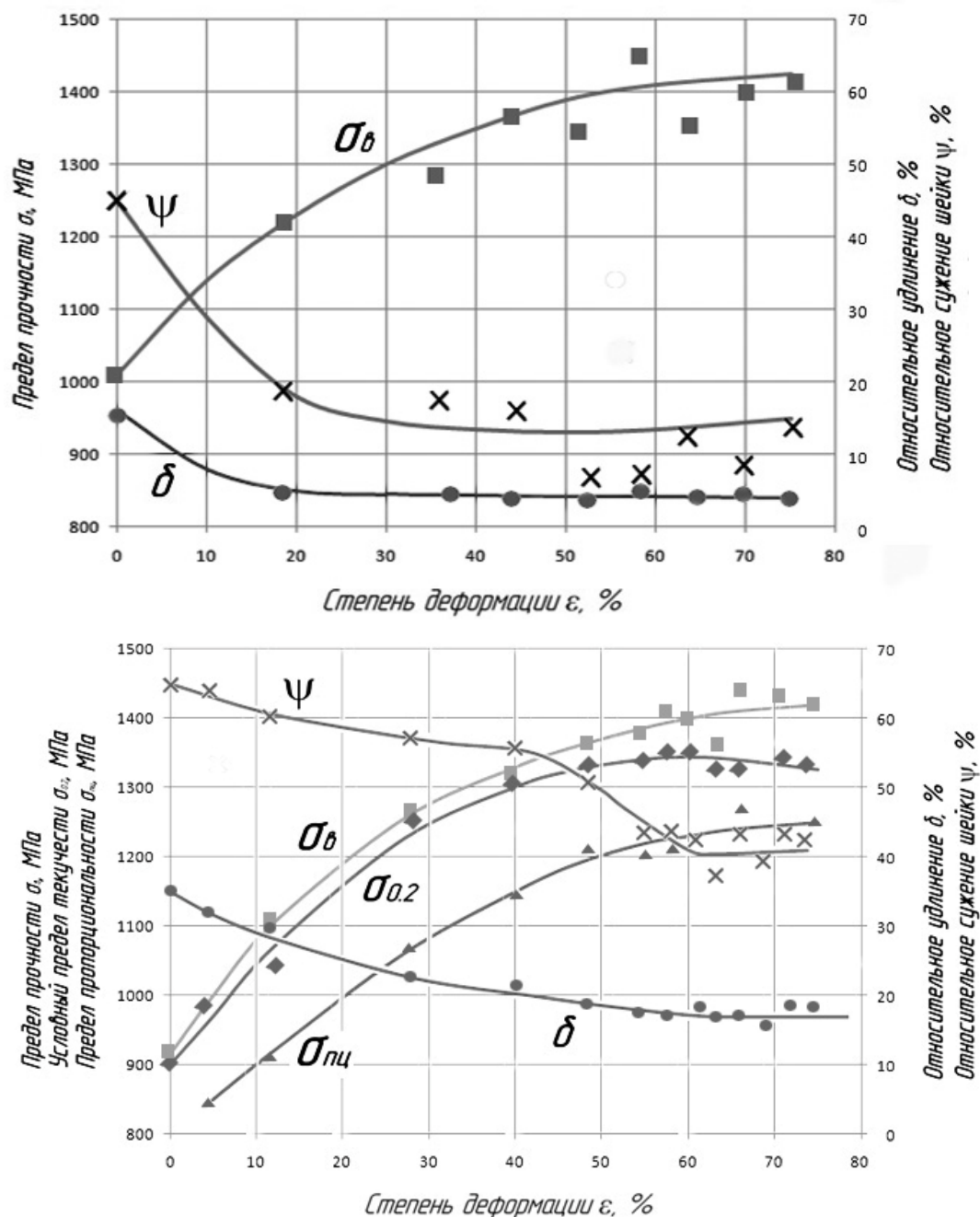


Рис.3.12 Зависимость механических свойств проволоки из сплава ТС6 от степени холодной деформации.

а- волочение из горячекатаного состояния

б- волочение после промежуточной закалки с температуры 800 °С ,
скорость нагрева 60 °С/с

При последующем волочении указанные характеристики продолжают расти менее интенсивно. Предел прочности достигает максимального значения $\sigma_b \approx 1400 - 1430$ МПа при $\varepsilon = 70-75$ %, а предел текучести – 1350 МПа при $\varepsilon \approx 60\%$. Имеется тенденция к снижению скорости роста прочностных характеристик с увеличением степени деформации. Предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ также растёт с увеличением степени суммарной деформации.

Пластические свойства проволоки в процессе волочения снижаются. Относительное удлинение δ с увеличением степени деформации уменьшается от $\delta \approx 25$ % (в состоянии поставки) до значения 7 – 8 % при степени деформации $\varepsilon = 50 - 75$ %. Относительное сужение шейки ψ в интервале степеней деформации $\varepsilon = 0-20\%$, падает от $\psi = 65\%$ до $\psi \approx 55\%$ а затем в интервале $\varepsilon = 20-40\%$ оно не меняется и при более высоких деформациях ($\varepsilon = 55-75$) опять снижается до минимальных значений $\psi = 38-43$ %. Следует отметить, что ниже 38 % значение относительного сужения шейки не опускается.

Особенность титановых сплавов, связанная с резким снижением данной характеристики на первых проходах при волочении и затем её неизменность при последующем волочении, замечена довольно давно [16]. Однако считается, что более правильной характеристикой пластичности титана является относительное сужение шейки. Данное положение подтверждается также результатами наших испытаний.

Известно, что изменение механических свойств материала при деформировании определяется эволюцией его дислокационной структуры. Как показано в работах [31,32], посвященных исследованию листов из сплава ТС6, при холодной прокатке из рекристаллизованного β -состояния с малыми степенями ($\varepsilon = 10$ %) в сплаве ТС6 имеет место сильная неравномерность деформации, иногда даже внутри одного зерна. Наряду с плоскими скоплениями дислокаций, окруженными свободными от дислокаций полями, наблюдаются большие участки, заполненные дислокациями. При деформации 20% образуется ячеистая структура с размером ячеек 0,5–0,7 мкм. Повышение степени деформации до 40% приводит к резкому росту плотности дислокаций.

Подобной эволюцией тонкой структуры можно объяснить характер полученных зависимостей механических свойств проволоки от степени деформации. Монотонное повышение плотности дислокаций и образование плоских скоплений приводит к достаточно интенсивному упрочнению на первых проходах. Образование ячеистой структуры вызывает снижение интенсивности упрочнения проволоки и появление площадки на кривой зависимости величин сужения шейки от степени деформации в интервале 25 – 40%. При холодной деформации с $\varepsilon \approx 40\%$ плотность дислокаций сильно возрастает, что приводит к снижению пластичности до $\psi = 38-43$ % и

$\delta = 5\text{--}7\%$ с некоторой тенденцией к росту в области высоких степеней, что характерно для ОЦК материалов [33]. Можно предположить, что формирование ячеистой структуры происходит в области более высоких степеней деформации (30–40%), что обусловлено более крупным зерном рекристаллизованной структуры, созданной при горячей прокатке исходных заготовок (рис.3.10, а). Формирование ячеистой структуры в области более высоких степеней деформации (20–40%) было обнаружено в закаленном сплаве титановом сплаве с добавками $Al = 3\%$, $V = 13\%$ и $Cr = 11\%$ [34].

Как отмечалось выше проволоку малых сечений (диаметром до 1,0 мм) из заготовки диаметром 8,0 мм изготавливают многократным волочением с промежуточными операциями закалки от температур рекристаллизации. На рис. 3.12, б представлены результаты испытаний проволоки, продеформированной с диаметра 2 мм до диаметра 1 мм, суммарная степень деформации при этом составила 75%. В процессе волочения разрушений проволоки не обнаружено. Как видно, в случае волочения после промежуточной закалки с температуры рекристаллизации характер зависимости предела прочности от степени деформации такой же, как при волочении из состояния поставки (после горячей деформации). Имеет место интенсивный наклёп при деформации до 50% с выходом на площадку при более высоких степенях деформации. Причём, кривая упрочнения при волочении закаленной проволоки при малых степенях деформации проходит параллельно и выше аналогичной кривой при волочении из горячекатаного состояния. При высоких степенях деформации (более 60%) обе кривые выходят на единый уровень прочности 1400–1430 МПа.

На рис.3.10 представлены микроструктуры сплава ТС6 в различных состояниях. Видно, что после промежуточной рекристаллизации в сплаве формируется более мелкозернистая структура по сравнению с исходной даже при температуре 900°С. Более мелкое зерно дает меньше пространства для пробега одиночных дислокаций, создаёт предпосылки для более раннего образования дислокационных скоплений и т.п., что приводит к более высокому уровню прочности. При высоких степенях деформации в материале плотность дислокаций достигает максимального уровня, независимо от размера исходного зерна, поэтому в обоих случаях материал имеет одинаковую прочность (рис.3.12).

Несколько иной характер имеют зависимости пластических свойств от степени холодного волочения. Значения относительного удлинения и сужения шейки интенсивно снижаются после 20% деформации до 2–3% и 14–18% соответственно и затем практически не меняются. В принципе, это типично для высоколегированных высокопрочных титановых сплавов, однако настораживают слишком низкие величины характеристик пластичности.

Полученное низкое значение пластичности объясняется, скорее, отличием методики испытаний стандартных образцов от испытаний образцов малых сечений. На малых образцах показатели пластичности всегда ниже, чем на стандартных образцах. Стандартное же значение пластичности, видимо, и на малых образцах остается достаточно высоким. Это подтверждается также тем, что реальное волочение проволоки малых сечений (вплоть до 0,5 мм) проходит без разрушений и, как правило, без трещинообразования.

Таким образом, из приведённых результатов исследований следует, что:

- сплав обладает ресурсом пластичности, достаточным для его волочения со степенями суммарной деформации до 75%;
- существенное упрочнение материала происходит на начальных стадиях волочения;
- промежуточные термообработки (закалку) необходимо проводить при 50–70 % суммарной деформации,
- проведение скоростного нагрева после многократного холодного волочения с промежуточными закалками приводит к формированию равномерной мелкозернистой структуры.

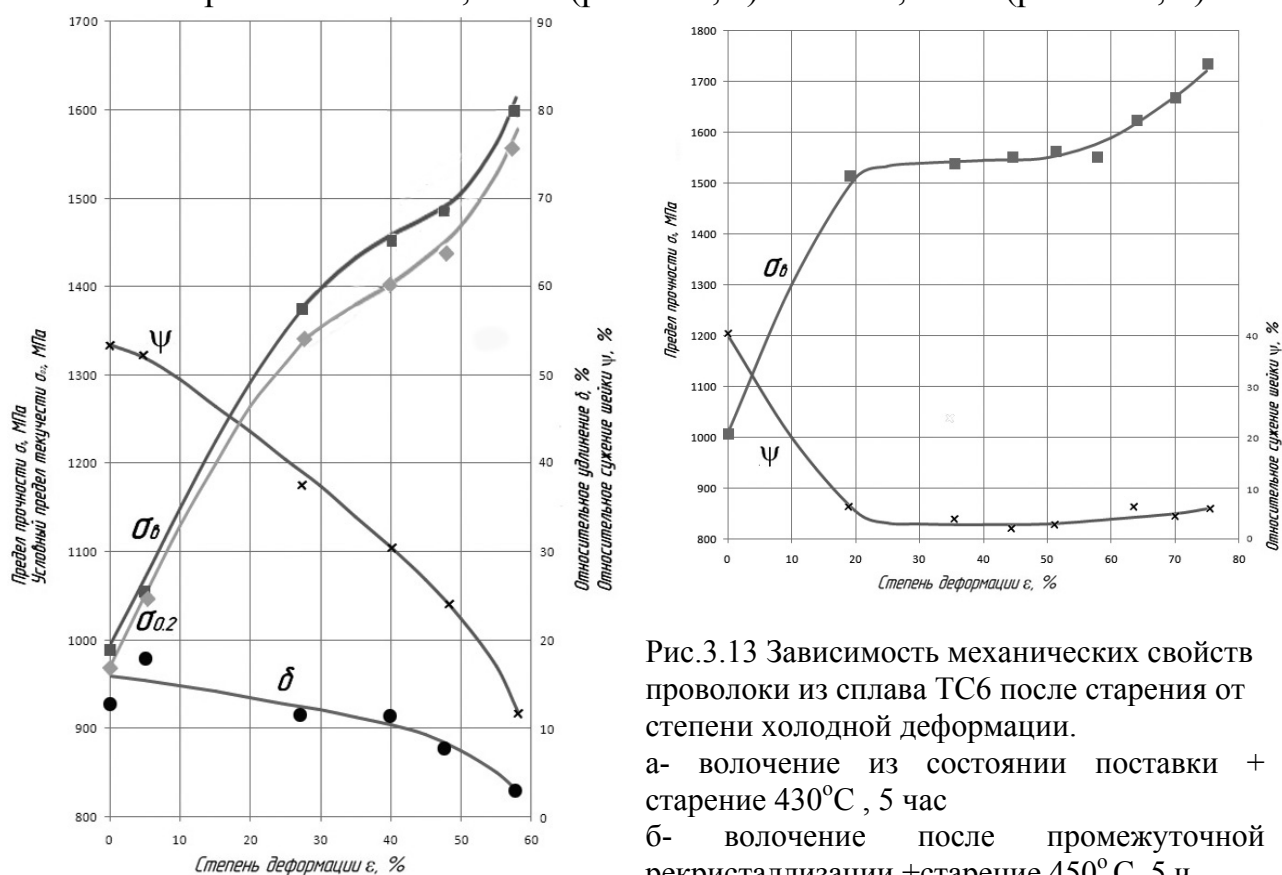
Известно, что окончательные механические характеристики материала определяются его структурой, которая полностью зависит от термомеханических режимов его обработки [35–38]. Основной вклад в формирование структуры вносит пластическая деформация [39]. Поскольку в общем случае термомеханическая обработка (ТМО) представляет собой сочетание пластической и термической обработок в различных комбинациях [38], то холодное волочение проволоки с промежуточными термическими обработками является примером использования ТМО. В большей степени это относится к производству пружин из метастабильных сплавов.

При изготовлении пружин из сплава ТС6 используются самые различные режимы ТМО, сочетающие в себе операции термообработки, волочения, старения и другие, что позволяет получать широкий спектр свойств этих сплавов и готовых изделий. Важно при этом обеспечить высокий запас технологической пластичности пружинного полуфабриката для навивки пружин и условия для эффективного упрочнения самих пружин. Структура металла и механические свойства после волочения должны обеспечить также условия для заключительной упрочняющей обработки – старения. Таким образом, волочение является одним из инструментов формирования служебных свойств как полуфабриката, так и конечного изделия – пружины.

В холоднодеформированном состоянии резко снижается устойчивость метастабильной β -фазы, что позволяет для достижения требуемого уровня прочностных характеристик существенно сокращать время выдержки при старении и снижать температуру старения, например, с 480–500 °С в течение

ние 25 часов до 425–450 °С в течение 4 – 6 часов [14,21,26,31,40]. Холодная деформация вызывает выделение при старении более дисперсных частиц α -фазы, чем в случае термоупрочнения закалённых рекристаллизованных β -сплавов. Дисперсность выделяющейся α -фазы и, следовательно, эффективность старения определяются степенью деформации.

Представляет интерес исследование полноты распада в процессе старения β -твёрдого сплава ТС6 от степени предварительной холодной деформации волочением. Это видно на результатах испытания механических свойств сплава в состаренном состоянии после холодного волочения с различными суммарными степенями деформации [4,14,21]. На рис. 3.13 представлена зависимость механических свойств проволоки после обработки по режимам 430°С, 5 час (рис.3.13, а) и 450°С, 5 час (рис. 3.13, б)

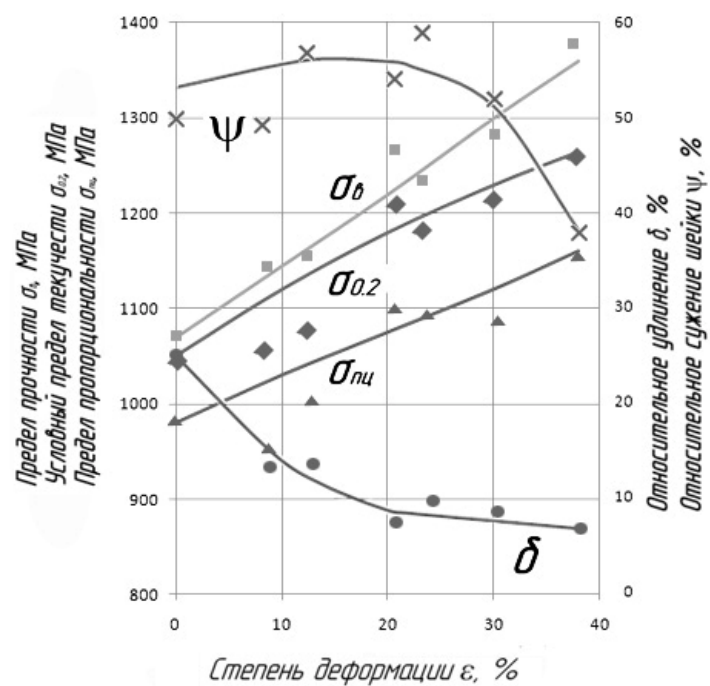


от степени предварительной холодной деформации. Старению подвергались образцы проволоки, протянутой из исходного горячекатаного состояния, свойства которой после волочения представлены на рис. 3.12, а, и после промежуточной рекристаллизации, свойства которой представлены на рис. 3.12, б. Как следует из приведённых зависимостей, холодная деформация существенно повышает скорость распада твёрдого раствора. Даже при выдержке 5 часов при незначительных температурах в обоих случаях происходит заметное повышение прочностных характеристик. После ста-

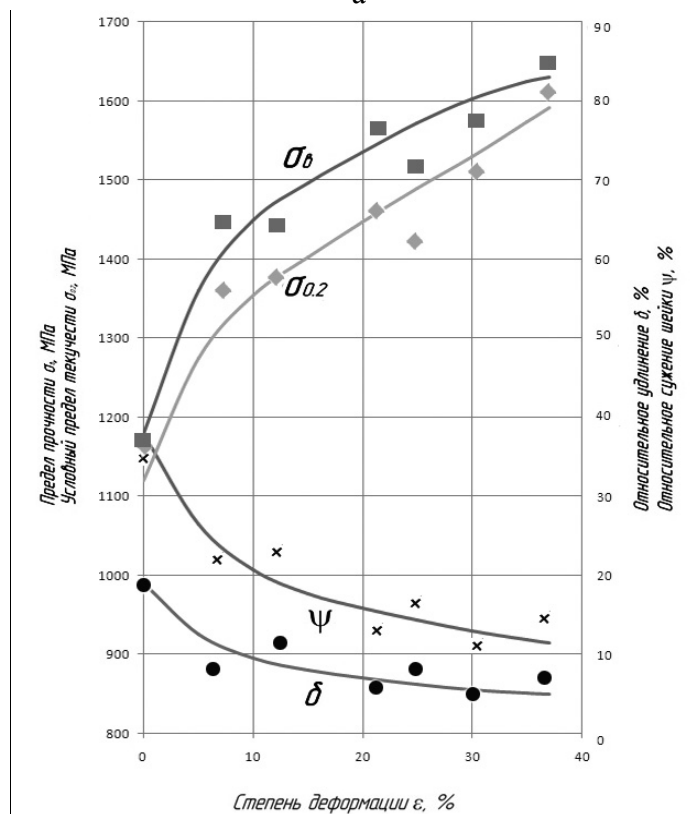
рения проволоки, продеформированной в холодную на 60%, достигается высокий уровень прочности в 1600 МПа независимо от структуры исходной заготовки. Исходная крупнозернистая (2–3 балл) структура горячекатаного прутка диаметром 8 мм и мелкозернистая равноосная (5–6 балл) структура после промежуточной закалки проволоки диаметром 2 мм обеспечивают одинаково высокие свойства. Однако низкая пластичность материала, особенно в случае тонкой проволоки, делает этот вариант термомеханического упрочнения пружин неприемлемым.

О нецелесообразности ТМО β -сплавов на высокую прочность применительно к листам вследствие резкого повышения чувствительности к надрезу отмечалось ранее в работах [26,41,42], а в работе [31] говорится о возможности зарождения под нагрузкой трещин в местах дислокационных скоплений в сплаве ТС6, продеформированном в холодную с большими степенями. Структура β -сплавов в деформированном состоянии характеризуется неоднородностью вследствие неравномерного и неупорядоченного распределения дислокаций по объёму, что является причиной разброса результатов механических испытаний как в деформированном, так и в состаренном состояниях.

Стабилизация прочности и повышение пластичности может быть достигнута в результате применения иной схемы ТМО. Представляет интерес такой вариант волочения проволоки из сплава ТС6 после проведения промежуточной термообработки при температурах ниже температуры рекристаллизации. Для исследования механических свойств проволоки, протянутой из полигонизованного состояния [14], материал, предварительно деформированный на 60%, подвергали термической обработке способом скоростного электроконтактного нагрева при температуре 700°C. Результаты металлографических исследований показали наличие деформированной структуры после данной термической обработки (Рис.3.10, б). На рис.3.14, а приведены зависимости механических свойств проволоки от степени деформации, из которых видно, что в процессе волочения происходит монотонное упрочнение и снижение относительного удлинения материала, сужение шейки значительно падает лишь после 30% деформации. Следует отметить, что увеличение предела пропорциональности с ростом степени деформации происходит в данном случае менее интенсивно, чем упрочнение материала. Более существенные отличия зависимости механических свойств от степени деформации наблюдаются на материале после старения. Как видно из рис.3.14, б, интенсивность повышения прочности проволоки с ростом степени деформации после старения выше, чем после деформации. При волочении со степенью 37% материал после старения имеет следующие механические свойства: $\sigma_b = 1660$ МПа, $\sigma_{0.2} = 1615$ МПа, $\psi = 17\%$, $\delta = 5\%$. Наибольшее же упрочнение материала при старении наблюдается после предварительного волочения из



а



б

Рис.3.14 Зависимость механических свойств проволоки из сплава ТС6 при волочении из полигонизованного состояния.

а- деформированное состояние

б- деформация + старение 430°С, 5 час

полигонизованного состояния с малыми деформациями ($\epsilon = 5\text{--}10\%$). Так, при волочении проволоки со степенью 8% прирост предела прочности и предела текучести в результате старения составляет около 310–320 МПа. При этом, материал имеет вполне приемлемые значения механических свойств: $\sigma_B=1450$ МПа, $\sigma_{0,2}=1360$ МПа, $\psi=21\%$, $\delta=8\text{--}11\%$.

В работах [31,32] подобный факт, наблюдаемый при исследовании дислокационных структур и свойств холоднокатаных листов из сплава ТС6, объясняется особенностями полигонизованной структуры, деформированной с малыми степенями. По данным [31] после отжига при температуре 700°C в сплаве формируется субзёрненная полигонизованная структура. Тело субзёрен практически свободно от дислокаций, границы раздела состоят из дислокационных сеток. Разориентировка субзёрен составляет 10–40 мин ($2\text{--}3^\circ$ по данным [43]). Такая структура способствует при малых деформациях более равномерному распределению дислокаций, на которых при последующем старении зарождаются равномерно распределённые частицы α -фазы, что приводит к существенному упрочнению сплава ТС6 с сохранением достаточно высокой пластичности.

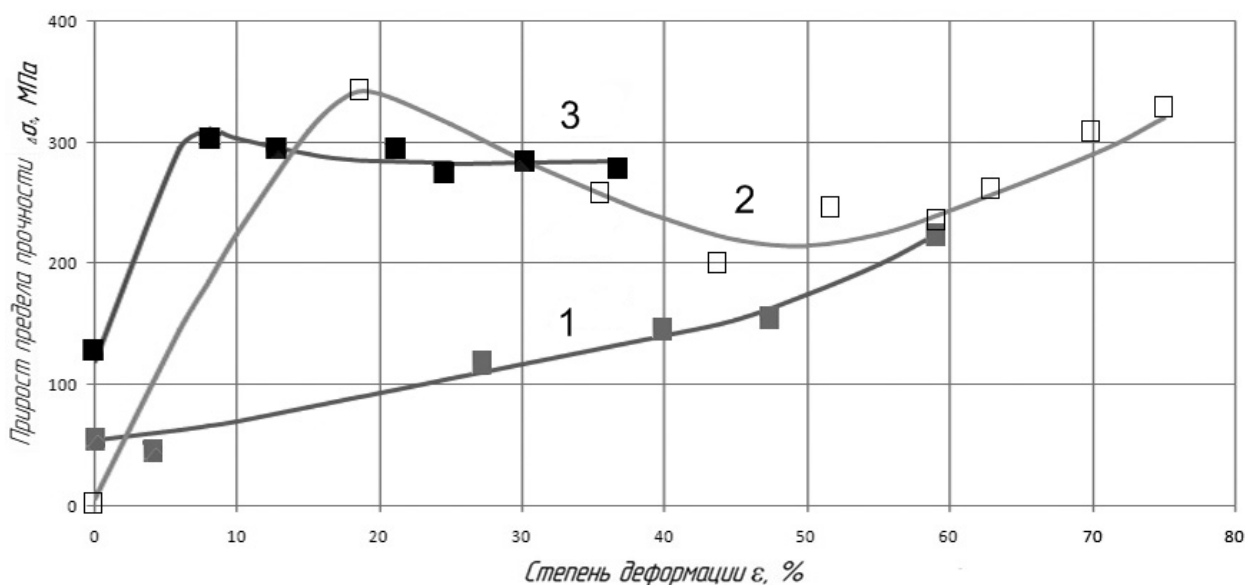


Рис.3.15 Прирост предела прочности сплава ТС6 после старения в зависимости от степени предварительной холодной деформации

- 1- волочение из горячекатаного состояния ($\varnothing 8$ мм)+ старение 430° С , 5 час
- 2- волочение после промежуточной закалки ($\varnothing 2$ мм) + старение 450° С , 5 час
- 3- волочение из полигонизованного состояния после промежуточной дорекристаллизационной закалки ($\varnothing 5$ мм) + старение 430° С , 5 час

Следует отметить, что в процессе старения деформированных образцов при таких незначительных температурах (430–450 °С) плотность дислокаций не снижается. Но высокая прочность проволоки после волочения с большими степенями деформации и старения обусловлена не только де-

формационным наклёпом, но и распадом твёрдого раствора с выделением α -фазы. Для оценки вклада в прочностные характеристики распада β -фазы построены зависимости прироста предела прочности сплава ТС6 после старения в зависимости от степени предварительной холодной деформации (рис.3.15). Отсутствие прироста прочности на кривой 2 в нулевой точке свидетельствует о том, что при низких температурах в рекристаллизованной закаленной проволоке β -фаза стабильна, и распада не происходит. Незначительное упрочнение сплава при отсутствии холодной деформации (нулевая точка кривая 1) в процессе старения горячекатаного прутка в состоянии поставки связано с дефектностью горячекатаной структуры. Оптимальным режимом старения для данного состояния является режим старения 480–500°С, 25–30 часов. Одинаковый прирост прочности после старения деформированной со степенями 60% и выше проволоки по варианту 1 и 2 обусловлен примерно одинаковой плотностью дислокаций в деформированном состоянии независимо от микроструктуры перед волочением. Представляет интерес наличие максимумов на кривой 2 при $\varepsilon = 19\%$ и на кривой 3 при $\varepsilon = 9\%$. Очевидно, полнота распада β -фазы обусловлена особенностями дислокационной структуры, сформированной при данных деформациях из указанных состояний.

Приведённые примеры ТМО β -сплава ТС6, реализованные на оборудовании ОАО «ЦНИИМ», свидетельствует как о больших перспективах применения этого сплава в качестве пружинного и конструкционного материала, так и в целом о широких технологических возможностях мелкосерийного производства.

3.1.4. Волочение проволоки из жаропрочных сплавов на никелевой основе

К жаропрочным сплавам на никелевой основе необходимо отнести прежде всего сплавы ХН77ТЮР (ЭИ437Б) и ХН70МВЮ-ВД (ЭИ828-ВД). Данные материалы, производство которых освоено заводом «Электросталь», имеют самое разное назначение, в том числе в качестве пружинных материалов при температурах 500°С (ЭИ437Б) и 700–900°С (ЭИ828-ВД). Однако «Электросталь» выпускает из сплава ХН77ТЮР проволоку диаметром 4 мм, а из сплава ХН70МВЮ-ВД – лишь горячекатаный прутки диаметром 14 мм и более. Более мелкие размеры прутков и проволоки производятся на минизаводах. При этом основной технологической операцией является волочение.

Приведём пример волочения проволоки диаметром 1,0 мм из сплава ЭИ437Б. Максимальной пластичностью данный сплав обладает после закалки с температуры 1080°С. Из этого состояния он успешно деформируется в холодную. В условиях ЦНИИМ волочение проволоки диаметром

1,0 мм из сплава ЭИ437Б проводят на стане барабанного типа (см. рис. 3.3) со скоростью 10 м/мин в твёрдосплавных волоках. Маршрут волочения представлен в табл. 2. Промежуточная термическая обработка проводится после деформации 75% при температуре 1080 °С в электропечи в течение 30 мин, охлаждение в воде. При волочении сплав ЭИ437Б интенсивно упрочняется с $\sigma_b = 650$ МПа в закаленном состоянии до $\sigma_b = 1700$ полигонизованного 1800 МПа при $\varepsilon = 75\%$.

Таблица 2

Маршрут волочения проволоки из сплава ЭИ437Б

Диаметр, мм	4,0	3,6	3,3	3,0	2,75	2,5	2,3	2,15	2,0
Степень частной деформации %	0	19,0	15,9	17,4	16,0	17,4	15,4	12,6	13,5
Степень суммарной деформации, %	0	19,0	31,9	43,8	52,7	60,9	66,7	71,1	75,0
Диаметр, мм	2,0	1,8	1,65	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
Степень частной деформации %	0	19,0	16,0	17,4	12,9	13,8	14,8	16,0	17,4
Степень суммарной деформации, %	0	19,0	31,9	43,8	51,0	57,8	64,0	69,8	75,0

С увеличением степени деформации при волочении повышается интенсивность фазовых превращений. С увеличением степени деформации растёт предел прочности проволоки при температурах до 500–600 °С. При более высоких температурах (700 °С) предел прочности снижается тем интенсивней, чем выше степень холодной деформации проволоки. Наименьшую тенденцию снижения жаропрочности имеет проволока, деформированная со степенью 40–60%. Проволока и пружины из сплава ЭИ437Б обладают высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, в том числе и при рабочих температурах.

Жаропрочный сплав ЭИ828-ВД (70Ni - 10Cr - 10Mo - 5W - 4Al) работоспособен кратковременно при температурах до 900°С и длительно при температурах до 750°С [4,44-46]. Основной причиной, сдерживающей широкое применение сплава, в том числе в качестве пружинного материала, был тот факт, что данный сплав выпускался и выпускается в настоящее время промышленностью только в виде горячекатаного прутка и только сечением более 14 мм. Попытки снижения диаметра катаного прутка не привели к положительному результату. При уменьшении диаметра катаного прутка происходит «захлаживание» подката и, как следствие, его разрушение. Охрупчивание материала обусловлено распадом γ - твердого раствора при температурах деформации ниже 1050 °С [47]. Деформирование его в тёплую также не приводит к положительному результату. В силу специфики своего структурно-фазового состава данный сплав может успешно деформироваться только либо в горячем, либо в холодном состоянии.

Единственным способом получения продукции малых сечений является холодное волочение. Горячекатаные прутки после термической обработки с использованием скоростного электроконтактного нагрева (рис.3.5) обладают достаточным запасом пластичности для последующего волочения. На рис.3.16 представлена зависимость механических свойств сплава от степени холодной деформации при волочении с диаметра 14 мм. Как видно, сплав ЭИ828-ВД успешно деформируется волочением в холодную с достаточно большими степенями. Волочение протекает стабильно, без обрывов, несмотря на интенсивное упрочнение материала.

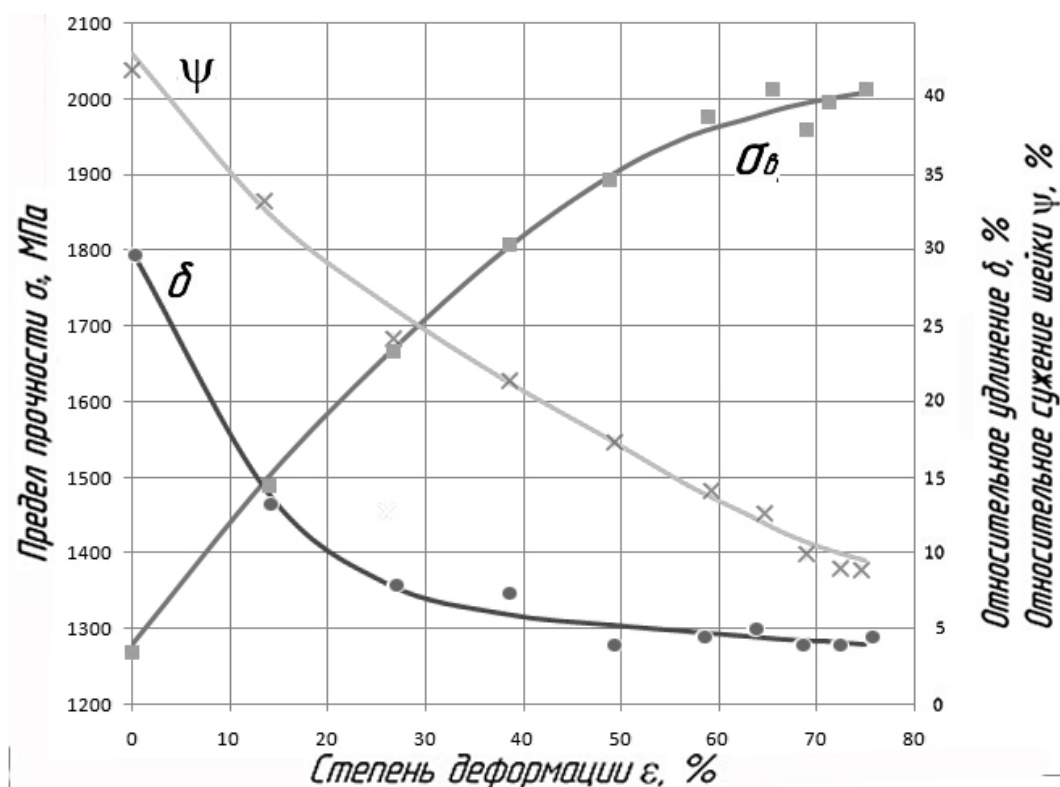


Рис.3.16 Зависимость механических свойств сплава ЭИ828-ВД от степени холодной деформации

Анализ кривой упрочнения при волочении показывает, что предел прочности σ_b с увеличением суммарной степени деформации ϵ от 0% до 65% интенсивно возрастает с $\sigma_b=1290$ МПа до $\sigma_b=2000\text{--}2030$ МПа и выходит на площадку при деформациях $\epsilon = 65\text{--}75$ %. Пластические свойства проволоки в процессе волочения монотонно снижаются. Относительное удлинение δ с увеличением степени деформации уменьшается с $\delta \approx 30$ % (после закалки) до значения 4–5 % при волочении со степенью деформации $\epsilon = 50\text{--}75$ %. Относительное сужение шейки падает с $\psi = 45\%$ до значения 8–10% при максимальных степенях деформации.

Однако при изготовлении проволоки волочением с промежуточными печными термообработками на поверхности проволоки появляются трещины. Причиной их образования являются напряжения, возникающие при распаде твердого раствора с выделением избыточной γ' - фазы, происходящем в процессе промежуточной разупрочняющей термообработки (закалки) холоднотянутого материала. Предотвращение или торможение распада твердого раствора возможно за счет сокращения времени нагрева и выдержки при закалке. Одним из путей является замена печного нагрева скоростным электроконтактным.

Установлено [48,49], что при переходе к скоростному нагреву процессы рекристаллизации приобретают ряд особенностей:

1. С увеличением скорости нагрева температурный интервал первичной рекристаллизации смещается в область более высоких температур, что приводит к резкому увеличению скорости процесса.

- 2.Размер зерна, полученный к моменту окончания первичной рекристаллизации, тем меньше, чем выше скорость нагрева. В некоторых случаях можно получить зерно в 2–4 раза мельче, чем при печном нагреве.

- 3.Процесс собирательной рекристаллизации существенно подавляется.

Считается [46,48,49], что ускорение рекристаллизации при скоростном нагреве происходит как за счёт повышения температуры, так и за счет того, что при быстром нагреве до температур начала процесса в сплаве сохраняется больше несовершенств, чем при медленном нагреве. Это создаёт дополнительную движущую силу процесса рекристаллизации и, как следствие, увеличение ее скорости. Имеется точка зрения [50], что при больших скоростях нагрева, а, следовательно, при больших скоростях роста границ зародышей примеси меньше тормозят их рост, чем при медленных нагревах. Это может быть дополнительной причиной увеличения скорости протекания рекристаллизации. Таким образом, измельчение зерна при введении скоростного нагрева пропусканием электрического тока обусловлено более сильной температурной зависимостью зародышеобразования по сравнению со скоростью их роста.

Характерной чертой сплава ЭИ828-ВД является интенсивный распад пересыщенного γ - твердого раствора с выделением интерметаллидной γ' - фазы типа Ni_3Al , которая термодинамически устойчива вплоть до 1000°C и характеризуется аномальным сохранением твёрдости с повышением температур. Критический интервал температур, в котором при термообработке происходит интенсивное выделение интерметаллидной фазы и связанное с ним повышение твёрдости, составляет $400\text{--}800^\circ\text{C}$ [46,51]. На рис.3.17 и 3.18 представлены результаты исследования микротвёрдости при степени деформации 20%, 50% и 75% после термообработок по различным режимам как при печном, так и при скоростном электроконтактном нагреве. Немонотонный характер изменения микротвёрдости свидетельствует о том, что при

скоростном (электроконтактном) нагреве разупрочнение происходит при нагреве до температур 600–700°C, а также в интервале 950–1200°C (рис. 3.17). По сравнению с печным нагревом (рис.3.18) при скоростном нагреве верхняя граница температурного интервала разупрочнения сдвигается в сторону высоких температур, а по абсолютной величине прирост твёрдости несколько меньше.

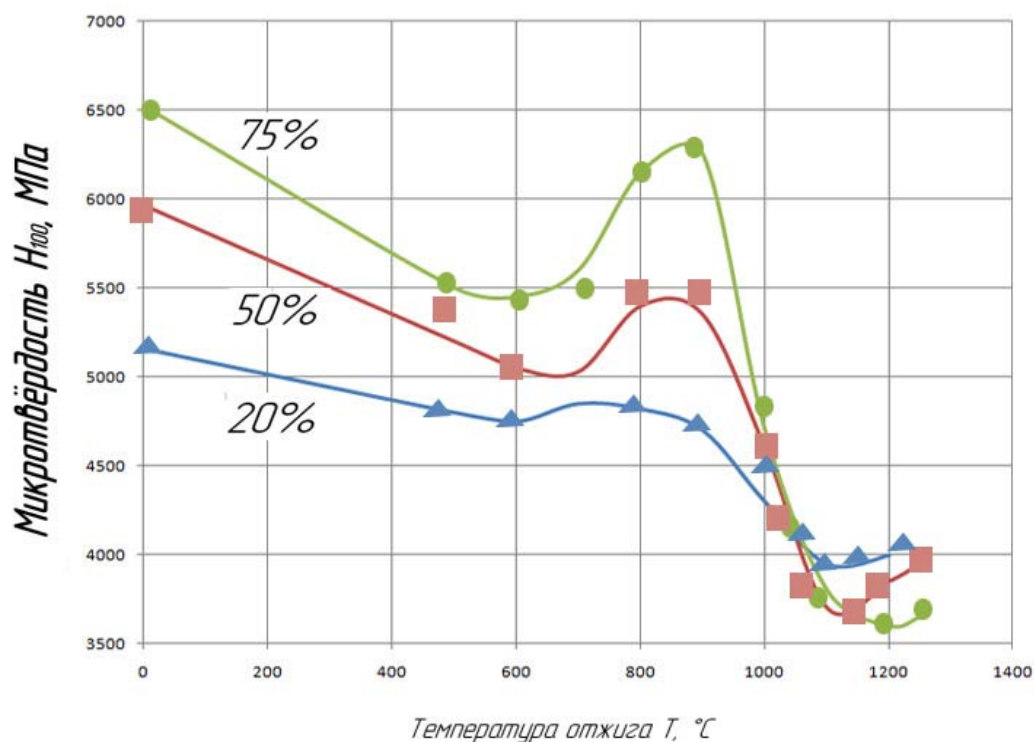


Рис.3.17 Зависимость микротвёрдости сплава ЭИ828-ВД от температуры отжига и степени предварительной деформации (электроконтактный нагрев)

Следовательно, за счет применения электроконтактного нагрева можно подавить процессы распада твердого раствора или сдвинуть их в область более высоких температур. Так, при скоростном нагреве, вследствие доминирования стабилизирующей полигонизации, образуется более мелкозернистая структура, в то время как при печном нагреве из-за преобладания миграции зерен на стадии первичной рекристаллизации происходит заметное огрубление структуры. На стадии собирательной рекристаллизации происходит огрубление структуры для обоих способов нагрева, но при скоростном нагреве температурный интервал собирательной рекристаллизации смещен в сторону более высоких температур.

Изменение механизма разупрочнения в условиях скоростного нагрева по сравнению с печным способствует повышению технологической пластичности. При прочих равных условиях электроконтактный нагрев обеспечивает достижение более высокой пластичности полученных волочени-

ем полуфабрикатов из сплава ЭИ828-ВД. Следует учитывать, что электроконтактный нагрев является не единственным приемом, позволяющим управлять технологической пластичностью жаропрочного сплава.

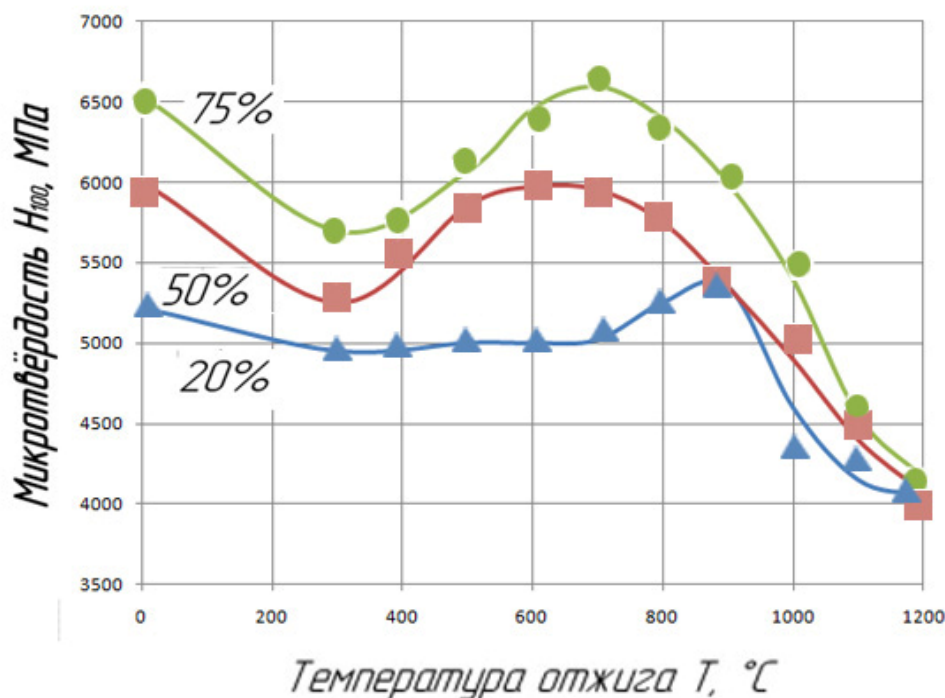


Рис.3.18 Зависимость микротвёрдости сплава ЭИ828-ВД от температуры отжига и степени предварительной деформации (печной нагрев)

Не менее важным является выбор оптимальных температуры отжига и степени деформации с точки зрения их рационального и эффективного сочетания. Необходимо отметить, что именно выделение при последующем старении γ' - фазы (рис 3.19) обеспечивает жаропрочность сплава и эксплуатационные характеристики изделий, в частности, пружин.

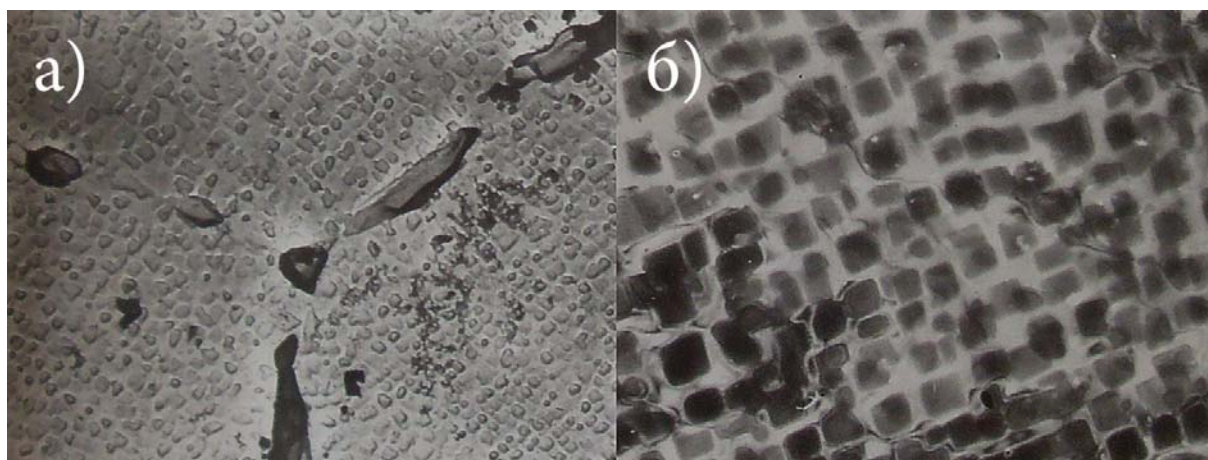


Рис. 3.19 Структура сплава ЭИ828-ВД: а- $\times 10000$; б- $\times 24000$

Старение никелевых сплавов, и, в частности, сплава ЭИ828-ВД происходит по механизму гомогенного зарождения и роста стабильных выделений интерметаллидной фазы, когерентно связанной с матрицей. Интерметаллидные фазы с ГЦК решеткой состава Ni_3Al изоморфны матрице, а периоды решеток матрицы и выделений различаются не более чем на 1%. Частицы такой фазы, равномерно распределённые по всему объёму (рис.3.19), эффективно упрочняют внутризёрненную структуру. Упрочнение границ зёрен достигается выделением карбидов типа Me_6C [52] (рис.3.19, а). Кроме того, карбиды способствуют измельчению зерна, препятствуя собирательной рекристаллизации при высоких температурах, и оказывают рафинирующее влияние на структуру, концентрируя в себе нежелательные примеси.

Соппротивление ползучести сплава ЭИ828-ВД, и, следовательно, релаксационная стойкость пружин зависят от объёмной доли, размера частиц Ni_3Al и расстояния между ними. Объёмная доля γ' - фазы в сплаве ЭИ828-ВД составляет около 30 %, что обеспечивает сплаву длительную прочность $\sigma_{100}^{800} = 420$ МПа. Высокое содержание γ' - фазы обеспечивается введением в сплав до 4,6% алюминия.

Таким образом, проведение промежуточных термообработок методом скоростного нагрева обеспечивает хорошую технологическую пластичность сплава ЭИ828-ВД, а термоупрочнение по схеме закалка + старение – высокие сопротивление ползучести и релаксационную стойкость пружин.

3.1.5. Волочение проволоки из жаропрочного сплава ниобия ЛН-1

В настоящее время сплав ЛН-1 (Nb10V5Mo), один из самых жаропрочных отечественных сплавов на основе ниобия, широко применяется в качестве пружинного материала [4]. Актуальными проблемами являются пластическая обработка сплава, получение полуфабрикатов различных типоразмеров и формирование их механических свойств [15,53–55].

Структура и свойства материала, которые создаются при производстве пружинных полуфабрикатов, должны обеспечивать его навиваемость. Для этого материал должен иметь низкую температуру перехода из пластического состояния в хрупкое. Кроме того, материал должен иметь оптимальные для высокой жаропрочности структуру и фазовый состав в изделии (пружине) после проведения цикла термоупрочнения [15].

Данные требования успешно достигаются также при тепловой ротационной ковке шлифованных прутков [4,5,54,56]. Шлифовка кованых прутков осуществляется на станках бесцентрового шлифования (рис.3.6). Однако методами ротационнойковки невозможно получить прутки диаметром ме-

нее 4,0 мм, шлифование до диаметров 0,5–2,5 мм связано с технологическими трудностями, большими трудозатратами и потерями материала.

Получение полуфабрикатов малых сечений возможно только волочением, и разработка параметров волочения проволоки из сплава ЛН-1 является актуальной. При выборе параметров волочения ранее были исследованы процессы формирования структуры и свойств сплава при холодной деформации [15], а также рекристаллизации проволоки (пружин) [при последующей обработке на твёрдый раствор (ОТР) 57].

В качестве исходных заготовок использовали кованные шлифованные прутки диаметром 3,0–4,5 мм. Волочение проволоки со степенями деформации $\varepsilon = 14\text{--}67\%$ проводили на стане барабанного типа с тянущим усилием до 4 тс с использованием волок с твердосплавными (ВК6, ВК8) вкладышами с рабочими углами $2\alpha = 9\text{--}12^\circ$, применяемых при изготовлении проволоки из тугоплавких и труднодеформируемых материалов. Волочение осуществляют при комнатной температуре с частными деформациями 10–20 %. Увеличение степени частных деформаций более 20% приводит к образованию поперечных трещин и обрыву материала. В качестве смазки используют смесь мелкодисперсного графита и жидкого стекла [20]. Особенностью сплава ЛН-1 является то, что любые виды термической обработки продукции из него необходимо проводить в вакууме не ниже 5×10^{-5} мм.рт.ст. ($1,3 \cdot 10^{-3}$ Па). Для этого используют вакуумные печи (рис.3.4).

В результате тепловой деформации на нижнем пределе температур ($\sim 0,35T_{\text{пл}}$, где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления) в кованных прутках из сплава ЛН-1 формируется развитая ячеистая структура, представляющая собой вытянутые конгломераты с высокоугловыми границами, которые имеют внутри собственную субструктуру (рис.3.20). Развитая ячеистая структура



Рис.3.20 Структура кованных прутков из сплава ЛН-1 $\times 50\,000$

обеспечивает оптимальный уровень механических свойств прутков при комнатной температуре для последующей навивки пружин (предел прочности или временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 1000\text{--}1100$ МПа; предел пропорциональности $\sigma_{пц} = 800\text{--}850$ МПа; относительное удлинение $\delta = 12\text{--}15$ %; относительное сужение шейки $\psi = 30\text{--}35$ %) [15,54,55].

Однако для холодного волочения данного уровня пластичности недостаточно. Поэтому проводят пластифицирующий вакуумный отжиг по режиму: нагрев до 1150°C , выдержка 1 час. Как показали электронно-микроскопические исследования структуры сплава, в процессе отжига при

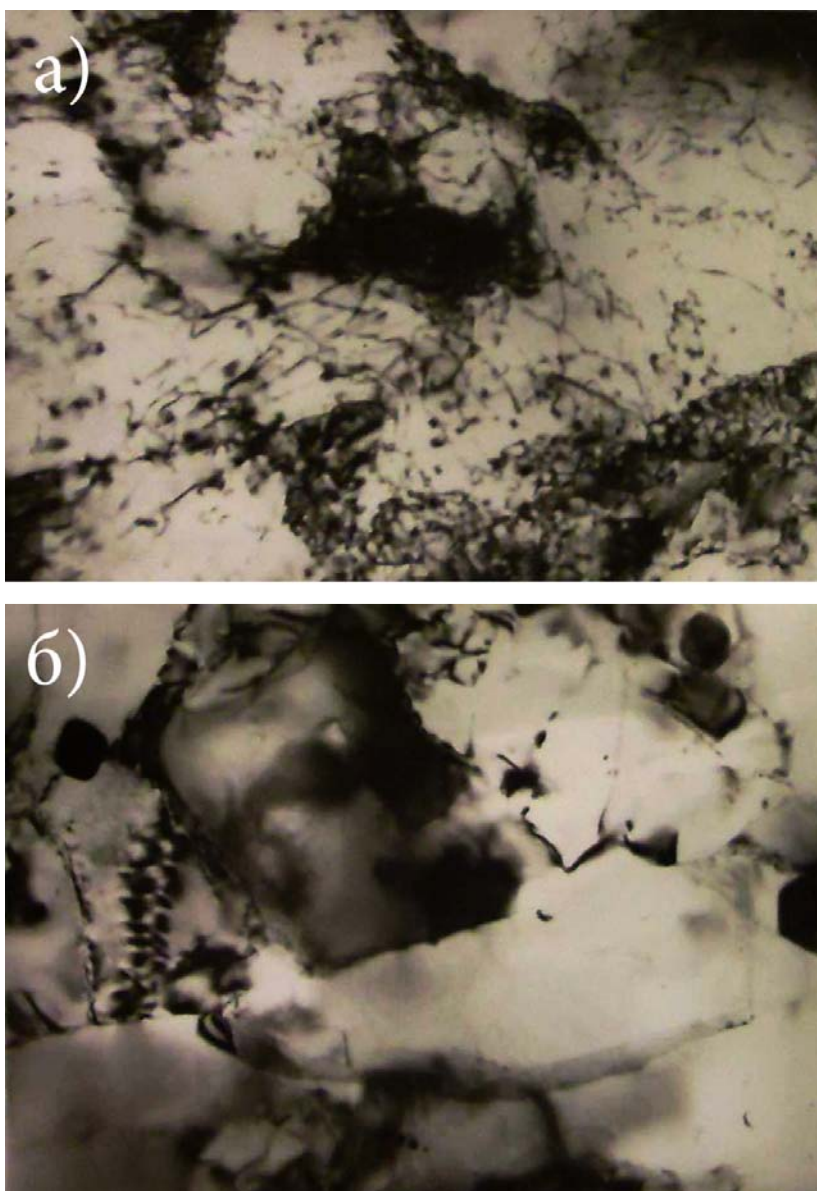


Рис.3.21 Структура кованных прутков из сплава ЛН-1 после отжига при температуре : а- 1150°C ; б- 1200°C $\times 50\,000$

1150 °С начинается, но не завершается полигонизация, о чем свидетельствуют перестройка границ ячеек и существенное снижение плотности дислокаций внутри них (рис. 3.21). Выделившаяся при этом фаза идентифицирована как сложнолегированный карбид типа Me_2C . Протекающие в процессе отжига структурные изменения приводят к снижению прочностных (до $\sigma_b = 800$ МПа) и повышению пластических (до $\delta = 22$ %; $\varepsilon = 65$ %) характеристик сплава [56].

Волочение проволоки осуществляют с частными деформациями $\varepsilon = 1020$ % и суммарными $\varepsilon_{\Sigma} = 14\text{--}67$ %. Сплав ЛН-1 в процессе холодного волочения достаточно интенсивно упрочняется (с $\sigma_b = 800$ МПа при $\varepsilon = 0$ % до $\sigma_b = 1240$ МПа при $\varepsilon = 67$ %), однако сохраняет при этом высокий уровень пластичности ($\psi = 52$ % при $\varepsilon = 67$ %) – рис.3.22. Такое сочетание механических свойств обусловлено особенностями формирования в холоднотянутом материале ячеистой структуры. Из результатов электронномикроскопических исследований следует, что в результате холодной деформа

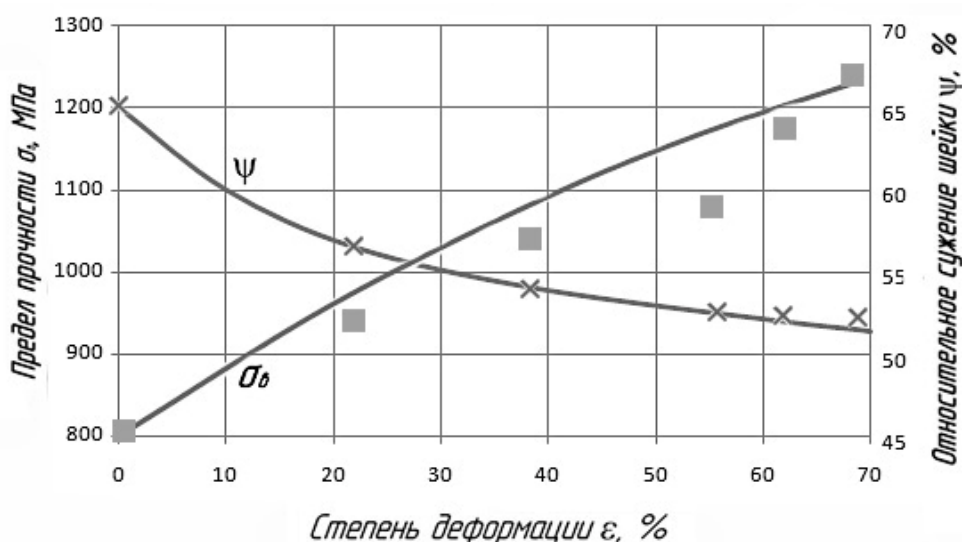


Рис.3.22 Зависимость механических свойств холодноотянутой проволоки из сплава ЛН-1 от степени деформации

ции поперечный размер ячеек, сформированных в процессе теплойковки и отжига, уменьшается, а плотность дислокаций внутри них увеличивается (рис. 3.23). Так, при $\varepsilon = 40$ % плотность дислокаций составляет 10^{10} см^{-2} , увеличение степени деформации ε до 60 % приводит к повышению плотности дислокаций до $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при одновременном уменьшении поперечных размеров субзерен. Волочение с большими степенями деформации ($\varepsilon = 67$ %) влечет за собой формирование вытянутой ячеистой структуры (вдоль направления волочения) с диаметром ячеек 100–500 нм.

При этом ячейки изменяют свою форму при деформации, хотя не так значительно, как меняется поперечное сечение проволоки. Границы между

ними становятся более совершенными и сильнее разориентированными относительно друг друга, чем при $\varepsilon = 40 \%$. Таким образом, в сплаве формируется дефектная структура, способствующая повышению скорости диффузии как легирующих элементов, так и газовых примесей, проникающих в сплав либо в процессе передела, либо при термообработках в условиях динамического вакуума [15,55].

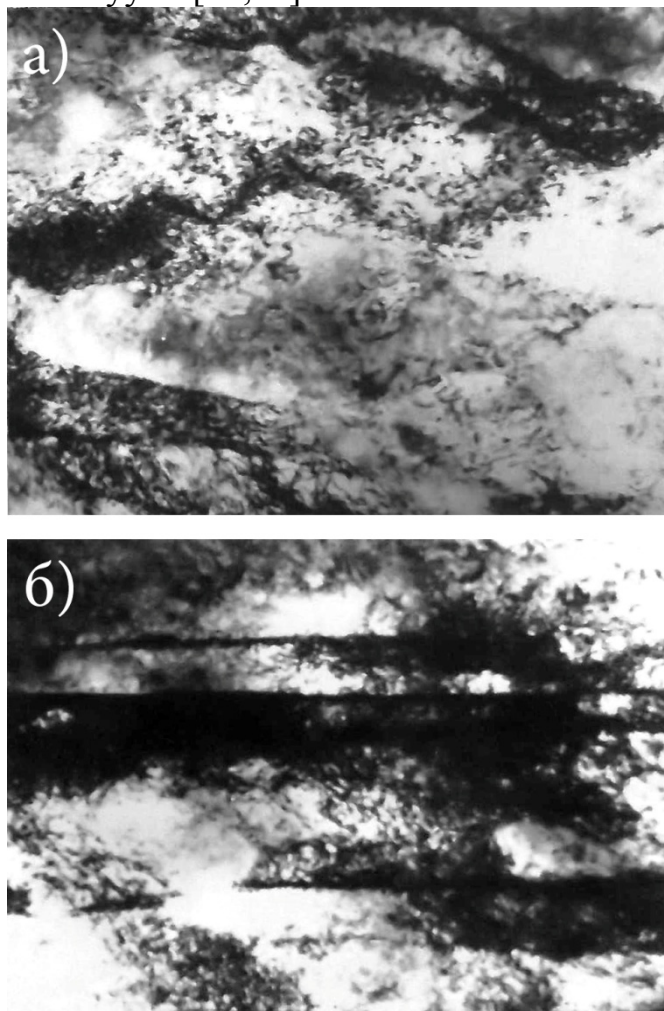


Рис. 3.23 Структура холоднотянутой проволоки, $\times 50\,000$
 $a - \varepsilon = 40 \%$; $b - \varepsilon = 67 \%$

Очевидно, получение проволоки малых сечений (диаметром до 0,5 мм) из шлифованных заготовок возможно только с помощью волочения с промежуточной термообработкой (закалкой) для снятия напряжений. В процессе работы было рассмотрено формирование механических свойств при повторном волочении после промежуточного отжига при температуре 1150 °С в течение 1 ч. Результаты испытаний на растяжение холоднотянутой проволоки показали, что характер упрочнения материала, уровни прочности и пластичности проволоки аналогичны соответствующим параметрам в случае волочения из ковальной заготовки.

Известно, что при холодном волочении металлов и сплавов возможно образование внутренних микродефектов, в том числе микротрещин, которые невозможно обнаружить и оценить ни металлографическими, ни механическими испытаниями. В то же время отрицательное влияние подобных дефектов в условиях эксплуатации может быть весьма значительным. Оценку дефектности структуры в холоднотянутых полуфабрикатах из сплава ЛН-1 осуществляли методом гидростатического взвешивания. Проведено исследование разуплотнения $\Delta\rho/\rho$ образцов одной плавки и партии при различных степенях деформации и после термообработок [15]. Изменение плотности $\rho - \rho_i$ при волочения представлено на рис.3.24 (ρ_i – плотность образца после i -го прохода, ρ – плотность исходной ковальной заготовки в отожженном состоянии; $\rho = 9,2041 \text{ г/см}^3$).

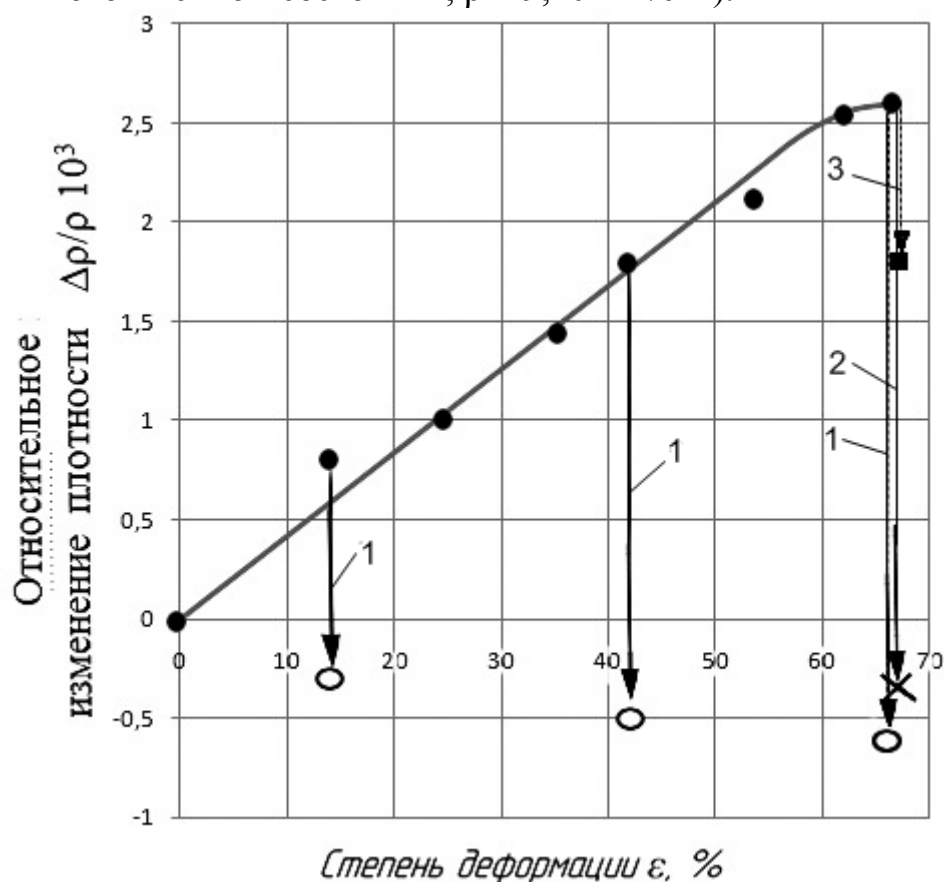


Рис.3.24 Изменения дефекта плотности проволоки в процессе холодной деформации (●) и при последующей термообработке по режимам:

- 1 – ОТР 1800 °С, 1 ч + закалка (●→○);
- 2 – отжиг 1250 °С, 1 ч (●→×);
- 3 – отжиг 1150 °С, 1 ч (●→■).

Как видно, плотность материала в процессе холодной деформации уменьшается. Причем разуплотнение (дефект плотности) образца повышается с ростом степени деформации и при $\varepsilon = 67 \%$ достигает величины $\Delta\rho/\rho =$

$(2,66 \pm 0,50) \cdot 10^{-3}$ (по результатам шести измерений при доверительной вероятности $p = 0,95$).

Известно, что разуплотнение материала в общем случае может быть связано с микро- и макронесплошностями, напряжениями и дефектами кристаллической решетки (дислокациями, вакансиями и т.д.). Поэтому для выявления причин снижения плотности в процессе холодной деформации сплава ЛН-1 и выяснения природы дефекта плотности осуществлена серия термообработок волооченных образцов и оценено изменение величины $\Delta\rho/\rho$. Оценены два вида термообработки: отжиг для снятия напряжений при температурах 1150 и 1250°C и обработка на твёрдый раствор (ОТР) при 1800°C с последующей закалкой ($V_{\text{охл}} \geq 50^\circ\text{C}/\text{с}$). Для исключения газонасыщения материалов в процессе термообработки в условиях динамического вакуума образцы помещали в танталовую фольгу (геттер, исключаяющий насыщение кислородом). Результаты показали, что ОТР и отжиг при температуре 1250 °C приводят к полному восстановлению плотности, величина $\Delta\rho/\rho$ близка к нулю. Это свидетельствует об отсутствии в деформированном материале каких-либо макронесплошностей, а также о том, что его разуплотнение в процессе холодного волочения определено формированием высокодефектной ячеистой структуры, дефект плотности имеет дислокационную природу. Неполное восстановление плотности после отжига при 1150 °C ($\Delta\rho/\rho = 1,80 \cdot 10^{-3}$) до уровня исходных заготовок связано с более высокой устойчивостью дислокационной структуры холоднотянутого материала, обусловленной, по-видимому, большим, чем в кованом материале, количеством выделившихся фаз.

Необходимо отметить, что во всех случаях проведение термообработок в присутствии геттера приводит к потере веса образцов, величина которой зависит от температуры и вида термообработки. Если в результате отжигов при температуре 1150 и 1250° C уменьшение веса $\Delta m/S$, где S – площадь поверхности образца, составляло $(3-4) \cdot 10^{-5}$ г/см², то при температуре 1800 °C в течение 1 ч вес уменьшился на $20 \cdot 10^{-5}$ г/см². При этом степень деформации практически не влияет на значение $\Delta m/S$. Подобная потеря веса может быть вызвана рядом процессов, по-видимому, протекающих в разных температурных интервалах: дегазацией, испарением летучего окисла NbO, выгоранием углерода и т. п.

Поскольку промежуточный отжиг при волочении прутков и проволоки обычно осуществляют в условиях динамического вакуума, без использования геттера, проведена сравнительная оценка изменения веса образцов в процессе отжига при 1150°C как в реальных условиях, так и в условиях, исключаяющих насыщение. После отжига в динамическом вакууме образцы, продеформированные с $\varepsilon = 14\%$, потеряли вес $\left| \frac{\Delta m}{S} \right| = 3,2 \cdot 10^{-5}$

г/см², а продеформированные с $\varepsilon = 30 \%$ – $0,7 \cdot 10^{-5}$ г/см², то есть с ростом степени деформации потеря веса уменьшается. Волочение с большими деформациями приводит к увеличению веса образцов, причем величина прироста веса возрастает с ростом степени деформации. При $\varepsilon = 45 \%$ прирост составляет $\left| \frac{\Delta m}{S} \right| = 1,3 \cdot 10^{-5}$ г/см², а при $\varepsilon = 67 \%$ – $2,3 \cdot 10^{-5}$ г/см².

Очевидно, при отжиге в условиях динамического вакуума холодноотянутых прутков из сплава ЛН-1 при температуре существования ячеистой структуры (1150 °С) происходят не только процессы, приводящие к потере веса образцов, но и насыщение материала газовыми примесями, по видимому, кислородом. Причем интенсивность газонасыщения возрастает с ростом степени деформации [15].

Повышенная склонность ниобиевых сплавов, в том числе нагартованных, к газонасыщению в процессе термообработок в условиях динамического вакуума и образованию оксидных фаз хорошо известна [58-60]. Кроме того, имеется серия работ, посвященных вопросам диффузионного насыщения кислородом нагартованных ниобиевых образцов в целях повышения механических свойств за счет выделения мелкодисперсных оксидных фаз [61– 63].

3.1.6. Производство проволоки из материалов с памятью формы на основе никелида титана

Сплавы на основе никелида титана, обладающие такими уникальными свойствами как эффект памяти формы и сверхэластичность, имеют большие возможности и перспективы для использования в различных областях техники: в машиностроении, строительстве, космонавтике и т.д. Кроме того, данные материалы обладают хорошей биологической совместимостью с костными и мышечными тканями, а также высокой коррозионной стойкостью в крови и других биологических жидкостях [9]. Подобное сочетание уникальных свойств делает их незаменимыми в различных областях медицины, особенно в травматологии и нейрохирургии [10,11].

Широкому внедрению в медицинскую практику изделий из никелида титана препятствует, кроме всего прочего, дефицитность данных материалов, трудоёмкость их производства, и высокая стоимость полуфабрикатов, включая прутки и проволоку. Крупнотоннажное производство полуфабрикатов из никелида титана, предусматривающие выплавку больших слитков (до 800 кг) и использование большого количества операций пластической обработки (экструзии,ковки, прокатки, волочения), не приемлемо для получения материалов для медицинских целей [64,65]. Кроме того, выплавка слитков больших размеров приводит к неоднородности химическо-

го состава и, следовательно, к существенному разбросу характеристик памяти материала и эксплуатационных параметров изделий.

Изделия медицинского назначения, а именно погружные конструкции (имплантаты), как правило, имеют небольшие геометрические размеры, высокие требования по дизайну, разнообразны по типоразмерам и назначению, и обычно заказываются малыми партиями. Производство их целесообразно осваивать на специализированных минизаводах.

В ЦНИИМе была отработана и освоена технологическая схема производства, предусматривающая передел малых слитков (весом до 10 кг) методом горячей однократной экструзии на проход с последующей горячей ротационной ковкой и окончательным холодным многократным волочением с промежуточными термообработками при температуре 800–900°C [66–68]. В качестве исходных заготовок для волочения используются кованные прутки диаметром 4–5 мм. Волочение проводят с частными деформациями 8–15% и с суммарными деформациями между термическими обработками 25–40%. Волочение ведут на станах барабанного типа (рис.3.3). Для снижения продолжительности термических обработок, достижения однородности прогрева материала по сечению и длине термообработки проводят на установке электроконтактного нагрева (рис.3.5) прямым пропусканием электрического тока с одновременным прикладыванием к обрабатываемому материалу растягивающих напряжений. Охлаждение образцов после нагрева осуществляют на воздухе, при естественной скорости охлаждения, которая соответствует закалке металла. Термообработки получены рихтованные прутки, которые могут подвергаться, при необходимости, бесцентровому шлифованию. Кроме того, при термообработке с растягивающими усилиями удаётся скомпенсировать увеличение диаметра материала на 5–7%, которое происходит вследствие обратного мартенситного превращения при нагреве холоднодеформированного никелида титана. При этом сокращается количество проходов при волочении. Снижение продолжительности термообработок благоприятно сказывается на качестве поверхности полуфабрикатов, что делает проще процесс волочения, уменьшает припуск под шлифование.

Ниже представлен пример маршрута волочения проволоки Ø 2,0 мм из кованной шлифованной заготовки Ø4,0 мм из никелида титана, который имеет температуру обратного мартенситного превращения (A_k) 23°C и, следовательно, в процессе волочения находится в высокотемпературном («аустенитном») состоянии :

Ø4,00→Ø3,80→Ø3,60→Ø3,40 термообработка

Ø3,46→Ø3,30→Ø3,15→Ø3,00 →Ø2,85 термообработка

Ø2,90→Ø2,75→Ø2,60→Ø2,45 →Ø2,30 термообработка

Ø2,35→Ø2,20→Ø2,10→Ø2,00.

Надо отметить, что поскольку волочение проходит при температуре выше температуры A_k , размер проволоки на выходе из волоки на 2–3% больше из-за проявления эффекта сверхэластичности. Кроме того, при разработке режимов волочения было учтено, что с увеличением частных деформаций суммарная степень деформаций снижается. Очевидно, что режимы волочения материала с другими значениями характеристической температуры A_k будут иными.

В табл. 3 приведены механические свойства шлифованных прутков (после термообработки при 800°C) диаметром 2 мм. Из представленных данных следует, что уровень механических свойств материала определяется его принадлежностью к той или иной группе по значению характеристических температур. Так, прутки со значениями $A_k = 23^\circ\text{C}$ и $A_k = 45^\circ\text{C}$, несмотря на близость значений данной характеристики, имеют различные механические свойства при одинаковых температурах испытаний.

Таблица 3

Механические свойства шлифованных прутков из никелида титана

Температура обратного мартенситного превращения, °C	Температура испытаний, °C	Предел прочности σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
23	5	1385	1246	32,0
		1370	1210	35,0
	20	1302	1165	7,0
		1295	1160	5,0
	37	1250	1115	6,0
		1212	1105	8,0
45	5	1082	975	28,0
		1118	950	32,0
	20	1018	942	17,6
		1075	938	12,5
	37	961	925	6,0
		1025	930	9,0

3.2. Производство сварочной проволоки на минизаводе

Омедненную сварочную проволоку СВ-08Г2С-О по ГОСТ 2246-70 для сварочных автоматов производят, в основном, на крупных метизных заводах по традиционной технологии. При этом обеспечивается как высокое и стабильное качество готовой проволоки, так и низкие затраты на производство и высокий уровень прибыли. В последнее время этот вид продукции стали выпускать также на специализированных минизаводах. При некоторой потере производительности и при вынужденных отклонениях от

традиционной технологии на минизаводе удастся выпускать конкурентно-способную продукции и находить свой круг потребителей такой проволоки. Примером может служить один из минизаводов, расположенный в Ленинградской области.

Исходной заготовкой для производства омедненной проволоки на упомянутом минизаводе является катанка $\varnothing 6,5$ мм из стали марки 08Г2С, которая поступает с ОАО «Западно-Сибирский Metallургический Комбинат». Завод-поставщик относится к флагманам российской металлургии и выпускает высококачественную катанку всегда стабильно высокого качества. В связи с этим, на минизаводе стало возможным свести операции приемки и входного контроля катанки к простому визуальному осмотру металла и документации.

На рис 3.31 изображена схема производства сварочной проволоки на рассматриваемом минизаводе. Можно выделить следующие технологические операции:

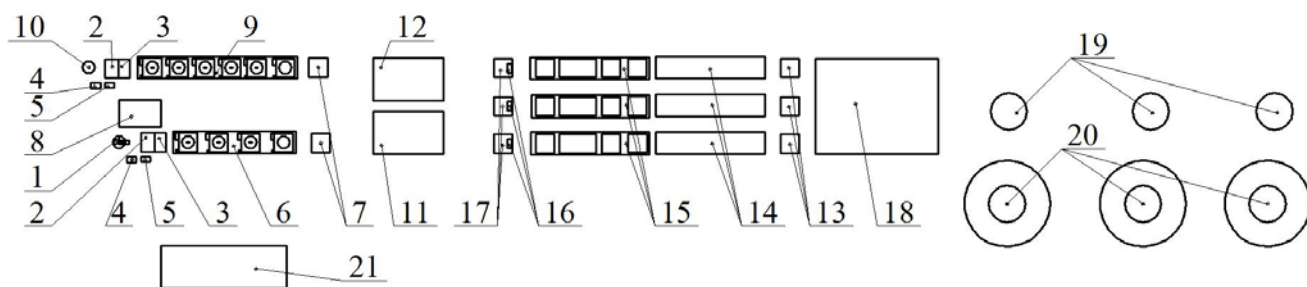


Рис.3.31 Схема производства омедненной легированной сварочной проволоки

1 — разматыватель; 2 —снятия окалины знакопеременным изгибом; 3 — металлические щетки; 4 — стыкосварочный аппарат; 5 — ковочные вальцы; 6 — волочильный стан Sket 2500/4; 7 — наматывающее устройство; 8 — склад катанки; 9 — волочильный стан Sket 2500/6; 10 — разматывающее устройство; 11 — склад проволоки $\varnothing 4,2$ мм; 12 — склад проволоки $\varnothing 1,87$ мм ; 13 — разматыватель; 14 — волочильный стан Sket 22/40; 15 — линия меднения; 16 — устройство для калибрующей протяжки; 17 — наматывающее устройство; 18 — перематка и упаковка готовой продукции; 19 — охлаждение проволоки на воздухе; 20 — шахтные печи; 21 — инструментальный цех

1. После входного контроля подготовка катанки к волочению;
2. Волочение с $\varnothing 6.5$ на $\varnothing 4.2$ мм на 4-хкратном волочильном стане 2500/ 4 фирмы Sket; перематка проволоки с мотков на катушки;
3. Отжиг проволоки на катушках в печах шахтного типа и охлаждение от температуры 500 0С на воздухе;
4. Подготовительные операции для следующего этапа волочения
5. Волочение с $\varnothing 4.2$ на $\varnothing 1.87$ мм на 6-кратном волочильном стане 2500/6 фирмы Sket; перематка проволоки на катушки;
6. Отжиг проволоки на катушках в шахтных печах с последующим охлаждением на воздухе;
7. Чистовое волочение проволоки с $\varnothing 1.87$ на $\varnothing 1.22$ мм на одном из трех волочильных станков 22/4 фирмы Sket;

8. Меднение проволоки Ø1.22 мм и калибрующая протяжка медной проволоки на готовый размер Ø1.15 мм;
9. Завершающий этап производства сварочной проволоки - перемотка готовой проволоки, контроль ее качества и намотка на катушки для отправки потребителю.

В число технологических операций на минизаводе можно включить также доводку заготовок волок и подготовку волочильного инструмента к волочению в инструментальном цехе.

Анализ каждой технологической операции позволил выявить «узкие» места и найти рациональные технологические решения. В работе активное участие принимали доктор химических наук профессор Демидов А. И. и студент-магистр Кикоть А. А. Авторы выражают им глубокую благодарность. Без их творческого подхода к решению возникающих проблем, некоторые из которых потребовали предварительных экспериментальных исследований на уровне разработки патентов [69], предложенная технология [70] не имела бы требуемой законченности.

На этапах подготовки катанки Ø6,5 мм и отожженной проволоки Ø4,2 мм к волочению на минизаводе окалину удаляют путем двойного перегиба проволоки с последующей зачисткой ее механическими щетками. Проведя соответствующие эксперименты, авторы установили, что используемая катанка имеет стабильный состав окарины (общей толщиной 40–50 мкм): наружный гематит (около 10%), средний магнетит (примерно 40 %) и внутренний вюстит (около 50 %). Примерно 8–10 % окарины (вюстита с небольшим количеством магнетита) после механического удаления остается на поверхности катанки. Требуемая для полного удаления окарины операция травления металла в кислотах, а также операции нанесения подмазочных слоев на минизаводе отсутствуют: эти операции дороги и неосуществимы на ограниченных площадях. Отсюда начинаются все трудности, отличающие разрабатываемую технологию от «традиционной». Опыт показал, что на рассматриваемом минизаводе можно сохранить требуемое качество выпускаемой проволоки по ГОСТ 2246-70 при сравнительно небольшой потере производительности.

Решение найдено благодаря специальному подбору новой волочильной смазки и разработке более мягких режимов волочения. Хорошими свойствами обладает волочильная смазка в виде сухого мыла «TRAXIT TR 41» – это кальциевый стеарат с низким содержанием жира. Остаточная окалина при такой смазке играет роль подмазочного слоя и положительно влияет на процесс волочения. При волочении, естественно, общая толщина остаточной окарины уменьшается пропорционально вытяжкам, и к последним пропускам остаются лишь следы.

После каждой стадии волочения (сначала на $\varnothing 4.2$, а затем на $\varnothing 1.87$ мм) следует операция отжига в электрических шахтных печах. Авторы показали, что для устранения образования вторичной окалины при отжиге целесообразно и экономично применять аргон в качестве защитной среды. Нагрев ведется до температуры 950°C при выдержке 12 час. Затем следует охлаждение с печью до 500°C в течение 8 час и далее охлаждение на воздухе. При таком отжиге слой остаточной окалины на металле практически остается неизменным, но после отжига в ее составе увеличивается доля магнетита, а доля вьстита снижается. Таким образом, на втором этапе волочения, состав подсмазочного слоя отличается от того, что был на первом. Коэффициент трения при этом должен увеличиваться, однако существенного увеличения силы волочения не наблюдалось.

После двух этапов волочения по технологии следует меднение проволоки. Оно осуществляется в линии меднения, состоящей из четырех последовательных ванн. В первой находится слабый раствор кислоты для активизации поверхности проволоки перед меднением. Вторая и четвертая ванны – промывочные (с чистой водой). Покрытие медью происходит в третьей ванне с медным купоросом, но в отличие от крупных заводов, электрический ток не подается на катод, поэтому слой меди на проволоке получается рыхлым и недостаточно толстым. Для уплотнения медного покрытия требуется дополнительная калибрующая протяжка готовой проволоки $\varnothing 1.22$ мм на готовый размер $\varnothing 1.15$ мм. Однако при толщине покрытия около $0,4$ мкм не обеспечивается сплошность медного покрытия. Выяснилось также, что на сплошность покрытия существенно влияет слой остаточной окалины и смазки, играющие положительную роль при волочении, но загрязняющие поверхность проволоки при меднении. Для повышения качества покрытия было предложено в первую ванну линии меднения добавлять комплексон – этилендиаминтетрауксусную кислоту (ЭДТА) или ее натриевые соли, позволяющий полностью удалить волочильную смазку и следы оксидов с поверхности проволоки перед меднением.

В целом, создана вполне конкурентноспособная технология производства медненной сварочной проволоки $\varnothing 1.15$ мм для сварочных автоматов одного из судостроительных предприятий. Благодаря близости расположения, при внимательном взаимном изучении и удовлетворении потребностей и возможностей этих двух заводов удалось создать взаимно выгодное сотрудничество производителя и потребителя медненной сварочной проволоки.

Литература

1. **И.Л. Перлин, М.З. Ерманок.** Теория волочения. Металлургия. М. 1971- 448 с.
2. **Ю.С. Зыков.** Теория волочения сплошных профилей. (Учебное пособие). Киев УМК ВО 1991.
3. **Ю. И. Коковихин.** Технология сталепровочного производства: Учебник. К., 1995 г
4. **Виторский Я.М., Шаболдо О.П., Караштин Е.А.** Термомеханически упрочняемые высокопрочные и жаропрочные пружинные материалы. // Труды Международной научно-технической конференции «СММТ ' 2009» - СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. С. 483-484.
5. **Белогур В.П. Виторский Я.М. Шаболдо О.П. Заплаткин Ю.Ю.** Восстановление и совершенствование технологии производства шлифованных прутков и винтовых пружин из сплава на основе ниобия марки ЛН-1. Научно-технический сборник «ЦНИИ материалов -90 лет в материаловедении», Юбилейный выпуск - ФГУП «ЦНИИМ» СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.С.107-109.
6. **Крылов Б. С., Зеленев Б. А., Петров В. А.** Высокопрочный титановый бета-сплав марки ТС-6. Технология, свойства, области применения // ЦНИИ материалов – 90 лет в материаловедении: Науч.-техн.сб. Вып. 2 /ФГУП «ЦНИИМ» СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. С. 125–139.
7. **Хачин В.Н., Пушин.В.Г., Кондратьев В.В.** Никелид титана: Структура и свойства. М.: Наука, 1992.-160с.
8. **Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю. и др.** Сплавы с эффектом памяти формы. М.: Металлургия, 1990.-224с.
9. **Castleman I.S., Motzkin S.M., AlicandriA.A.** Biocompatibility of nitinol alloy as implant material //J of Biomed. Material. 1976. Vol. 10. P. 695-731.
10. **Гюнтер В.Э., Итин В.И., Моисевич Л.А. и др.** Эффекты памяти формы и их применение в медицине. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992.- 742 с.
11. **Гюнтер В.Э., Котенко В.В., Миргазизов М.З. и др.** Сплавы с памятью формы в медицине. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986.- 208 с.
12. **Комаишко С.Г., Кулик Г.Н., Моисей М.В., Шаболдо О.П.** Преимущества и недостатки различных конструкций волочильных станков // Станочный парк. 2009.№11(69). С.36-37.
13. **Хаяк Г.С.** Инструмент для волочения проволоки. М.: Металлургия, 1974.-128 с.
14. **Шаболдо О.П., Строганов А.А.** Влияние термомеханических режимов производства проволоки на механические свойства пружинного β-

титанового сплава ТС6// Научно-производственный журнал «Металлообработка».- 2010.-№1(55).-С.50-56.

15. Шаболдо О. П. Влияние режимов холодного волочения на структуру и свойства проволоки и характеристики пружин из высоколегированного сплава ниобия ЛН-1 // Металлообработка. 2009. № 4. С. 35–40.

16. Северденко В.П., Жилкин В.З. Основы теории и технологии волочения проволоки из титановых сплавов. Минск. Наука и техника, 1970.-С.204.

17. Корнеев Н.И., Певзнер С.Б., Разуваев Е.И. Обработка давлением тугоплавких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1975.-С.440.

18. Кокрофт М. Смазка в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1970.-С.111.

19. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1986.-С.168.

20. А. с. СССР № 1702586 МКИ В 21 С 1/00,1991. Способ изготовления изделий / **О. П. Шаболдо, Я. М. Виторский, В. А. Рафаловский и др.**

21. Шаболдо О. П., Караштин Е. А., Строганов А. А. Отработка режимов холодного волочения проволоки и термомеханического упрочнения пружин из высокопрочного титанового сплава ТС6 // Труды Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ–2009). СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. С. 358–359.

22. Колачев В.А., Рыденков Д.В. О сопоставлении состава и свойств титановых сплавов по эквивалентам молибдена и алюминия // Металлы.1995.№4.С.68-76.

23. Пульцин Н.М. Взаимодействие титана с газами.- М.: Металлургия,1960.-217 с.

24. Гриднев В.Н., Ивасишин О.М., Ошкадёрв С.П. Физические основы скоростного нагрева титановых сплавов.- Киев: Наукова Думка, 1986.- 256 с.

25. Бодяко М.Н., Гордиенко А.И., Ивашко В.В. Кинетика окисления жаропрочных титановых сплавов ВТ9 и ВТ18// В кн.: Материалы II Всесоюз. Межвуз. Конф. По ХТО. Минск: МДНТП, 1974. С.198-202.

26. Гордиенко А.И., Шипко А.А. Структурные и фазовые превращения в титановых сплавах при быстром нагреве.- Минск: Наука и техника, 1983.-335 с.

27. Алфёрова Н.С., Шевченко В.И. Влияние степени деформации на рекристаллизацию сплавов титана//Металловедение и термическая обработка металлов. 1973.№9.С. 52-57.

28. Бодяко М.Н., Аношкин.Н.Ф., Астапчик С.А., Гордиенко А.И., Смальщентко В.А. Рекристаллизация сплава ВТ15 при быстром непрерывном нагреве//Изв. АН БССР, сер. физ.-тех. наук.1969. С.44-49.

29. Каинова Г.Е., Шоршоров М.Х. Влияние кратковременного нагрева после деформации при механико-термической обработке на свойства сплава ВТ15 и его сварных соединений// В кн.: Лёгкие сплавы и методы их обработки. М.: Наука.1968. С.282-286.

30. Шоршоров М.Х., Гордиенко А.И., Антипов В.И., Каинова Г.Е., Комаров М.А. Термопластическое упрочнение мартенситных сталей и титановых сплавов//М.: Наука. 1971. 152 с.

31. Леринман Р.М., Мурзаева Г.В. Структурные изменения, происходящие при термической и механико-термической обработке высокопрочных β -титановых сплавов.- В сб.: Структура и механические свойства металлов и сплавов. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1975,с.90-107.

32. Леринман Р.М., Мурзаева Г.В. Электронномикроскопическое исследование пластической деформации закалённых титановых сплавов с термически нестабильной β -фазой.- Физика металлов и металловедение.- 1968. 25. № 5. с.924-933.

33. Виторский Я.М., Иващенко Р.К., Каверина С.Н. и др. Влияние степени пластической деформации на структуру и механические свойства низколегированного молибдена.- Физика металлов и металловедение.- 1973. 35. № 5. с. 1064-1074.

34. Семенова Н.М. Исследование процесса распада в титановых сплавах с термически нестабильной β -фазой.- В кн.: Исследование структуры жаропрочных сплавов и сталей. - М.: Металлургия.1969. С.68-71.

35. Виторский Я.М., Иващенко Р.К., Каверина С.Н. и др. // Влияние степени пластической деформации на структуру и свойства низколегированного молибдена.- ФММ. 1973. 35. №5. С.1064-1074.

36. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Иващенко Р.К. и др. Структура, текстура и механические свойства деформированного молибдена.- Киев.: Наукова думка, 1983.-232с.

37. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов.- Киев.: Наукова думка, 1975.- 315 с.

38. Коджаспиров Г.Е., Рыбин В.В., Апостолопулос Х. Роль мезо-структуры при термомеханической обработке металлических материалов.- МиТОМ. -2007.-№1.-с.30-34.

39. Коджаспиров Г.Е., Рудской А.И., Рыбин В.В. Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий пластическим деформированием.- С.-Петербург: Наука,2006.-350с.

40. Леринман Р.М., Хвостынцев К.И., Никиноров М.А., Анитов И.С., Ксенофонтова Т.Б. Совместное влияние пластической деформации и старения на структуру и свойства титанового сплава ТС6.- Физика металлов и металловедение.-1966. 22. № 4. с.591-597.

41. Avery D.H., Polan N.W. An optimal design of a high strength ductile metallic material criteria and application to a β -titanium alloy.-Met. Trans.,1974, v.5, №5, p. 1159-1162.

42. Polan N.W., Avery D.H. Mechanical-thermal processing of a β -titanium alloy.-Met. Trans.,1976,v.7, №2, p. 323-325.

43. Попов А.А., Пумпянский Д.А., Белоглазов В.А. Исследование фазовых и структурных превращений в титановом сплаве ТС6 с исходной полигонизованной структурой.- Физика металлов и металловедение.- 1991.№2. с.150-156.

44. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. - М.: Металлургия.1969. -752с.

45. Приданцев М.В. Жаропрочные стареющие сплавы. - М.: Металлургия.1973.- 183с.

46. Зимина Л.Н. Влияние легирующих элементов и термообработки на кинетику структурных превращений и свойства жаропрочных сплавов системы никель-хром-алюминий. - В кн.: Специальные стали и сплавы. - М.: Металлургия.-1966. Вып.46. С.114-139.

47. В.А. Войцеховский, Хаталах Р.Ф. Технологическая пластичность высокожаропрочного сплава ЭИ828.-Производственно-технический бюллетень №1. 1970. С.23-25.

48. Иванов В.И., Осипов К.А. Возврат и рекристаллизация в металлах при быстром нагреве. - М.: Наука.-1964.-184 с.

49. Бодяко М.Н., Астапчик С.А., Ярошевич Г.Б. Термокинетика рекристаллизации. - Минск: Наука и техника.-1968.- 251 с.

50. Избранов П.Д., Павлов В.А., Родигин Н.М. Некоторые особенности рекристаллизации трансформаторной стали при быстром нагреве. - ФММ.-1957. 7. № 6 с.915-937.

51. Березина А.Л., Гриднев В.Н., Ефимов А.И. и др. Исследование процессов выделения γ / - фазы при старении сплава ХН70МВЮ-ВД. В кн.: Жаропрочные стали и сплавы на никелевой основе. - М.: Наука.-1984. С.160-164.

52. Betteridg W., Heslop J. The Nimonic Alloys and other Nickel-Base High-temperature Alloys. London. 1974.

53. Виторский Я.М., Рудской А.И., Шаболдо О.П. Особенности тепловой деформации жаропрочного ниобиевого сплава марки ЛН-1 при прокатке.- Научно-технические ведомости СПбГПУ.-2010г.-№3(106) - с.119-125.

54. Виторский Я.М., Шаболдо О.П., Заплаткин Ю.Ю. Формирование структуры и свойств прутков из легированного сплава ниобия ЛН-1 при тепловой деформации. Научно-технический сборник «ЦНИИ материалов-90 лет в материаловедении» - Юбилейный выпуск - Санкт-Петербург,- 2002г.- с.102-107.

55. Шаболдо О.П., Виторский Я.М., Васильев Е.В. Проблемы производства высокотемпературных пружинных материалов из жаропрочного дисперсионно-твердеющего сплава на основе ниобия ЛН-1 // Труды Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов «НФМ '2010» - Санкт-Петербург, 2010г.- с. 290-291.

56. Шаболдо О.П., Васильев Е.В. Влияние температуры отжига на структуру и свойства прутков из ниобиевого сплава марки ЛН-1. // Труды Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии «СММТ ' 2009» - Санкт-Петербург,- 2009г.- с.543-544.

57. Васильев Е.В., Шаболдо О.П. Исследование влияния степени деформации на параметры рекристаллизации прутков из ниобиевого сплава ЛН-1. // VIII Конференция молодых ученых и специалистов, - Государственный научный центр ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» - тезисы докладов.-2009г.-с.48-49.

58. Коротаев А.Д., Тюменцев А.Н., Суховаров В.Ф. Дисперсное упрочнение тугоплавких металлов. - Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1989.-211с.

59. Коротаев А.Д., Тюменцев А.Н., Пинжин Ю.П. и др. Влияние структурного состояния на закономерности формирования неметаллической фазы при диффузном насыщении ниобиевых сплавов кислородом.- ФММ.-1980. 50. № 3. С.560-568.

60. Григорович В.К., Шефтель Е.Н. Дисперсионное упрочнение тугоплавких металлов. - М.: Наука, 1980.-303с.

61. Душин.Ю.А., Емельянова Л.И., Новиков Л.Д. Диффузное насыщение металлических изделий.- Изв. АН СССР. Металлы.-1978.№5.С.204-209.

62. Душин.Ю.А., Емельянова Л.И. Химико-термическое упрочнение ниобиевых сплавов в нагартованном состоянии.- Металловедение и термическая обработка металлов.- 1979.№1.С.51-53.

63. Веденяпин Г.А., Душин.Ю.А., Емельянова Л.И. и др. Состояние кислорода на различных стадиях внутреннего окисления сплава Nb – 1% Zr.- ФММ.-1979. 47. № 5. С.972-977.

64. Фаткуллина Л.П., Смальщенко В.А., Бурлинова Л.А. и др. Физико-механические свойства полуфабрикатов из никелида титана.- Металловедение и термическая обработка металлов.- 1975.№10.С.7-10.

65. Корнилов И.И., Белоусов О.К., Качур В.В. Никелид титана и другие сплавы с эффектом памяти формы.- М.: Наука. 1977.178 с.

66. Виторский Я.М. Шаболдо О.П. Освоение производства прутков и проволоки из никелида титана для изделий медицинского назначения. На-

учно-технический сборник «ЦНИИ материалов-90 лет в материаловедении», Юбилейный выпуск - Санкт-Петербург, 2002г.-с.110-113.

67. А. с. СССР № 1777384 МКИ С 22 F 1/18,1990. Способ изготовления прутков. / **Шаболдо О. П., Виторский Я. М., Данилов А.Н. и др.**

68. А. с. СССР № 1800706 МКИ В 21 С 1/00,1990. Способ волочения проволоки из материала, обладающего эффектом памяти формы. / **Шаболдо О. П., Виторский Я. М., Данилов А.Н., Терентьев К.Н.**

69. Патент РФ № 2380183 С1 РФ, МПК В21, 2010. Способ изготовления омедненной проволоки / **Демидов А. И., Кикоть А. А., Шрамко В. М.**

70. Демидов А.И., Лунев В.А., Кикоть А.А. Анализ и совершенствование технологии производства омедненной сварочной проволоки. – Труды междун. научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». – Санкт-Петербург, 2009. – с. 269-272.

*Рудской Андрей Иванович
Лунев Владимир Алексеевич
Шаболдо Олег Павлович*

ВОЛОЧЕНИЕ

Учебное пособие

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 – учебная литература

Подписано в печать 24.06.2011. Формат 60х84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 8,0. Тираж 100. Заказ 7768b.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,
в типографии Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 550-40-14
Тел./факс: (812) 297-57-76