

На правах рукописи



Шишов Иван Александрович

**РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО
СТАНА 5000 ОАО “СЕВЕРСТАЛЬ” НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА
ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ**

Специальность 05.16.05 - Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: Колбасников Николай Георгиевич
доктор технических наук,
профессор кафедры ТИМ ФГБОУ ВПО
СПбГПУ

Официальные оппоненты: Мухин Юрий Александрович
доктор технических наук,
зав. кафедрой ОМД ФГБОУ ВПО ЛГТУ,
г. Липецк

Тихонов Сергей Михайлович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник ФГАОУ ВПО
«НИТУ «МИСиС», г. Москва

Ведущая организация: ФГБУН «Институт металлургии и
материаловедения им. А.А. Байкова» РАН,
г. Москва

Защита состоится «19» декабря 2013 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «13» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.03
кандидат технических наук



Климова О.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В течение последних десятилетий Россия является крупнейшим поставщиком природного газа в страны Европы и Азии. В связи с этим производство труб большого диаметра из высокопрочных сталей для магистральных трубопроводов является важной государственной задачей. Производство толстого широкого листа из трубных сталей постоянно расширяется, а требования к штрипсу и трубам ужесточаются вследствие увеличения рабочего давления в трубопроводах и необходимости их эксплуатации в сейсмоопасных зонах и районах Крайнего Севера.

До последнего времени стан 5000 ОАО “Северсталь”, введенный в эксплуатацию в 1985 г., был единственным производителем толстого листа для труб большого диаметра в России. Но в 2009 и 2011 гг. были запущены более современные, мощные и высокопроизводительные станы на Магнитогорском и Выксунском металлургических комбинатах, в связи с чем из-за необходимости поддержания конкурентоспособности продукции стана 5000 перед ОАО “Северсталь” встали задачи обеспечения высокого качества производимого металла и одновременного снижения затрат на его производство.

Сокращение издержек при сохранении качества продукции может быть достигнуто путем обеспечения максимальной производительности за счет назначения режимов прокатки с максимально допустимыми энергосиловыми параметрами, исключения вынужденных простоев, связанных с поломками оборудования из-за перегрузки, сокращения времени технологических операций.

Для обеспечения оптимальной загрузки стана была внедрена система автоматического управления, разработанная компанией *Siemens*. В качестве математического обеспечения системы разработчиками предложена модель, аналогичная используемой в компании *Voest Alpine Industrieanlagenbau (VAI)*. К сожалению, использование модели *VAI* при работе в автоматическом режиме в условиях стана 5000 приводит к его недогрузке – обжатия в проходах снижаются, а общее число проходов для достижения конечной толщины листа увеличивается на 20-30% по сравнению с возможностями оборудования. Известно, что прокатка толстого листа с малыми обжатиями негативно сказывается на проработке металла в центральных слоях раската и может вызывать возникновение трещин. В конечном итоге это может негативно влиять на структуру и механические свойства готового листа. Прокатка в ручном режиме в ряде случаев позволяет избежать недогрузки стана, но ошибки операторов исключить невозможно.

В связи с этим возникает производственная задача, которая во многом предопределила цель данной работы – создание нового математического обеспечения для системы управления, в первую очередь – разработка алгоритмов управления станом и оптимизации режимов обжатий по энергосиловым параметрам. Алгоритмы управления и оптимизации должны быть быстросрабатывающими, чтобы обеспечить пересчет режимов прокатки в *online*-режиме, т.е. оперативно изменять режим обжатий по ходу прокатки.

Эти работы являются первым этапом большой совместной работы ОАО “Северсталь” и СПбГПУ по созданию комплексной модели управления станом, включающей модули для управления параметрами структуры, механическими и динамическими свойствами прокатываемых сталей.

Таким образом, **цель работы** – создание совокупности быстродействующих математических моделей для интегрирования в систему управления станом, позволяющих оптимизировать режимы прокатки сталей по энергосиловым параметрам для обеспечения максимальной производительности, на примере трубной стали категории прочности К60, занимающей сегодня основное место в сортаменте стана.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

1. Исследовать сопротивление деформации и релаксационные свойства стали К60 в зависимости от температуры, степени, скорости деформации, накопленной деформации и времени междеформационных пауз.
2. Создать модель процесса горячей прокатки на стане 5000 с использованием программы конечноэлементного моделирования *Deform-3D*. Решить температурно-деформационную задачу о прокатке толстого листа из исследуемой стали.
3. Разработать быстродействующие математические модели расчета изменения температуры сляба/раската, начиная от выдачи сляба из печи и заканчивая чистовой прокаткой с использованием как результатов расчетов в *Deform-3D*, так и экспериментальных измерений на стане.
4. Исследовать особенности напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при горячей прокатке толстого листа из слябов толщиной 250 и 313 мм с учетом неравномерности распределения температур и деформаций по сечению очага деформации и влияния формы очага деформации. Скорректировать на основе полученных результатов математические модели для расчета усилия прокатки, момента на валу и тока в якоре электродвигателей стана.
5. Исследовать особенности формоизменения раската при прокатке на стане 5000 с использованием модели процесса прокатки в *Deform-3D* и экспериментальных измерений на стане. Создать быстродействующие математические модели для расчета уширения и удлинения раската для обеспечения возможности точного расчета площади контакта металла с прокатными валками, определяющей усилие прокатки.
6. Оценить возможность использования комплекса разработанных быстродействующих математических моделей в алгоритмах оптимизации режимов прокатки по энергосиловым параметрам в зависимости от используемой технологии прокатки толстого листа.

При выполнении работы получены результаты, отличающиеся **научной новизной**, в том числе:

1. Скорректированы методики расчета усилия прокатки, момента прокатки, тока в якоре электродвигателя для стана 5000 при прокатке толстого листа, а именно:

- на основании анализа напряженно-деформированного состояния металла при прокатке толстого листа, выполненного при помощи математического моделирования, в методику расчета усилия прокатки в условиях высокого очага деформации введена поправка, учитывающая существенное влияние неравномерности температурного поля раската;
- на основании сопоставления экспериментальных и расчетных значений энергосиловых параметров определены калибровочные коэффициенты в формулах расчета коэффициента напряженного состояния при определении усилия прокатки в условиях среднего очага деформации, расчета коэффициента плеча равнодействующей при определении момента прокатки, установлен коэффициент пропорциональности между моментом на валу и током в якоре электродвигателей стана.

В результате внесенных изменений в методики расчета энергосиловых параметров для установившегося процесса прокатки средняя относительная ошибка расчета усилия прокатки для выборки из 2111 проходов составила 5,6 %, момента на валу электродвигателя для выборки из 93 проходов – 4,4 %, тока в якоре электродвигателя при той же выборке – 3,8%.

2. Получены количественные соотношения основных параметров прокатки и интенсивности деформации в центральных слоях раската с учетом неравномерности температурного поля. Это обеспечивает дополнительную возможность управления качеством готового проката, в частности, равномерностью структуры и механических свойств по толщине.

3. Предложены алгоритмы расчета режимов обжатий, обеспечивающие максимально допустимую загрузку стана 5000 по энергосиловым параметрам. Алгоритмы включают в себя совокупность разработанных математических моделей, позволяющих с высокой точностью рассчитывать энергосиловые параметры прокатки.

Практическая значимость результатов работы. В результате выполненных работ создан комплекс быстродействующих математических моделей для расчета энергосиловых параметров с высокой точностью, на основе которого разработаны алгоритмы расчета режимов обжатий с максимально возможными энергосиловыми параметрами. Комплекс принят к внедрению в систему автоматического управления станом 5000 ОАО “Северсталь” (акт внедрения результатов работ от 17.10.2013), что позволит обеспечить оптимальную загрузку стана и предотвратить превышение предельных значений энергосиловых параметров при прокатке.

Апробация результатов работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на 9-ой Международной научно-технической конференции “Современные металлические материалы и технологии ” (СММТ’11, 22-24 июня 2011, СПб); Международной научно-практической конференции “XL Неделя науки

СПбГПУ”, (5-10 декабря 2011, СПб); 6-ой Международной молодежной научно-практической конференции “Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А.Ф. Головина” (26-30 октября 2012, Екатеринбург); Научно-практической конференции с международным участием “XLI Неделя науки СПбГПУ”, (3-8 декабря 2012, СПб); Молодежной научной конференции “Студенты и молодые ученые – инновационной России” (23-24 мая 2013, СПб); 10-ой Международной научно-технической конференции “Современные металлические материалы и технологии” (СММТ’13, 25-29 июня 2013, СПб); I-ой Международной научно-технической конференции “Научно-технический прогресс в черной металлургии” (2-4 октября 2013, Череповец).

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечена:

- использованием аттестованного оборудования лаборатории “Исследование и моделирование структуры и свойств металлических материалов” СПбГПУ для исследования структуры и свойств металла;
- применением современного исследовательского оборудования для физического моделирования – комплекса *Gleeble-3800*, измерительные устройства которого обслуживаются фирмой-изготовителем;
- использованием лицензионной программы конечноэлементного моделирования *Deform-3D*;
- выполнением экспериментальных измерений на стане при помощи поверенного промышленного измерительного оборудования;
- статистической обработкой результатов исследований.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, из них 3 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 111 наименований и двух приложений. Работа изложена на 190 страницах машинописного текста, содержит 101 рисунок и 28 таблиц.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории «Исследование и моделирование структуры и свойств металлических материалов» НИИ Материалов и технологий СПбГПУ и технологам листопрокатного цеха №3 ОАО “Северсталь” за помощь, оказанную при выполнении работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность и обоснована цель проведенных исследований, сформулированы задачи, научная новизна и практическое значение диссертационной работы.

В первой главе представлен аналитический обзор выполненных ранее работ по прокатке толстого листа: теоретические и экспериментальные методы анализа напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, методы

расчета и экспериментального определения сопротивления деформации. Отмечена роль советских (российских) ученых, внесших огромный вклад в теорию прокатки, в том числе листовой прокатки: В.С. Смирнова, А.К. Григорьева, А.И. Целикова, П.И. Полухина, А.П. Чекмарева, М.Я. Бровмана и др. Представлены основные математические модели для расчета энергосиловых параметров прокатки, используемых в современных математических моделях прокатных станов. Показаны достоинства и недостатки этих моделей.

Во второй главе выполнено исследование сопротивления деформации трубной стали категории прочности К60 в диапазонах температур черновой и чистовой прокатки, а также релаксационных свойств стали в зависимости от степени, скорости деформации и времени междеформационной паузы, скорость роста зерна аустенита. Исследования выполнены на модуле *Hydrawedge* комплекса *Gleeble-3800*. На рис. 1 представлены зависимости сопротивления деформации от степени деформации $K(\varepsilon)$ для двух температур и скоростей деформации.

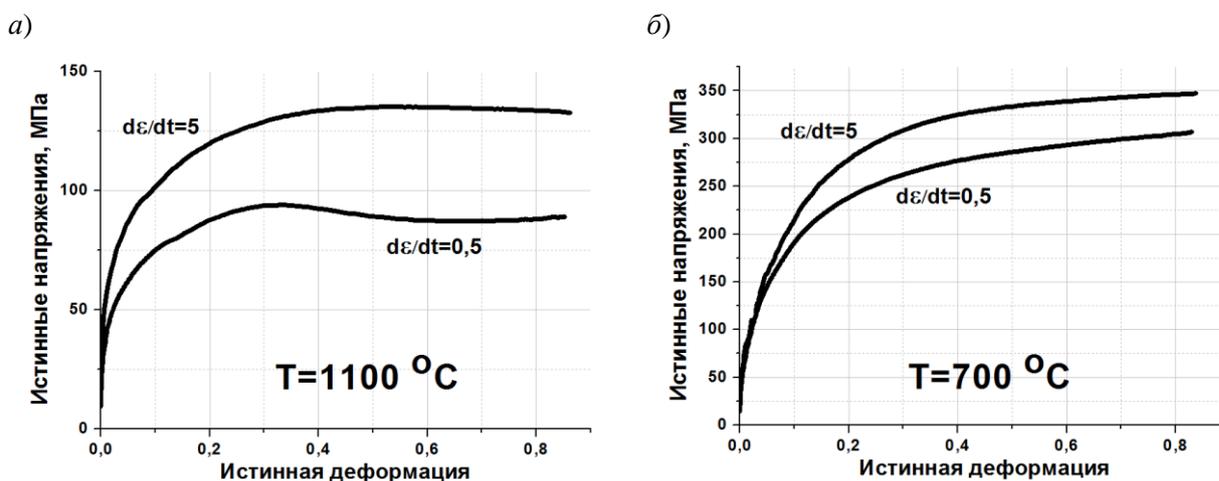


Рис.1. Зависимости напряжения пластического течения от степени деформации при испытаниях образцов, вырезанных из литого сляба, при температуре деформации 1100°C (а) и 700°C (б) со скоростями деформации $0,5$ и 5 c^{-1}

Исследование релаксационных свойств выполнено с использованием методики двойного нагружения при различных температурах, скоростях деформации и времен междеформационных пауз. На рис. 2 показан характерный вид кривых $\sigma(\varepsilon)$ для двойного нагружения. Долю релаксированного металла, для которого за время междеформационной паузы частично или полностью снимается деформационное упрочнение, вычисляли при помощи соотношения:

$$F = \frac{\sigma - \sigma_2}{\sigma - \sigma_1}. \quad (1)$$

Обозначение напряжений приведено на рис. 2. Используемые методики и соотношение (1) учитывают вклад в сопротивление деформации как процессов рекристаллизации, так и динамического возврата. Исследования показали, что за время междеформационных пауз при черновой прокатке для среднemasсовой температуры металла процессы релаксации напряжений и снятия деформационного

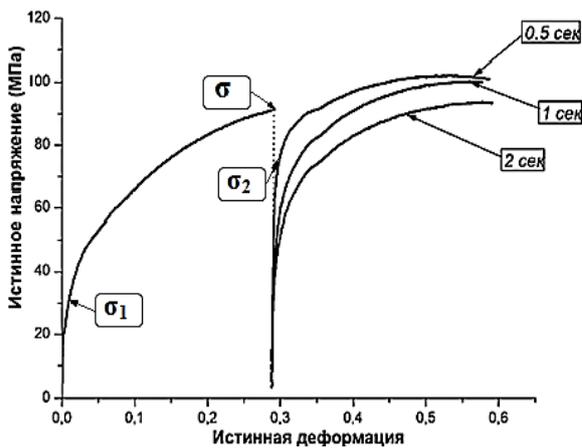


Рис. 2. Зависимости сопротивления деформации, полученные при испытаниях на двойное нагружение

упрочнения происходят практически полностью, а при чистой прокатке происходит накопление деформационного упрочнения (накопление деформации), которое необходимо учитывать при расчете сопротивления деформации. На рис. 3 показан характер релаксации напряжений при черновой прокатке и накопление деформации при чистой.

Полученная при выполнении экспериментов информация о сопротивлении деформации стали К60 была интегрирована в компьютерную программу *AusEvol+*, разработанную ранее в лаборатории “Исследование и моделирование структуры и свойств металлических материалов” СПбГПУ. Все дальнейшие расчеты сопротивления деформации выполнены при помощи этой программы, учитывающей возможности протекания в металле процессов деформационного упрочнения, динамической и статической рекристаллизации, термического возврата и выделения карбонитридов микролегирующих элементов. Для встраивания в систему автоматического управления станом была подготовлена специальная динамически подключаемая библиотека расчета сопротивления деформации на языке программирования C++.

Таким образом, выполнена необходимая для создания математических моделей расчета энергосиловых параметров предварительная работа, связанная с определением реологических и релаксационных свойств стали при прокатке.

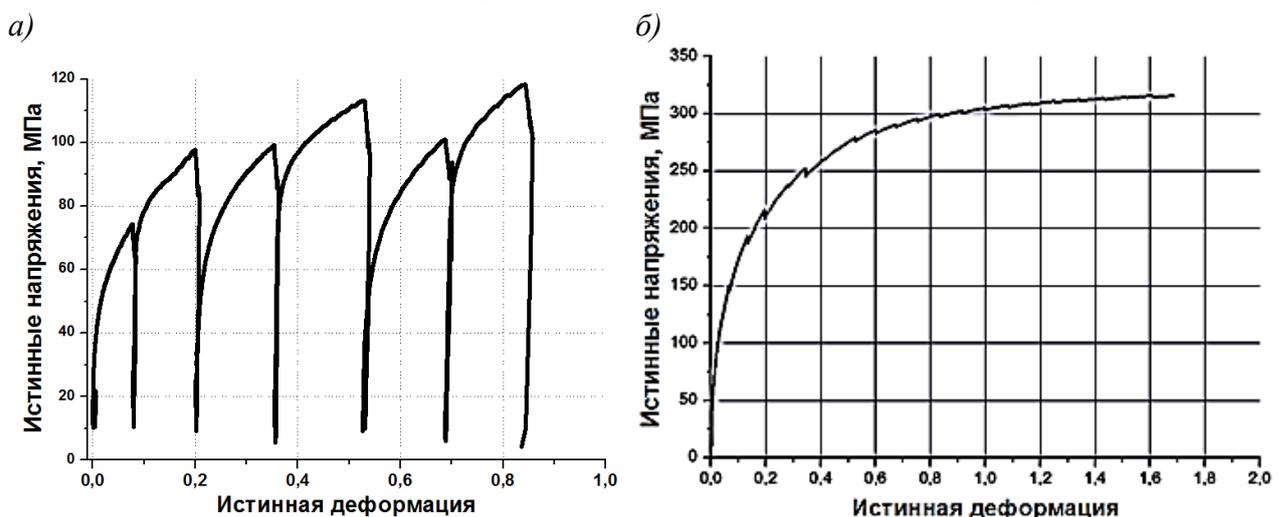


Рис. 3. Характер релаксации напряжений при черновой (а) и чистой (б) прокатке

Третья глава посвящена решению термомодеформационной задачи о горячей прокатке толстого листа на стане 5000. Перед началом прокатки сляб проходит ряд предварительных операций (транспортировка к гидросбиву окалины, непосредственно гидросбив, транспортировка до прокатной клетки), существенно

влияющих на его температурное поле, для расчета которого решали температурную задачу в *Deform-3D*. Исходный сляб разбивали на более, чем 150000 конечных элементов (20 по высоте, 75 по ширине и более 100 по длине). В качестве начальных условий моделирования приняли среднемассовую температуру выдачи сляба из печи. Для корректного задания граничных условий был проведен промышленный эксперимент по замеру температур верхней и нижней поверхностей 50 слябов толщинами 315 мм и 250 мм при помощи переносных лазерных пирометров и стационарных пирометров стана. Граничные условия задавали в виде поверхностного отрицательного теплового потока (*Heat Flux*), значения которого подбирали таким образом, чтобы обеспечить совпадение расчетных температур поверхности с экспериментальными поверхностными температурами. На рис.4 представлены распределения температур по среднему сечению сляба перед камерой гидросбива и перед началом прокатки.

По результатам решения тепловой задачи в пакете *Deform-3D* для этапа предварительных операций были получены быстродействующие параметрические зависимости падения среднемассовой температуры для головной, хвостовой и центральной частей раската от времени операции. Таким образом, получили информацию о распределении температур по сечению сляба и его среднемассовой температуре перед началом прокатки.

При расчете изменения температуры раската при прокатке в качестве начальных условий моделирования было принято тепловое поле сляба после пред-

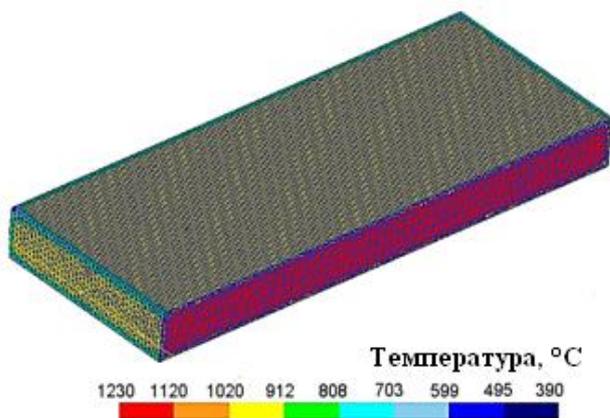


Рис. 4. Распределение температур по среднему сечению сляба после транспортировки к гидросбиву в течение 66 с

варительных операций. В программе *Deform-3D* создали конечноэлементную модель процесса, в которую закладывали реальные геометрические, временные, температурные, скоростные и деформационные параметры. Прокатываемый металл считали жесткопластическим телом, его характеристики задавали кривыми пластического течения, полученными экспериментально. Прокатные валки полагали абсолютно жесткими. Для калибровки модели по температуре использовали значения поверхностных температур раската, полученные с установленных на стане стационарных пирометров. Были определены следующие основные параметры: коэффициент теплопередачи в валки и ролики – $56 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$; коэффициент излучения 0,75. Удельные теплоемкости и коэффициенты теплопроводности прокатываемой стали и материала валков задавали как функции от температуры по справочным данным.

Моделировали прокатку слябов толщиной 250 и 315 мм по различным режимам обжатий, характерным для стана 5000. Каждый проход и каждую паузу на

реверс считали отдельными технологическими операциями. На рис. 5,а представлено температурное поле раската после 4-го прохода при черновой прокатке сляба толщиной 250 мм.

Поверхность раската при черновой прокатке подвергается воздействию ударов водо-воздушных струй клетцевого гидросбива. Для оценки влияния этого фактора на температуру раската была решена задача о толщине пластины, которая при известных свойствах металла и времени воздействия разогревается до заданных (определенных экспериментально) температур. Показано, что толщина слоя, захлажденного действием гидросбива, не превышает 4-5мм. По сравнению с толщиной раската, при которой допускается применение клетьевого гидросбива (> 90 мм), слой 4-5 мм является малой величиной, поэтому можно считать, что клетевой гидросбив не оказывает существенного влияния на среднемассовую температуру металла.

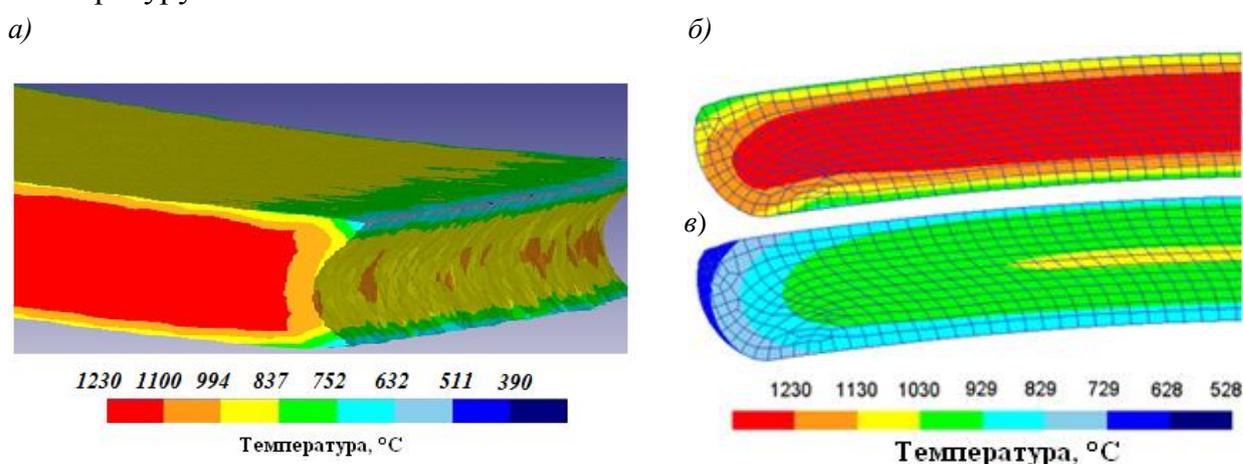


Рис .5. Температурное поле в среднем сечении раската после четырех черновых проходов (а) и температурное поле в среднем сечении раската толщиной 115,6 мм перед началом подстуживания (б), в конце подстуживания (в)

При моделировании подстуживания (покачивания на рольганге) раската между этапами черновой и чистовой прокатки в качестве начальных условий для моделирования принимали неравномерность температур, возникших при черновой прокатке. В качестве граничных условий задавали отрицательные тепловые потоки, которые обеспечивают за известное время понижение поверхностной температуры до температуры начала чистовой прокатки. На рис. 5,б,в показано температурное поле раската до и после подстуживания. На этапе чистовой прокатки, когда клетевой гидросбив не используется, граничные условия при решении тепловой задачи принимали таким образом, чтобы обеспечить совпадение расчетных и измеренных на стане температур.

Поскольку среднемассовую температуру металла замерить невозможно, для оценки адекватности расчетов среднемассовой температуры в программе *Deform-3D*, необходимой для расчета энергосиловых параметров, использовали косвенный метод, который состоит в сравнении расчетных $P_{расч.}$ и измеренных на стане $P_{эксп.}$ усилий прокатки при значениях сопротивления деформации, определенных на комплексе *Gleeble-3800*. Хорошая сходимость $P_{расч.}$ и $P_{эксп.}$ для черновой прокатки

(рис. 6) позволяет судить об адекватности расчета среднemasсовой температуры раската.

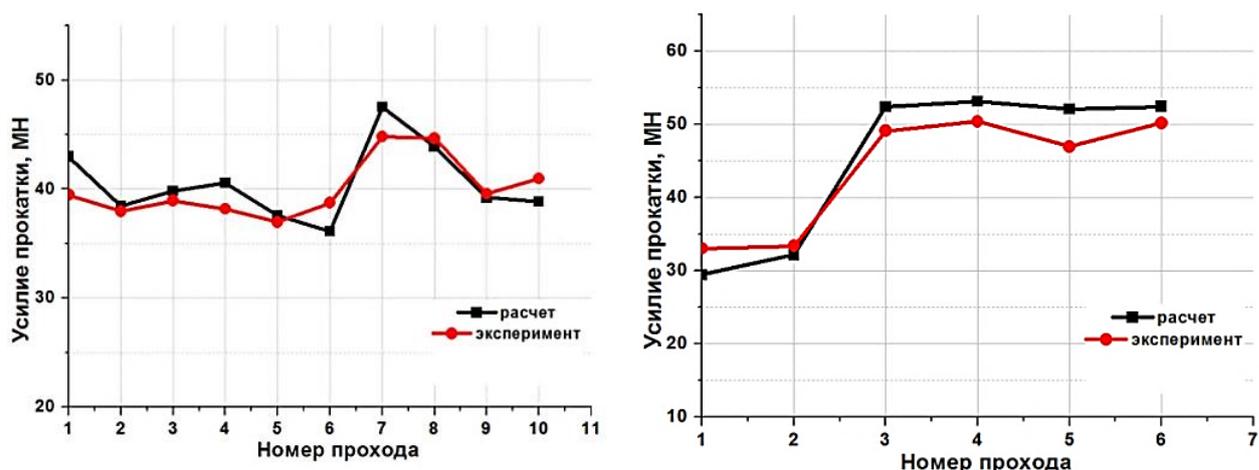


Рис. 6. Сравнение фактических усилий черновой прокатки с результатами расчета в *Deform-3D* для двух режимов черновой прокатки

По результатам выполненных расчетов и проведенных промышленных измерений температуры получены быстродействующие параметрические зависимости изменения среднemasсовой температуры по ходу прокатки и разработан алгоритм ее расчета для хвостовой, головной и центральной частей раската. Для этого были скорректированы формулы И. Шварцера – для прироста температуры во время прохода за счет работы пластической деформации, В. Луговского – для расчета потерь на излучение, Ю. Коновалова – для расчета теплотерь, связанных с теплопередачей в прокатные валки и ролики рольганга. На рис. 7 представлены результаты расчета изменения температур по проходам для головной и центральной частей раската.

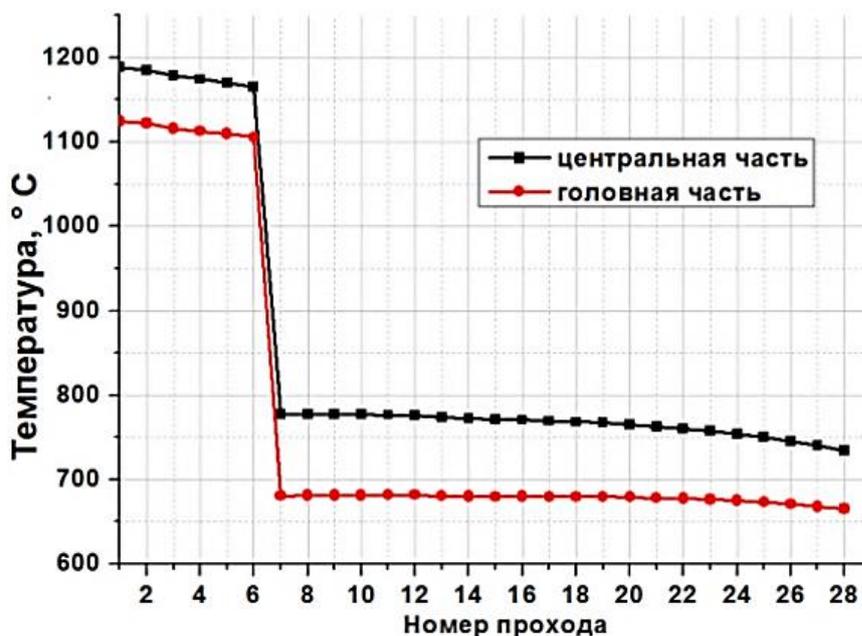


Рис. 7. Рассчитанные по упрощенной методике температурные режимы прокатки для центральной и головной частей раската

В четвертой главе изложены результаты исследований по разработке упрощенной быстродействующей методики расчета формоизменения прокатываемой полосы. Замеры ширины раската по ходу прокатки, выполненные при помощи специально установленных на стане лазерных дальномеров, позволили установить следующее:

1. Уширение при прокатке на стане 5000 мало, формирование требуемых габаритов раската возможно только за счет применения схем прокатки с уширительными пропусками.
2. Вогнутость боковой кромки образуется только на торцах и при кантовке переходит на боковые кромки.
3. Заполнение вогнутости происходит при изменении геометрии очага деформации – при переходе от высокого очага деформации к среднему.

Для более детального исследования уширения использовали результаты решения термомодеформационной задачи о горячей прокатке. В расчётах использовали модель трения по Зибелю. На рис. 8 показано сравнение формы раската, полученной расчетом в *Deform-3D*, с фактической, а также поля течения металла при различных параметрах деформации. Анализ расчетных данных показал, что в условиях высокого и среднего очагов деформации на уширение прокатки наиболее заметное влияние оказывают ширина очага b_0/l , высота очага l/h_{cp} и степень деформации в проходе ε . С учетом рекомендаций В.С. Смирнова упрощенные быстродействующие формулы для расчета уширения искали в виде:

$$\Delta b = \varepsilon^a \cdot \left(\frac{l}{h_{cp}} \right)^b \cdot \left(\frac{b_0}{l} \right)^c \cdot b_0. \quad (2)$$

Методом наименьших квадратов получены коэффициенты уравнения (2) для головной, средней и хвостовой частей раската, обеспечивающие наименьшее расхождение рассчитанных значений с результатами измерений геометрии готовых листов и недокатов. По результатам расчетов в *Deform-3D* получены зависимости для расчета удлинения полосы, которые, как и расчеты уширения по зависимости (2), показали точность, достаточную для прогнозирования энергосиловых параметров (табл.1).

Т а б л и ц а 1

Сравнение расчетных и фактических габаритов раската после 11 проходов прокатки

| | $b_{\text{гол.}}$ | $b_{\text{сер.}}$ | $b_{\text{хв.}}$ | $l_{\text{сер.}}$ | $l_{\text{кр.}}$ |
|---------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Расчет | 1659,2 | 1619,1 | 1662,5 | 6961,9 | 6578,4 |
| Измерения | 1658,0 | 1617,0 | 1661,0 | 6892,0 | 6653,0 |
| Δ , мм | 1,2 | 2,1 | 1,5 | 69,9 | -74,6 |

Индексы в табл.1: гол. – головная часть раската, сер. – средняя часть, хв. – хвостовая часть, кр. – кромка раската.

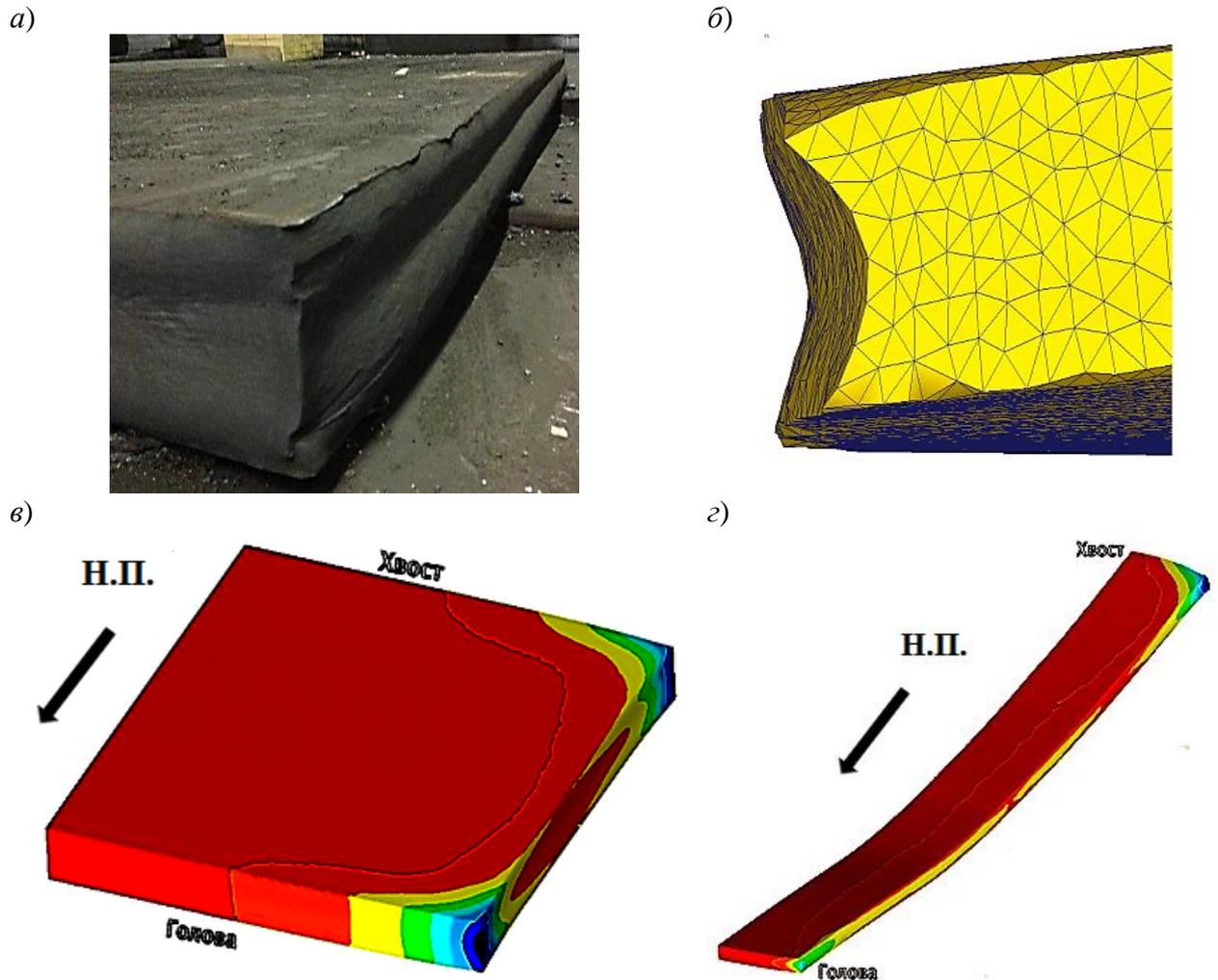


Рис. 8. Сравнение реальной формы раската (а) с расчетной (б) и характер полей течения металла в ширину (половина сляба): в – сляб $h_0 = 315$ мм; $b_0 = 4750$ мм; $\varepsilon = 19\%$, $l/h_{cp} = 0,63$; г – раскат $h_0 = 100$ мм; $b_0 = 900$ мм; $\varepsilon = 39\%$, $l/h_{cp} = 1,85$.
Н.П. – направление прокатки

В пятой главе рассмотрены особенности очага деформации при прокатке толстого листа с учетом неравномерности распределения температуры по толщине раската. Как известно, форма очага деформации, обуславливающая неравномерность распределения напряжений, чрезвычайно существенно влияет на коэффициент напряженного состояния $n = p_{cp}/K$, где p_{cp} – среднее напряжение в очаге деформации, K – сопротивление деформации. В работе показано, что неравномерность распределения температур также оказывает влияние на соотношение p_{cp}/K . Сопоставление расчетных усилий прокатки с измеренными на стане 5000 показало их существенное различие для высоких очагов деформации.

Было высказано предположение, основанное на гипотезах М.Я. Бровмана, В.П. Полухина и др., что причиной роста p_{cp} является влияние неравномерности температурного поля. Видно, что по сравнению с равномерным температурным полем (зависимости В.И. Зюзина, В.С. Смирнова, А.К. Григорьева-А.Д.

Карачунского) влияние неравномерности температуры особенно сильно при малых l/h_{cp} (рис.9).

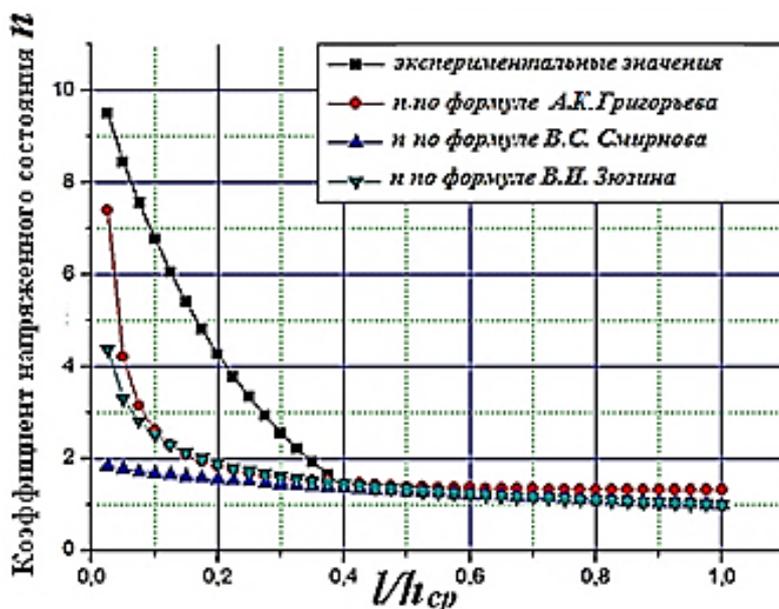


Рис. 9. Комплексное влияние неравномерности температур и геометрии очага деформации на давление металла на валки

В качестве количественной характеристики неравномерности температурного поля по толщине раската приняли соотношение толщин разогретых центральных слоев металла («ядра») и захлажденных поверхностных слоев («корочек»). Температура и толщина корочек определяется временем излучения, количеством воздействий клетового гидросбыва, временем контакта с валками, разогревом от ядра за счет теплопроводности и изменяется по ходу прокатки вплоть до чистой прокатки, когда различием температур по высоте раската можно пренебречь.

Расчетами в пакете *Deform* показано, что p_{cp}/K , зависит от толщины и температуры корочек (рис. 10) и фактически повторяет зависимости на рис. 9. Для учета этого факта в методику расчета усилия прокатки в условиях высокого очага деформации была введена поправка, зависящая от соотношения толщин ядра и корочек.

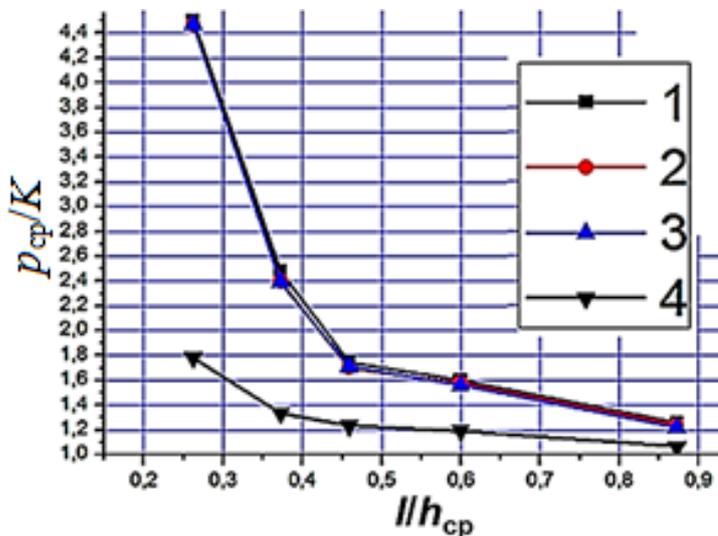


Рис. 10. Зависимость p_{cp}/K от значений параметра l/h_{cp} при толщине раската 90 мм, толщине захлажденных корочек 30 мм при температурах корочек 700° С (1), 900° С(2), 1000 ° С (3) и равномерной температуре раската (4)

Расчетами в *Deform* также показано, что чем выше толщина и ниже температура корочек, тем интенсивнее убывают растягивающие напряжения в центральных слоях металла при возрастании обжатия. Наличие захлаженных корочек значительно увеличивает интенсивность деформации в центральной по толщине части прокатываемого листа (рис.11), что может существенно повысить качество металла.

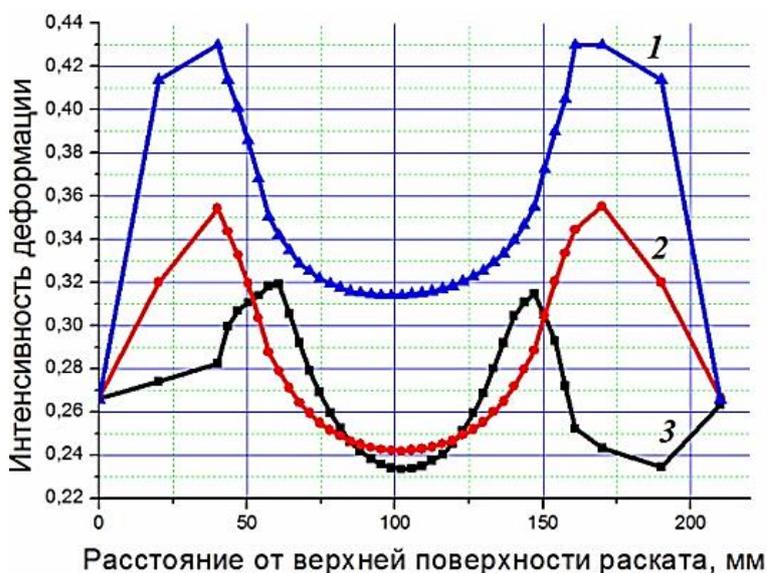


Рис.11. Распределение интенсивностей деформации по высоте раската при прокатке сляба толщиной 250 мм с относительным обжатием 19% при наличии корочки толщиной 50 мм с температурой 700°С (1) и 1000°С (2), а также при равномерной температуре раската 1200°С (3)

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений усилий прокатки в условиях средних очагов деформации ($l/h_{cp} > 1$) позволило скорректировать известную формулу М.Я. Бровмана для расчета коэффициента напряженного состояния:

$$n = 0,92 \frac{l}{h_{cp}} + 0,26 \frac{h_{cp}}{l}. \quad (3)$$

Для выполнения расчетов энергосиловых параметров все полученные результаты, в том числе библиотеку по сопротивлению деформации трубной стали категории прочности К60, представили в виде единой компьютерной программы. С ее помощью просчитали более 90 режимов прокатки (прокатанных полос) и определили значения усилия прокатки в 2111 проходах (рис. 12,13).

Результаты расчетов усилия прокатки использовали для расчета момента на валу и тока в якоре электродвигателей стана.

Выполненный анализ влияния геометрического фактора l/h_{cp} на значение коэффициента плеча ψ позволил получить выражение, обеспечивающее наименьшее расхождение экспериментальных и расчетных значений моментов прокатки (рис.14):

$$\psi = 0,53 + 0,09 \frac{l}{h_{cp}} - 0,08 \left(\frac{l}{h_{cp}} \right)^2. \quad (4)$$

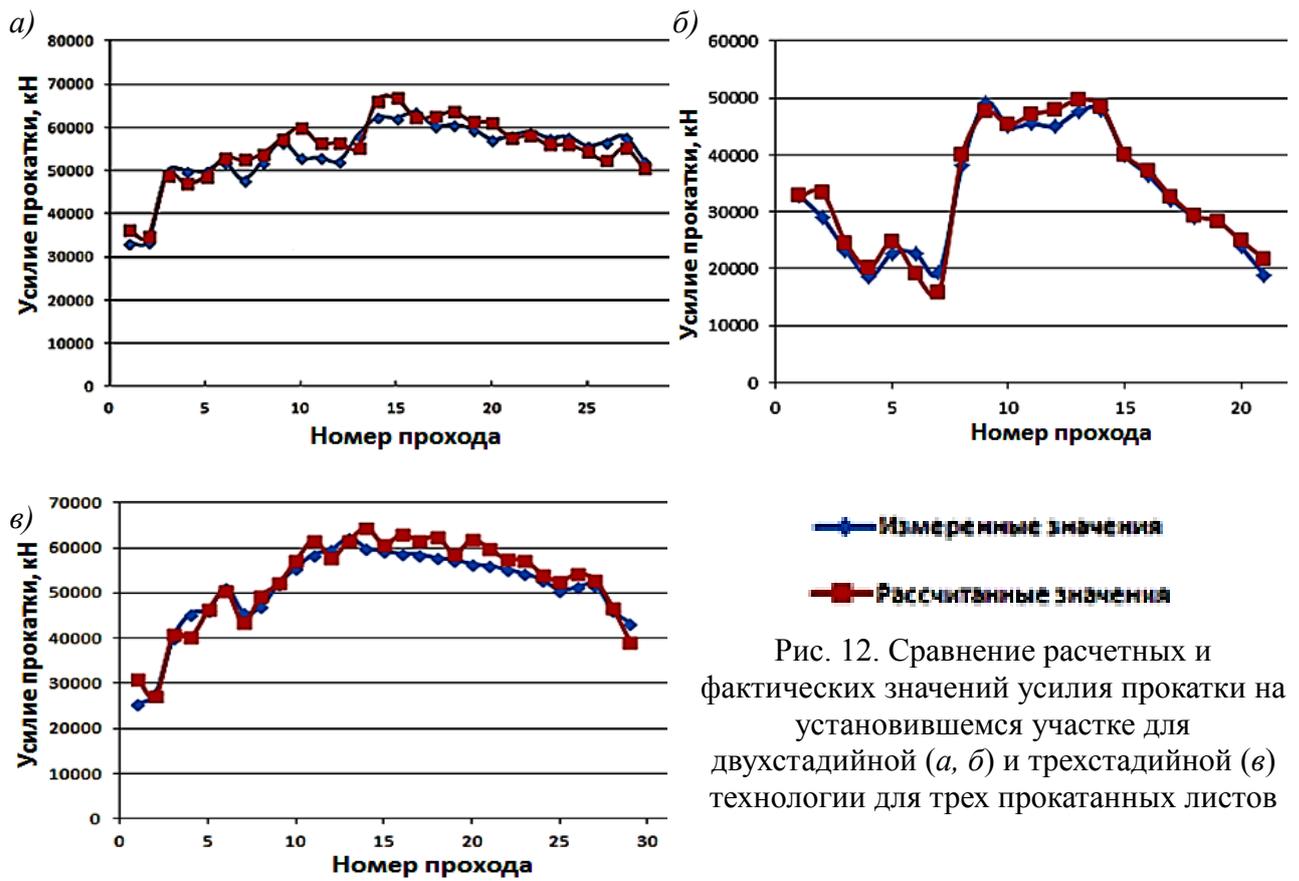


Рис. 12. Сравнение расчетных и фактических значений усилия прокатки на установившемся участке для двухстадийной (а, б) и трехстадийной (в) технологии для трех прокатанных листов

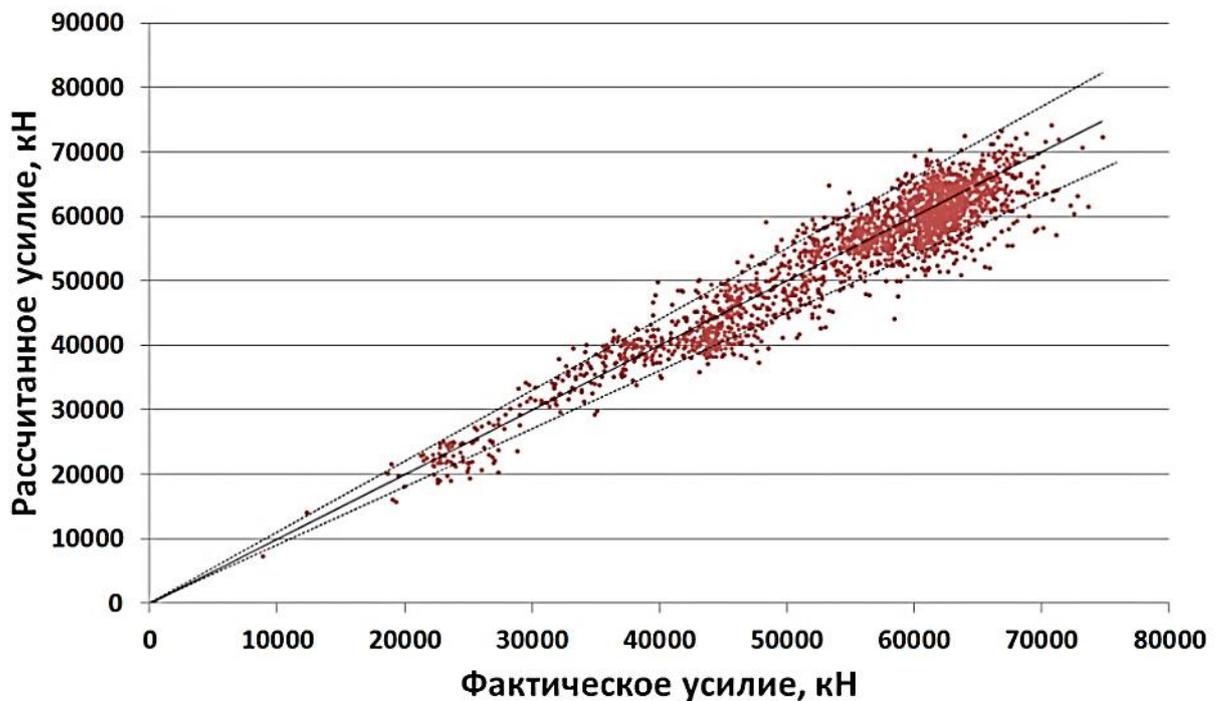


Рис. 13. Сравнение расчетных и фактических значений усилий прокатки на установившемся участке для выборки из 2111 проходов

Сравнение расчетных и экспериментальных значений тока в якоре электродвигателей стана позволило установить коэффициент пропорциональности между током и моментом на валу двигателя (рис. 14).

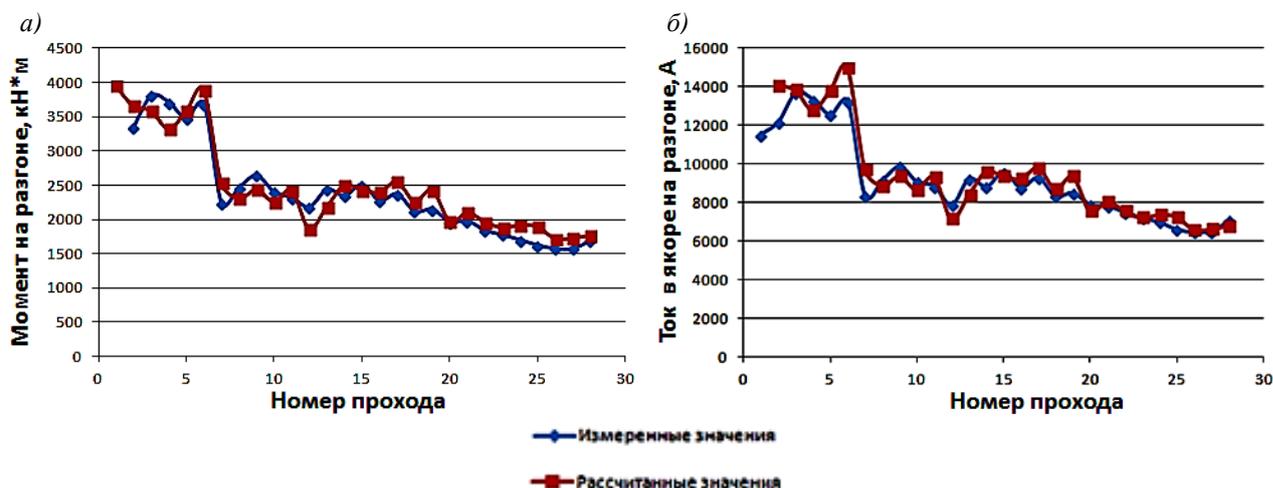


Рис. 14. Сравнение расчетных и фактических значений момента на валу (а) и тока в якоре электродвигателя (б) на участке разгона электродвигателей стана

Разработанные модели использовали для решения актуальных задач, стоящих перед технологами цеха. Количественно оценены возможности значительного уменьшения времени промежуточного подстуживания за счет использования установки контролируемого охлаждения и оптимизации существующих режимов прокатки по производительности путем сокращения общего количество проходов за счет увеличения обжатий. Для расчета режимов прокатки с максимально допустимыми энергосиловыми параметрами предложены быстродействующие алгоритмы для различных технологий прокатки толстого листа, предназначенные для интегрирования в систему управления станом 5000.

В **ПРИЛОЖЕНИИ А** представлены блок-схемы алгоритмов расчета протяжных, уширительных и продольных пропусков, позволяющие обеспечить максимальную загрузку стана по энергосиловым параметрам.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б содержит акт внедрения результатов работ в систему автоматического управления станом 5000 ОАО “Северсталь” от 17.10.2013.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. При помощи разработанной математической модели процесса горячей прокатки толстого листа на реверсивном стане 5000, обеспечивающей возможность анализа технологий прокатки, характера напряженно-деформированного состояния, неравномерности распределения температур и пластических деформаций, разработан комплекс математических моделей для расчета температуры металла по ходу прокатки, энергосиловых параметров прокатки и формоизменения раската. Высокая точность (для установившегося процесса прокатки средняя относительная ошибка расчета усилия прокатки составляет 5,6%, момента на валу электродвигателя – 4,4%, тока в якоре электродвигателя –

- 3,8%) и быстродействие позволяют использовать полученные результаты в *online*-системе управления станом 5000 для обеспечения оптимальной загрузки стана по производительности.
2. Неравномерность температурного поля по высоте раската существенно влияет на напряженно-деформированное состояние металла в условиях высокого очага деформации. Показано, что за счет создания определенного распределения температур по толщине раската можно значительно снизить величину растягивающих напряжений в центральных слоях раската вплоть до полного их отсутствия, а также существенно повысить прорабатываемость металла за счет увеличения интенсивности деформаций. Это должно минимизировать вероятность раскрытия внутренних дефектов и благоприятно сказаться на равномерности структуры и механических свойств по толщине готового листа.
 3. Неравномерность температурного поля по высоте раската существенно влияет на усилие прокатки, что необходимо учитывать при расчете энергосиловых параметров. Показано, что с увеличением высоты полосы и толщины захоложенных слоев металла среднее давление при прокатке резко возрастает. Таким образом, прокатка металла с захоложенными поверхностными слоями нецелесообразна при малых обжатиях, поскольку приводит к снижению производительности и сопровождается высокими энергозатратами
 4. Разработанный комплекс математических моделей позволяет количественно оценить возможности повышения производительности стана 5000 за счет сокращения времени вспомогательных технологических операций и назначения режимов обжатий с максимально допустимыми энергосиловыми параметрами. Созданные алгоритмы расчета режимов обжатий с максимально возможными энергосиловыми параметрами, включающие в себя совокупность разработанных математических моделей, приняты к внедрению в систему автоматического управления станом 5000.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Лунев В.А., Шишов И.А. Концепция расчета температурного режима прокатки на стане 5000 ОАО "Северсталь" // Современные металлические материалы и технологии (СММТ' 2011): труды международной научно-технической конференции. СПб. 2011. С. 205-209.
2. Глухов П.А., Шишов И.А. Исследование формоизменения металла в процессе горячей прокатки на стане 5000 ОАО «Северсталь» // Студенты и молодые ученые – инновационной России: материалы работ молодежной научной конференции. СПб. 2013. С. 169-171.
3. Глухов П.А., Шишов И.А. Расчет формы листа после горячей прокатки на стане 5000 ОАО «Северсталь» // Современные металлические материалы и технологии (СММТ' 2013): труды международной научно-технической конференции. СПб. 2013. С. 327-329.
4. Лунев В.А., Шишов И.А., Глухов П.А. Исследование тепловых потерь при

транспортировке сляба от методической печи до клетки на стане 5000 // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: Сб. науч. трудов. Екатеринбург. 2013. С. 370-373.

5. **Лунев В.А., Шишов И.А., Глухов П.А., Беляев А.А. Тепловые потери при прокатке толстого листа на стане 5000. Часть. 1. Теплотери на операциях, предшествующих прокатке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1. С. 146-152.**
6. **Колбасников Н.Г., Шишов И.А., Глухов П.А., Беляев А.А. Тепловые потери при прокатке толстого листа на стане 5000. Часть 2. Теплотери на этапах черновой прокатки, подстуживания, чисто-вой прокатки. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №3. С. 183-192.**
7. Колбасников Н.Г., Шишов И.А., Беляев А.А. Исследование влияния неравномерности температурного поля раската на характер напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при черновой прокатке на стане 5000 ОАО «Северсталь» // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии: Материалы I Международной научно-технической конференции. Череповец. 2013. С. 169-178.
8. **Колбасников Н.Г., Шишов И.А., Корчагин А.М., Беляев А.А. Исследование влияния неравномерности температурного поля раската на характер напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при прокатке толстого листа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №4. С. 150-156.**