Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Череповецкий государственный университет»

На правах рукописи

МИТРОФАНОВ Артем Викторович

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОКРАТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Специальность 2.6.4. – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Череповец – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЭНЕРГОСИЛОВОГО РАСЧЕТА И ОЦЕНКА РЕЗЕРВОВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ 11

1.1 Обзор известных работ по исследованию энергосиловых параметров и энергозатрат при ведении процесса непрерывной прокатки стальных полос 11

1.2 Результаты предварительных исследований 24

Выводы по Главе 1 28

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ГЛАВНОГО ПРИВОДА 4Х-ВАЛКОВОЙ СИСТЕМЫ 30

2.1 Оценка затрат мощности на вращение холостого опорного валка 4х-валковой системы 30

2.2 Разработка методики расчета требуемой мощности прокатки 34

Выводы по Главе 2 44

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ В ЧИСТОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ СТАНА 2000 45

3.1 Оценка требуемой мощности двигателей главных приводов 48

3.2 Экспериментальное исследование влияния условий деформирования стальной полосы на сопротивление деформации 54

Выводы по Главе 3 56

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НЕПРЕРЫВНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ С МИНИМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ 57

4.1 Исследование текущего уровня энергозатрат на действующем ШПСГП 57

4.2 Разработка усовершенствованной модели процесса горячей прокатки на ШПСГП 62

4.3 Алгоритм расчета режимов прокатки, обеспечивающих минимум энергозатрат на исполнение технологического процесса 70
4.4 Исследование влияния на уровень энергозатрат ШПСГП каждого из значимых факторов технологии 76
Выводы по Главе 4 80
ГЛАВА 5. ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ 82
5.1 Анализ влияния режимов прокатки на качество рядового сортамента и сортамента конструкционного назначения 84
5.2 Первая серия опытных прокаток и ее результаты 86
5.3 Вторая серия опытных прокаток с использованием режимов, скорректированных по результатам первой серии испытаний 89
5.4 Практическое применение разработанного алгоритма для штрипсового проката с повышенной прочностью и коррозионной стойкостью 92
Выводы по Главе 5 99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 100
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 102
ПРИЛОЖЕНИЕ А1 - Значение коэффициента «*c*» в зависимости от диаметра бочки, контактного давления и относительной скорости вращения рабочего валка 111
ПРИЛОЖЕНИЕ А2 - Фактические значения момента на вращение холостого опорного валка 114
ПРИЛОЖЕНИЕ А3 - Акт внедрения результатов работы 117
ПРИЛОЖЕНИЕ А4 - Заключение по результатам НИОКР 118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Уменьшение издержек производства плоского стального проката, в том числе горячекатаного, без ухудшения качества – актуальная научно-техническая задача. Наименее затратный вариант ее решения – оптимизация параметров технологического процесса на действующих станах с использованием математических моделей без дополнительных капитальных затрат на реконструкцию существующего или установку нового оборудования.

В этой связи повышение точности энергосиловых расчетов и разработка алгоритмов оптимизации технологических параметров процесса прокатки для снижения расхода энергии всего диапазона сортамента, производимого на широкополосных станах горячей прокатки (ШПСГП), является важной задачей.

В ряде работ известных ученых-прокатчиков (А.И. Целиков, А.А. Королев, В.Л. Мазур, Э.А. Гарбер, В.М. Салганик, С.Л. Коцарь, Ю.А. Мухин, И.А. Кожевникова и др.) разработаны и описаны различные методы экономии энергетических ресурсов при горячей и холодной листовой прокатке. В частности, показано, что наиболее эффективное воздействие на снижение затрат энергии можно осуществить, увеличив температуру полосы на входе в чистовую группу клетей, а также перераспределив частные обжатия в чистовой группе в пользу первых клетей, т.к. полоса в ней имеет более высокую температуру и, следовательно, более низкое сопротивление деформации. Кроме того, на снижение затрат энергии можно воздействовать увеличением межклетевых натяжений, что снизит контактное давления в очаге деформации, а, следовательно, и требуемую мощность прокатки. Однако, степень влияния каждого из перечисленных факторов, диапазоны их возможного варьирования, не ухудшающие качество металла, остаются недостаточно изученными.

Существенным ограничением применения этих методов является тот факт, что в них не учитываются процессы упрочнения и разупрочнения в стали, происходящие при прокатке на ШПСГП. Это обстоятельство препятствует

достижению максимальной энергоэффективности при перераспределении обжатий в чистовой группе клетей.

Степень разработанности проблемы. В публикациях отечественных ученых (Гарбер Э.А., Салганик В.М., Хлопонин В.Н., Фастыковский А.Р., Кожевникова И.А., Румянцев М.И., Песин А.М. и др.) есть результаты работ, направленных на повышение энергоэффективности процессов горячей широкополосной прокатки за счет оптимизации параметров нагрева металла, уменьшения рассеивания тепла при прокатке, введения элементов асимметрии, изменения частных обжатий и т.д. Однако, исследования показывают, что при горячей прокатке схожих типоразмеров порой наблюдаются различные уровни энергосиловых параметров, что указывает на необходимость дальнейшей проработки и промышленной проверки энергосберегающих режимов горячей широкополосной прокатки.

Объект и предмет исследования. *Объект исследования* – процесс непрерывной горячей прокатки стальной полосы на широкополосном стане. *Предмет исследования* – методы снижения энергозатрат при ведении технологического процесса горячей прокатки стальных широких полос в непрерывной группе клетей.

Цель работы и задачи исследования. Снижение энергозатрат процесса непрерывной горячей прокатки на основе моделирования процессов упрочнения и разупрочнения и создания комплекса уточненных моделей для оптимизации режимов обжатий.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Выявить и количественно оценить затраты дополнительной энергии в 4х- валковой системе, связанные с вращением опорных валков;

2. Выполнить анализ технологических факторов, физическое и компьютерное моделирование режимов прокатки в чистовой группе клетей ШПСГП 2000 и оценить возможность снижения затрат энергии на ведение технологического процесса;

3. Разработать методику компьютерной оптимизации режимов горячей прокатки в непрерывной группе клетей;

4. С использованием разработанной методики и промышленных данных выполнить анализ влияния технологических факторов горячей прокатки на уровень энергозатрат при производстве стальных полос;

5. Разработать, опробовать и внедрить режимы горячей прокатки, обеспечивающие снижение потребления электроэнергии двигателями главных приводов ШПСГП 2000.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что для 4х-валковой системы требуются дополнительные затраты энергии (30–35 %) по сравнению с 2х-валковой, обусловленные вращением опорных валков, в т.ч. на трение в подшипниках опорных валков (20–25 %) и трение качения в межвалковом контакте (10–15 %).

2. Впервые с применением комплекса методов, включающих физическое моделирование, аналитические энергосиловые расчеты и их оптимизацию методом симплекса, раскрыт и количественно описан механизм влияния чередующихся процессов деформационного упрочнения и разупрочнения в межклетевых промежутках на энергозатраты при непрерывной горячей прокатке.

3. Дано физическое обоснование разработанным энергосберегающим режимам прокатки на основе анализа реологических кривых, показавшее, что максимальная эффективность достигается при перераспределении обжатий в область максимального разупрочнения за счет процессов возврата и рекристаллизации (клети 7–11).

4. Разработан и апробирован алгоритм компьютерной оптимизации режимов прокатки, отличающийся от известных использованием уточненных энергосиловых и реологических моделей. Алгоритм позволяет перераспределять

обжатия по клетям при непрерывной горячей прокатке, обеспечивая снижение энергопотребления на 3–10 % без ухудшения качества проката.

Достоверность результатов работы.

Достоверность научных результатов обеспечена корректным использованием математических методов, включая метод конечных элементов (МКЭ) и статистические методы. Кроме того, полученные результаты согласуются с производственным опытом. По результатам апробации разработанных режимов горячей прокатки с использованием системы контроля расхода электроэнергии главными приводами клетей ШПСГП 2000 установлено, что фактическое снижение энергопотребления при прокатке опытных партий полностью соответствует предварительному прогнозу по модели.

Теоретическая значимость работы

Результаты исследования дополняют имеющиеся подходы к совершенствованию методов расчета параметров технологии непрерывной горячей прокатки стальных широких полос.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

1. Создан и апробирован в производственных условиях алгоритм оптимизации режимов непрерывной горячей прокатки, обеспечивающий проектирование технологических процессов со снижением расхода электроэнергии двигателями главных приводов широкополосного стана 2000 на 3,0–10,0 %.

2. Предложен и реализован на практике новый подход к планированию обжатий в чистовой группе клетей, который за счет управления процессами упрочнения и разупрочнения обеспечивает снижение энергопотребления без ухудшения структуры и механических свойств готового проката.

3. Результаты работы используются в учебном процессе и при проведении научно-исследовательской работы студентов по направлению подготовки «Металлургия» в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет».

Методология и методы исследования. Методы исследования основаны на применении комплекса взаимодополняющих теоретических и экспериментальных подходов, характерных для области обработки металлов давлением, включая разработку и программную реализацию алгоритма оптимизации на основе метода симплексов для поиска рационального распределения обжатий. Теоретическая часть работы включает аналитическое моделирование энергосиловых параметров с использованием уточненных методик, численное моделирование методом конечных элементов для проверки и уточнения распределения усилий и моментов в клетях, а также регрессионный и статистический анализ промышленных данных для выявления значимых корреляций между технологическими параметрами и энергопотреблением. Экспериментальные исследования выполнены в виде физического моделирования на лабораторном стане, исследований на установке термомеханического моделирования Gleeble 3800 для построения реологических кривых и серии промышленных испытаний на широкополосном стане 2000 ПАО «Северсталь». В ходе испытаний проводился контроль энергопотребления, микроструктуры и механических свойств готового проката для подтверждения эффективности и практической применимости разработанных решений.

Положения, выносимые на защиту.

1. Механизм влияния чередующихся процессов деформационного упрочнения и разупрочнения в межклетевых паузах на энергозатраты при непрерывной горячей прокатке, заключающийся в установленной зависимости сопротивления деформации в каждой клети от уровня остаточной деформации, определяемого предысторией нагружения.

2. Теоретическое и экспериментальное обоснование дополнительных затрат энергии в 4х-валковой системе (30–35 %), обусловленных трением в подшипниках опорных валков (20–25 %) и трением качения в межвалковом контакте (10–15 %).

3. Алгоритм компьютерной оптимизации режимов непрерывной горячей прокатки, основанный на методе симплекса и учитывающий уточненную энергосиловую модель с учетом потерь на привод опорных валков, реологическую

модель процессов упрочнения и разупрочнения, обеспечивающий снижение энергопотребления на 3–10 % без ухудшения качества проката.

4. Физическое обоснование энергосберегающих режимов прокатки на основе анализа реологических кривых, раскрывающее, что максимальная эффективность снижения энергозатрат достигается при перераспределении обжатий в клетях 7–11 чистовой группы, где реализуется область максимального разупрочнения металла за счет протекания процессов возврата и рекристаллизации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на IV Международной конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии» (г. Череповец, сентябрь 2019 г.); III Международной конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии» (г. Череповец, октябрь 2017 г.); на Всероссийской научно-практической конференции «Череповецкие научные чтения» (г. Череповец, 2016 г.); на конференции «Современные требования и металлургические аспекты повышения коррозионной стойкости и других служебных свойств углеродистых и низколегированных сталей» (г. Москва, июль 2015 г.).

Личный вклад автора. Автором лично разработаны теоретические основы исследования, которые включали в себя учет дополнительных затрат энергии на вращение холостого опорного валка в 4х – валковой системе, способ поиска параметров наименее энергозатратных режимов непрерывной горячей прокатки стальных полос. Выполнены лабораторные и промышленные эксперименты, которые включали в себя опытное определение кривых текучести стали на экспериментальной установке Gleeble 3800, а также апробацию и внедрение разработанных режимов на стане 2000 ПАО «Северсталь».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 4 статьи в российских журналах РИНЦ, 3 статьи в сборниках трудов III и VI Международной конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии» и «Череповецкие научные чтения», получено 3 патента РФ и 1 международный патент.

Соответствие паспорту специальности. Проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 1 и 4 специальности 2.6.4. − Обработка металлов давлением: п.1. Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов.; п. 4. Оптимизация способов, процессов и технологий обработки металлов давлением для производства металлопродукции с целью повышения характеристик качества продукции.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 80 наименований. Работа содержит 118 страниц машинописного текста, 26 рисунков, 39 таблиц и 4 приложения.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЭНЕРГОСИЛОВОГО РАСЧЕТА И ОЦЕНКА РЕЗЕРВОВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

1.1 Обзор известных работ по исследованию энергосиловых параметров и энергозатрат при ведении процесса непрерывной прокатки стальных полос

Первое по времени комплексное исследование эффективности технологического процесса ШПСГП выполнила в 1968-1977 гг. группа ученых Московского института стали и сплавов (МИСиС) во главе с Ю.Д. Железновым и Г.Г. Григоряном [1-29].

Своей основной задачей авторы считали применение системного подхода к управлению технологическим потоком стана. Для ее решения они разработали системы автоматического регулирования натяжения, ширины, толщины и формы (плоскостности) полос, а также критерии и алгоритмы их оптимизации.

В данных работах обоснован критерий эффективности сквозной технологической линии стана от нагревательных печей до моталок.

В результате внедрения этих разработок на действующем ШПСГП «2000» Новолипецкого металлургического комбината была повышена производительность и улучшено качество металла.

Вопросы точности энергосиловых расчетов и оптимизации технологических параметров действующего стана по критерию «минимум расхода энергии» в этих работах не рассматривались.

В 1991 г. были опубликованы справочник по технологии прокатного производства [30] и монография по горячей прокатке широких полос [31].

В справочнике [30] подробно изложена технология производства горячекатаных полос на ШПСГП, в том числе методика расчета затрат электроэнергии, однако погрешности методик и методы уменьшения этих затрат не рассмотрены.

В монографии [31] рассмотрены варианты компоновочных решений при конструировании ШПСГП, в том числе – обеспечивающие уменьшение затрат энергии. Изложены энергосберегающие технологии нагрева слябов перед горячей прокаткой. В описании технологических режимов прокатки акцент сделан на влиянии профилеразмеров полос на загрузку главных двигателей стана.

Вопросы уменьшения затрат энергии путем оптимизации технологических параметров прокатки в монографии [31] не рассматривались. В работе не представлены способы и подходы к расчету обжатий и натяжений полосы при прокатке, которые обеспечивали наилучшую микроструктуру полосы или минимально возможный уровень энергозатрат.

В учебном пособии [32], опубликованном в 1995 г., подробно изложены методы расчета технологических режимов горячей прокатки листовой стали. В отличие от упомянутых выше публикаций, в этом учебном пособии указано, что при прокатке в клетях чистовых групп ШПСГП в девяностых годах двадцатого века стали применять технологическую смазку. Это позволило увеличить производительность станов на 3-10 % и уменьшить на 5-10 % энергозатраты, однако ухудшило захватывающую способность валков, а в ряде случаев потребовалось дополнительно очищать от смазки поверхность горячекатаных полос. Задача оптимизации режимов горячей прокатки в этой работе не упомянута.

В 1997 г. материалы по рассматриваемой тематике опубликованы в двух монографиях [33,34] и сборнике научных трудов Магнитогорской горно-металлургической академии [35].

Монография [33] подробно излагает методы экономии металла на всех стадиях прокатного производства, вопросы экономии электроэнергии в ней не рассматриваются.

В монографии [34] изложены методы формирования потребительских свойств листов на ШПСГП, температурные условия горячей прокатки полос, технологическое обеспечение качества листов различного назначения. Вопросы экономии электроэнергии в ней, как и в монографии [33], не рассматривались.

В сборнике научных трудов [35] рассматриваются прогрессивные схемы и технологические процессы листовой, сортовой прокатки и производства метизов, методы экономии энергии путем оптимизации режимов прокатки в нем отсутствуют.

Аналитический обзор публикаций 1998-2001 г.г. выявил только два сборника материалов научно-технических конференций, содержащих вопросы, относящиеся к ШПСГП: 2й Всероссийской, состоявшейся в г. Череповце [36], и Международной, состоявшейся в г. Липецке [37].

В сборнике [36] методы экономии энергии в листопрокатном производстве не рассматривались, а в сборнике [37] опубликован доклад липецких ученых о влиянии вертикальных обжатий в черновой группе клетей ШПСГП на расход энергии. Проблема экономии энергии в процессе работы горизонтальных валков, решающих основную задачу – превращение сляба в тонкий лист – в этом докладе не затронута.

За период 2002-2006 г.г. проблематика, относящаяся к процессам горячей прокатки стальных полос, обнаружена лишь в сборнике материалов международной конференции «IF STEELS 2003», состоявшейся в мае 2003 г. в г. Токио (Япония), посвященной свойствам и применению IF- сталей [38]. В этом сборнике содержатся статьи о новых методах расчета энергосиловых параметров ШПСГП.

Начиная с 2007 г., количество публикаций в России, посвященных ШПСГП (модернизации оборудования, совершенствованию технологии, развитию методов ее моделирования), существенно возросло. Значительная их часть [39-50] содержит материалы, авторами которых являются представители череповецкой научной школы листопрокатчиков.

В связи с актуальностью задачи экономии энергии авторы этих работ выполнили критический анализ известных (на тот период считавшихся классическими) методов энергосилового расчета ШПСГП.

Уменьшение освоенной толщины горячекатаных полос с 2,0-3,0 мм до 0,8-1,2 мм, ранее относившихся к сортаменту станов холодной прокатки, привело к росту суммарных и частных обжатий, что вызвало повышение нагрузок на рабочие клети и их главные приводы. В ряде случаев эти нагрузки превысили паспортные характеристики двигателей. Необходимо было оценить пригодность классических методов энергосилового расчета для изменившихся условий работы станов. Это связано с тем, что с уменьшением толщины полос увеличивается доля упругих участков в общей длине очага деформации. В большинстве известных методик при расчете контактных напряжений и работы прокатки в очаге деформации используется уравнение пластичности, т.е. не учитывается тот факт, что оно применимо только для пластической зоны очага деформации. Данные о том, какую погрешность это вносит в энергосиловой расчет, в литературе отсутствовали. Между тем, при горячей прокатке наиболее тонких полос, длина упругих участков достигает 18-30 % от общей длины очага деформации, поэтому в новых условиях данный вопрос приобрел большую актуальность.

Нуждались в уточнении методики расчета напряжений контактного трения в очагах деформации ШПСГП. В большинстве известных методик не учитывалось то, что при горячей прокатке преобладающую часть очага деформации занимает зона прилипания, в которой напряжения трения, работа и мощность прокатки зависят не от коэффициента трения, а от сопротивления сдвигу материала полосы.

В сумме из-за указанных причин погрешности энергосиловых расчетов достигали 30-40 % и более, в связи с чем достоверность оптимизационных моделей процессов прокатки была бы весьма низкой.

В указанных публикациях изложены новые решения в теории энергосиловых расчетов, проверенные в промышленных условиях, существенно повысившие точность этих расчетов:

- напряжения в очаге деформации определяют отдельно на упругих и пластических участках, при этом не упругих участках, вместо условия пластичности, используют закон упругости;

- достоверно определяют протяженности всех участков и координату нейтрального сечения, а также длину зоны прилипания;

- для расчета затрат энергии в зоне прилипания используют, вместо коэффициента трения, сопротивление сдвигу материала полосы;

- учитывают, что валки совершают полезную работу только в зоне отставания, а в зоне опережения полоса возвращает валкам часть затраченной энергии.

Математические модели, основанные на указанных положениях, обеспечили выполнение энергосилового расчета ШПСГП со средней погрешностью 5-7 %, которая значительно меньше, чем при расчетах по известным моделям. Однако максимальные погрешности составили 12-14 %, следовательно, задача повышения точности энергосиловых расчетов ШПСГП не потеряла актуальности.

В частности, требует решения один из проблемных вопросов, ранее не рассмотренный в трудах череповецкой научной школы прокатчиков – уменьшение погрешности расчета затрат приводом рабочих валков энергии на вращение холостых опорных валков.

Эти затраты зависят от величины коэффициента трения качения между рабочими и опорными валками. Методика расчета указанного коэффициента применительно к станам горячей и холодной прокатки изложена в монографии [48], однако детальная проверка точности этого расчета выполнена только на станах холодной прокатки.

Важность решения этого вопроса для ШПСГП объясняется тем, что, по данным [48], затраты мощности на трение качения на этих станах составляет 29-68 % от суммарной мощности привода рабочих клетей.

Кроме не полностью изученного вопроса о погрешностях расчета затрат энергии на межвалковое трение качения, в публикациях череповецкой научной школы прокатчиков не до конца решена и задача оптимизации параметров технологии ШПСГП с точки зрения минимизации расхода энергии на ведение процесса горячей прокатки.

Так, в публикациях [41, 42, 43, 46] из вышеуказанного списка указано, что наиболее эффективное воздействие на затраты энергии можно осуществить, увеличив температуру полосы на входе в чистовую группу клетей, а также перераспределив частные обжатия в чистовой группе в пользу первых клетей, т.к. полоса в ней имеет более высокую температуру и, следовательно, более низкое сопротивление деформации. Кроме того, на затраты энергии можно воздействовать увеличением межклетевых натяжений. Однако степень влияния каждого из перечисленных факторов, диапазоны их возможного варьирования, не ухудшающие качество металла и не снижающие производительность стана, до конца не исследованы.

Кроме указанных публикаций, в этот период были опубликованы справочник [52] и учебное пособие [53], в которых подробно изложена технология производства горячекатаных полос по всему циклу. В справочнике [52] полностью отсутствуют сведения о снижении энергозатрат, экономии энергии в этом производстве.

В учебном пособии [53] упоминается задача оптимизации режима прокатки, однако алгоритм оптимизации не раскрыт, методы уменьшения затрат энергии не изложены, на какие технологические параметры нужно для этого воздействовать – не указано.

Также в данный период опубликованы работы, которые рассматривают применимость нейросетевого программирования для оптимизации процесса горячей прокатки. Так, итальянские авторы, разработали модель на основе нейронных сетей, которая способная предсказать время, необходимое для черновой и чистовой прокатки в зависимости от определенных характеристик и параметров процесса горячей прокатки. Конечная цель модели - повысить эффективность избегая столкновений и очереди, которые вызывают излишнюю трату времени и энергии [54]. Технологические режимы горячей прокатки стальных полос данная модель не учитывает.

Другим примером может являться работа, направленная на применение нейронных сетей для моделирования энергосиловых параметров клетей чистовой группы НШПСГП 2000 [55]. Авторы работы представили применение нейросетевых технологий для прогнозирования энергосиловых параметров горячей прокатки. Полученные нейронные модели для прогнозирования силы тока в клетях чистовой группы позволяют аналитически исследовать оптимальный с точки зрения энергоэффективности режим прокатки при варьировании основных параметров. В данной работе показана как меняется точность прогнозирования в зависимости от использования различных видов нейросетевых моделей. Данные о фактической применимости и полученных эффектах в статье не приводятся.

В работе [56] авторы из Австрии исследовали три промышленных объекта (стан горячей прокатки, установка литья и установка промывки в цехе гальванизации). Ими был изучен потенциал снижения энергопотребления и потребление воды с использованием метода ТРИЗ. Были проведены исследования неидеальной реализация процесса с точки зрения практического применения оборудования и непрерывного процесса, потребления инженерных сетей и поддержки инфраструктуры предприятия.

Работа [57] посвящена повышению эффективности работы станов горячей прокатки. Авторы проанализировали валовое потребление энергии крупного венгерского производителя стали ISD Dunaferr Ltd. Чтобы сохранить благоприятную рыночную позицию компании и экономическую конкурентоспособность, бережливое использование энергоресурсов, в том числе сокращение энергозатрат на конкретные процессы и повышение энергоэффективности, представляется ключевым фактором. С точки зрения удельного потребления энергии, процесс горячей прокатки в значительной степени способствует общему потреблению энергии.

Авторы данной работы направили усилия на поиск скрытых корреляций из большой базы данных и их анализ. Сбор данных был выполнен с помощью

разработанного инструмента RapidMiner. При формировании базы данных были учтены следующие параметры:

1. Данные, связанные с процессом прокатки:

а) химический состав заготовок, производственный сортамент;

б) температурные параметры прокатки и смотки.

2. Потребляемая мощность в зависимости от значений деформации.

3. Потребляемая мощность в зависимости от различного целевого качества продукта.

По мнению авторов после извлечения данных, должны быть установлены корреляции между потреблением электроэнергии и параметрами процесса (качество, размер, температура), но сослались, что эта работа будет выполнена в дальнейшем. Сами корреляционные связи в работе не представлены.

Представленные модели основаны на анализе данных, полученных с производственных агрегатов, и не учитывают физико-химические процессы, происходящие во время прокатки на ШПСГП.

В работе [58] процесс непрерывной горячей прокатки был смоделирован в программе DEFORM-3D. По результатам такого моделирования была проведена оценка энергозатрат для двух режимов обжатий стальной заготовки в одной клети.

В публикации [59] в качестве одного из методов снижения энергозатрат при непрерывной горячей прокатке предлагается использование систем подачи смазки для прокатки при производстве горячекатаного проката. В работе отмечено, что для достижения наилучшего результата в части минимизации энергоемкости технологического процесса, при реализации технологии прокатки с подачей смазки, необходимо оптимизировать способ подачи смазочного материала, его расход, состояние поверхностей бочек рабочих валков. В работе отмечено, что технология подачи смазки на поверхность бочек рабочих валков используются в ограниченном режиме, а снижение энергопотребления незначительно: до 3-6 %.

В работе [60] представлены результаты построения регрессионной модели для оценки энергозатрат в зависимости от параметров режимов прокатки в каждой

клети стана «2000» Магнитогорского металлургического комбината, а также от наличия подачи смазки на поверхность бочек рабочих валков.

Исследования в области оптимизации энергозатрат при непрерывной горячей прокатки тонких широких полос выполнены в труде [61]. В работе для количественного анализа энергопотребления при горячей прокатке построена численная модель энергопотребления, которая описывает взаимосвязь между энергопотреблением и ключевыми параметрами прокатки в процессе горячей прокатки. Отмеченная имитационная модель реализована в среде Matlab/Simulink. В результатах исследования сказано, что опытные данные согласуются с результатами моделирования. Продемонстрировано влияние на параметр требуемой мощности двигателей главных приводов ключевых параметров, таких как радиус валка, обжатия, температуры полосы и скорости прокатки.

В работе [62] обсуждается оперативная минимизация энергопотребления при горячей прокатке сортового проката.

В исследовании [63] с помощью серии конечно-элементного (FE) моделирования процесса изучается влияние различных технологических переменных на некоторые факторы процесса горячей прокатки, в том числе на величину мощности прокатки.

Из проведенного обзора можно заключить, что на величину требуемой мощности привода рабочих валков будут влиять факторы технологии, которые в значительной степени определяются протекающими в материале полосы процессами.

Для понимания таких процессов рассмотрим известные численные алгоритмы для моделирования процессов структурообразования аустенита, развивающихся в стали во время термодеформационной обработки вплоть до стадии ускоренного охлаждения, на которой аустенит распадается с образованием различных продуктов фазового превращения, определяющих конечную микроструктуру и механические свойства проката.

К числу основных процессов структурообразования аустенита, протекающих последовательно или параллельно относятся рост зерна, возврат, динамическая и статическая рекристаллизация, а также индуцированное пластической деформацией выделение карбонитридов микролегирующих элементов (МЛЭ).

1. Рост зерен, протекающий при нагреве металла, а также во время меж-деформационных пауз. Движущей силой данного процесса является уменьшение суммарной поверхностной энергии границ зерен, а кинетика процесса определяется химическим составом стали, температурой и структурой материала.

2. Деформационное упрочнение протекает одновременно с началом пластической деформации, приводит к повышению сопротивления деформации, зависит от температуры, степени и скорости деформации, химического состава, структуры материала. Зависимость имеет нелинейный характер, приводит к значительному возрастанию неравновесности системы, к резкому возрастанию плотности дислокаций и накопленной упругой энергии.

3. Возврат приводит к частичному снятию деформационного упрочнения за счет аннигиляции дислокаций, перестройки их в более равновесные конфигурации, а также за счет образования малоугловых низкоэнергетических границ внутри исходного зерна аустенита. Протекает как вовремя пластической деформации (динамический), так и после снятия нагрузки (статический).

4. Динамическая рекристаллизация (DRX) протекает непосредственно во время деформации. Представляет собой перестройку структуры деформированного металла со значительным уменьшением деформационного упрочнения за счет образования новых практически бездефектных зерен в пределах исходного деформированного зерна аустенита. Движущие силы динамической рекристаллизации и возврата – уменьшение, накопленной во время пластической деформации, упругой энергии дефектов кристаллического строения. Кинетика динамической рекристаллизации зависит от температуры, степени, скорости деформации и химического состава стали. В основном, DRX протекает при высокой температуре и небольшой скорости деформации. В определенных

условиях скорость снятия напряжений (разупрочнение) при DRX может превышать скорость упрочнения, при этом на зависимости истинных напряжений от степени деформации σ(ε) наблюдается спад после достижения максимума.

5. Статическая рекристаллизация (SRX), так же как и динамическая, приводит к снятию накопленного во время деформации упрочнения и появлению новых недеформированных зерен, но, в отличие от DRX, происходит во время меж-деформационных пауз без участия приложенных нагрузок.

6. Выделение частиц карбонитридов микролегирующих элементов (МЛЭ) – Ti,Nb,V,Al(C,N) характерно для современных высокопрочных низколегированных сталей, легированных титаном, ниобием, ванадием и алюминием. Эти мельчайшие частицы выделяются из твердого раствора аустенита при вполне определенных температурах, зависящих от концентрации МЛЭ, содержания углерода и азота. После их выделения во многом изменяется характер структурообразования – процессы рекристаллизации, возврата и роста в значительной степени затормаживаются, что создает условия для накопления упругой энергии деформационного упрочнения, которая играет важнейшую роль в движущих силах и кинетике последующих фазовых превращений.

Трудности математического описания возврата, рекристаллизации и выделения карбонитридов МЛЭ состоят в том, что эти процессы могут происходить одновременно, оказывая взаимное влияние на движущие силы и кинетику друг друга.

На рисунке 1.1 схематично показана последовательность технологической обработки при горячей прокатке и указаны процессы формирования структуры, развивающиеся на разных этапах. Конечная микроструктура стали, образующаяся в результате распада аустенита при ускоренном охлаждении, и, соответственно, ее механические свойства в значительной степени определяются размером зерна и степенью остаточной деформации аустенита перед началом охлаждения. Кроме этого, кинетика распада аустенита и образующаяся в результате микроструктура сталей зависит от содержания МЛЭ (особенно Nb) в твердом растворе, которое

определяется степенью завершенности индуцированного деформацией выделения частиц карбонитридов.

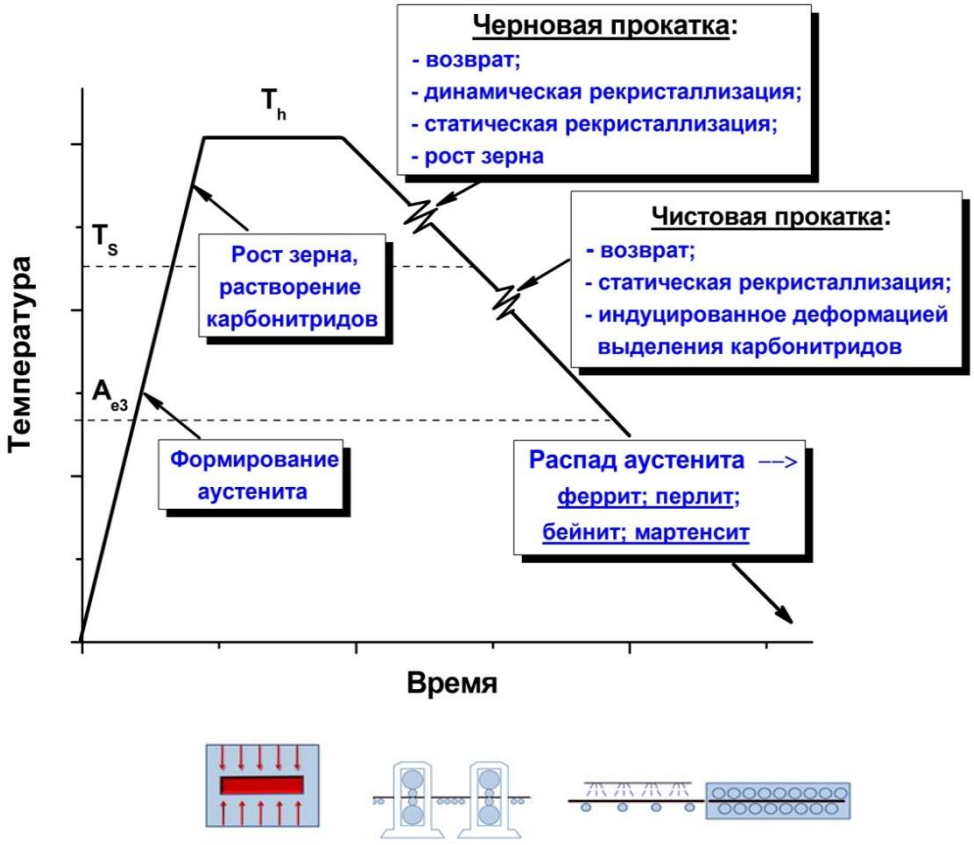


Рисунок 1.1 – Процессы структурообразования, развивающиеся в стали на разных стадиях технологической обработки при горячей прокатке. T_S – температура сольвуса карбонитридов; T_h – температура гомогенизирующей выдержки сляба

Во время пластической деформации происходят процессы деформационного упрочнения, связанные с размножением дислокаций и формированием ими последовательного ряда структур. Характер структуры деформированного металла и накопленное деформационное упрочнение задают неравновесность системы [58]. Одновременно с ростом деформационного упрочнения и сопротивления деформации происходят самопроизвольные процессы (динамический возврат и рекристаллизация), которые направлены на снижение неравновесности системы в стремлении ее к минимуму накопленной энергии. Эти процессы контролируются диффузией и направлены на деструкцию сформированных дислокационных

структур. Начинаются они в тот момент, когда в металле появилась избыточная (накопленная) энергия, и продолжаются до тех пор, пока деформационное упрочнение не будет снято полностью, а накопленная энергия не будет выведена из металла в виде тепловой энергии.

Динамический возврат представляет собой аннигиляцию дислокаций, выстраивании их в более равновесные конфигурации – сетки или малоугловые низкоэнергетические границы. Однако, процессы возврата не успевают снимать деформационное упрочнение полностью, особенно в том случае, если скорость деформации высока. Начиная с некоторой величины деформационного упрочнения или степени деформации, характерной для каждой скорости и температуры деформации, включается дополнительный механизм разупрочнения – динамическая рекристаллизация. Она происходит непосредственно во время горячей пластической деформации под действием внешних напряжений, которые стимулируют этот процесс. Собственно динамическая рекристаллизация состоит в образовании зародышей новых рекристаллизованных зерен, в которых практически нет дислокаций, и в последующем их росте. Как правило, новые динамически рекристаллизованные зерна возникают на границах зерен, в первую очередь на стыках зерен, где поверхностная энергия границ и действующие напряжения наиболее велики, и термодинамические условия образования зародышей удовлетворяются в первую очередь. И возврат, и рекристаллизация являются термически активируемыми процессами, и полнота их протекания зависит от интенсивности диффузионных процессов, которые, как мы уже упоминали, зависят от химического состава аустенита.

Совокупность трех протекающих процессов – деформационного упрочнения, термического возврата и динамической рекристаллизации, определяет величину деформирующих напряжений, причем результирующее напряжение зависит от соотношения интенсивности этих процессов, зависящих от температуры, степени и скорости деформации. Чем ниже скорость деформации и выше температура, тем более интенсивно протекает термическое разупрочнение – возврат и

рекристаллизация. Ниже на рисунке 1.2 представлены основные факторы, влияющие на сопротивление деформации:

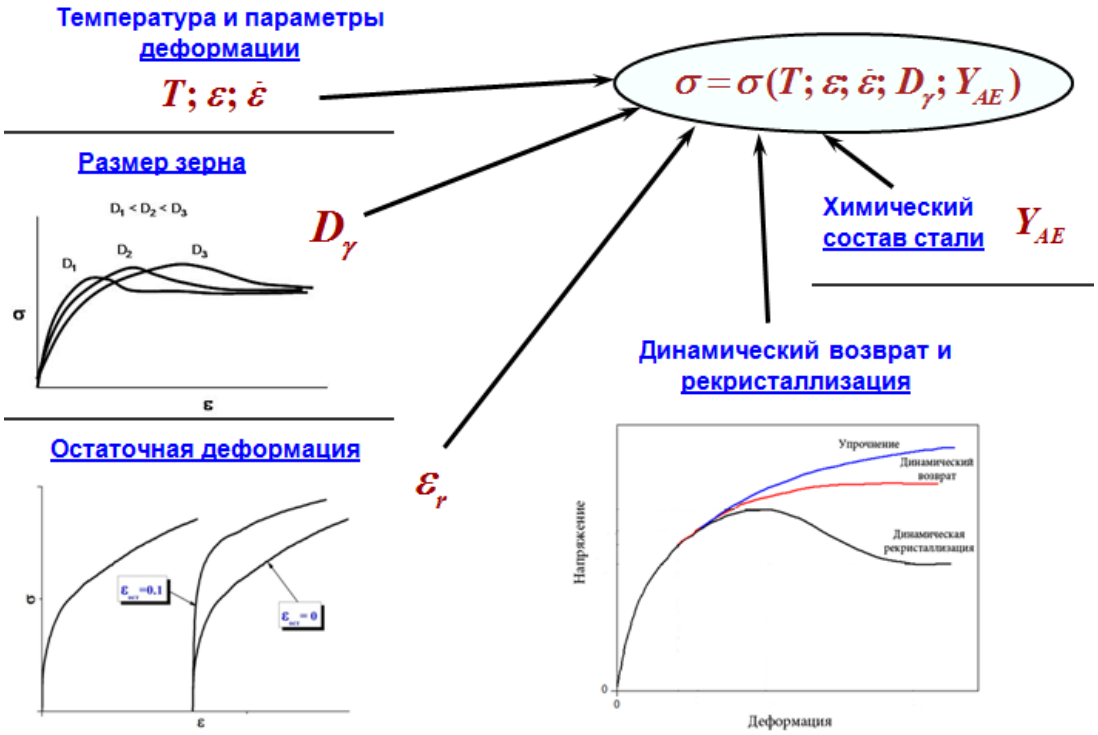


Рисунок 1.2 – Основные факторы, влияющие на сопротивление деформации

Таким образом, при разработке модели оптимизации, позволяющей снизить затраты энергии на всем сортаменте ШПСГП, необходимо учитывать процессы упрочнения и разупрочнения, которые происходят при прокатке. Это позволит достичь максимальной энергоэффективности при перераспределении обжатий в чистовой группе клетей.

1.2 Результаты предварительных исследований

В ряде работ [64,65,66] обосновывается возможность снижения энергозатрат при ведении процесса прокатки стальных полос на непрерывных станах. Так, например, в указанных работах приводится достигнутая при холодной прокатке экономия энергии в объеме 2 - 4 %. Такое снижение энергозатрата было достигнуто путем перераспределения между клетями суммарного обжатия и межклетевых натяжений полосы [64]. На станах горячей прокатки аналогичная экономия была

получена путем корректировки обжатий и натяжений в чистовой группе клетей, а также увеличения температуры раската на входе в чистовую группу [65,66].

Однако, в указанных публикациях вопрос степени влияния на суммарную экономию энергии каждого из факторов прокатки не рассмотрены и не раскрыты наиболее эффективные варианты воздействия на процесс прокатки для достижения наибольшей энергоэффективности.

Учитывая изложенное, были проведены предварительные промышленные исследования, которые должны были продемонстрировать возможность повышения энергоэффективности технологических режимов широкополосных станов горячей прокатки за счет корректировки факторов прокатки отдельно от других.

В качестве теоретической основы этих исследований принята математическая модель [67], связывающая в единый алгоритм технологические, конструктивные и энергосиловые параметры широкополосного стана горячей прокатки, которая, как показал анализ, является наиболее достоверной из всех известных моделей. В качестве объекта исследований выбран реальный режим прокатки в чистовой группе клетей стана 2000 полосы из стали 08пс с размерами сечения 2,3х1290 мм. Параметры этого режима приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры режима прокатки полосы из стали 08пс с размерами сечения 2,3х1290 мм в чистовой группе клетей стана 2000

№ клети	толщина полосы на входе в клеть, мм	толщина полосы на выходе из клети, мм	относительное обжатие в клети, %	переднее удельное натяжение, МПа	сопротивление деформации клети, МПа
6	35,69	20,61	42,24	8	128
7	20,61	10,20	50,53	8	157
8	10,20	6,35	37,76	15	166
9	6,35	4,58	27,86	30	172
10	4,58	3,42	25,28	35	192
11	3,42	2,61	17,95	35	200
12	2,61	2,3	18,07	0	235

Примечание: температура раската за черновой группой 1080 ^{0}C, суммарная мощность двигателей главных приводов клетей 36,4 МВт.

Для снижения суммарной мощности приводов, сначала было решено перераспределить обжатия и натяжения, а также выбрать температуру подката по принципу, описанному в работе [66]:

- увеличить обжатия в первых трех клетях до загрузки по усилию прокатки в диапазоне 80-85% от максимально допустимого значения усилия в клети;
- установить относительное обжатие в последней клети в пределах 12 – 17%;
- относительное обжатие в предпоследней клети установить, исходя из равенства контактных напряжений в предпоследней и последней клетях;
- температуру подката перед чистовой группой выбрана равной 1080^{0}C;
- удельные натяжения полосы установить в диапазоне от 5 до 15% от сопротивления деформации материала полосы в межклетевых промежутках.

В результате был рассчитан режим прокатки (скорректированный режим), представленный в таблице 1.2, который, позволил уменьшить суммарную расчетную мощность двигателей на 3,5% относительно базового варианта.

Таблица 1.2 – Параметры скорректированного режима прокатки полосы из стали 08пс с размерами сечения 2,3х1290 мм в чистовой группе клетей стана 2000

№ клети	толщина полосы на входе в клеть, мм	толщина полосы на выходе из клети, мм	относительное обжатие в клети, %	переднее удельное натяжение, МПа	сопротивление деформации клети, МПа
6	35,68	17,18	51,8	8	135
7	17,18	9,00	47,5	8	155
8	9,00	5,73	36,3	15	165
9	5,73	4,2	26,8	30	173
10	4,2	3,17	24,4	35	194
11	3,17	2,61	20,6	35	215
12	2,61	2,3	18,0	0	246

Примечание: суммарная мощность двигателей главных приводов чистовой группы клетей при температуре раската на выходе из черновой группы клетей

1080^0C (температура соответствует существующему варианту технологии) 35,12 МВт (снижение суммарной мощности по сравнению с существующим вариантом на 3,5 %).

Такой уровень снижения энергопотребления недостаточен, т.к. при горячей прокатке возникает большое количество дестабилизирующих воздействий (например, колебания температуры полосы, механических свойств материала полосы), которые могут полностью исключить весь эффект экономии.

Таким образом, было проанализировано влияние параметров технологии на энергопотребление главных приводов с помощью модели [66]. В результате установлено, что корректировка натяжений в допускаемых технологией интервалах оказывает незначительное воздействие на общую величину затрат энергии. Более существенное снижение мощности было достигнуто при корректировке распределения между клетями частных обжатий путем их увеличения в первых трех клетях чистовой группы и снижения в последующих, за исключением последней. Такое перераспределение параметров прокатки позволило снизить энергоемкость процесса на 3,5 %. Здесь необходимо отметить, что рост обжатий в первых клетях чистовой группы вызвал, согласно расчетам с использованием методики [66] значительное уменьшение температуры полосы на выходе чистовой группы. Так, если в исходном режиме таблицы 1.1 эта величина составляла 860 ^{0}C, то в скорректированном, приведенном в таблице 1.2 – 810 ^{0}C.

Далее провели сравнение погрешностей расчета требуемых мощностей главного привода рабочих клетей с помощью трех известных методик показало, что наиболее достоверной методикой является способ оценки мощности по модели, разработанной Э.А. Гарбером и И.А. Кожевниковой (см. рисунок 1.3).

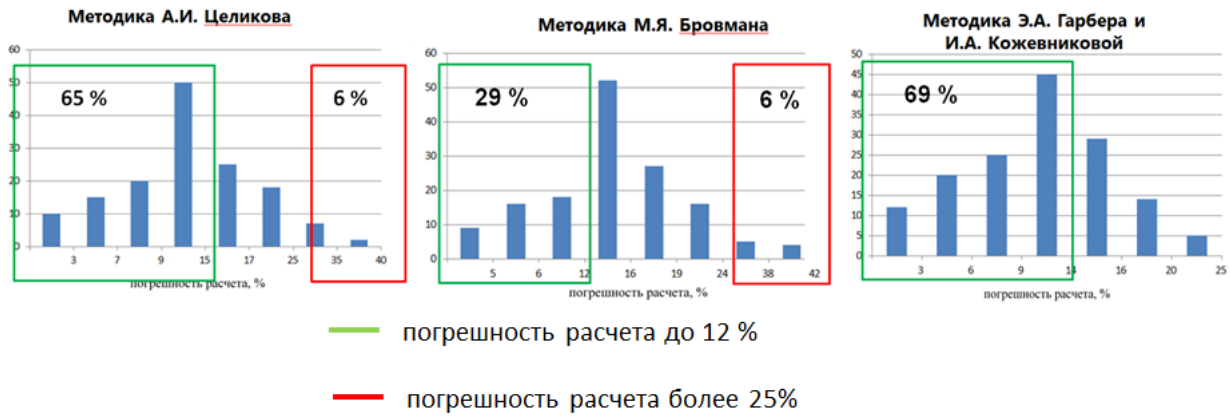


Рисунок 1.3 – Сравнение погрешностей расчета мощности привода рабочих клетей с помощью известных методик [1, 48, 68]

Критерий оценки точности: доля рассчитанных режимов с погрешностью до 12 % и доля режимов с погрешностью более 25 % (рисунок 1.3).

Достаточно существенный уровень расхождений между расчетными и фактическими значениями мощностей, необходимых для привода рабочих валков 4-х валковой системы, вероятно, связан с отсутствием достоверного учета затрат энергии на вращение холостых опорных валков.

Достоверное определение и учет таких затрат должен повысить точность расчета требуемой мощности двигателей главных приводов.

Выводы по Главе 1:

1. В известных работах рассмотрена проблема уменьшения затрат энергии при прокатке стальных полос, но результаты представлены лишь для ограниченного диапазона сортамента. Возможность использования известных методик ограничена конкретным видом оборудования, многие методологии не могут быть оперативно использованы для корректировки параметров прокатки, т.к. требуют применения метода конечных элементов и отсутствует теоретическое обоснование полученных результатов.

2. Выполнена теоретическая оценка снижения затрат мощности на ведение технологического процесса в чистовой группе клетей широкополосного

прокатного стана за счет корректировки обжатий с применением известной методики расчета энергосиловых параметров.

3. Поставлены задачи исследования, включающие в себя:
    a. Выявление и количественная оценка затрат дополнительной энергии в 4х- валковой системе, связанных с вращением опорных валков;
    b. Анализ технологических факторов, физическое и компьютерное моделирование режимов прокатки в чистовой группе клетей ШПСГП 2000 и оценка возможности снижения затрат энергии на ведение технологического процесса;
    c. Разработка методики компьютерной оптимизации режимов горячей прокатки в непрерывной группе клетей;
    d. Использование разработанной методики и промышленных данных для анализа влияния технологических факторов горячей прокатки на уровень энергозатрат при производстве стальных полос;
    e. Внедрение режимов горячей прокатки, обеспечивающих снижение потребления электроэнергии двигателями главных приводов ШПСГП 2000.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ГЛАВНОГО ПРИВОДА 4Х-ВАЛКОВОЙ СИСТЕМЫ

2.1 Оценка затрат мощности на вращение холостого опорного валка 4х-валковой системы

В первой главе сделано предположение, что существенный уровень расхождений между расчетными и фактическими значениями мощностей, необходимых для привода рабочих валков 4-х валковой системы, связан с существенными затратами на вращение холостого опорного валка. Установлено, что применение наиболее известных методик энергосилового расчета не позволяет достоверно определить параметры наименее затратного режима прокатки, т.к. погрешности расчета превышают ожидаемую экономию.

Для того, чтобы показать это, с использованием программного пакета ANSYS рассчитали моменты, необходимые для приведения в движение рабочих валков для двух типов: 4х-валковой и 2х-валковой систем. Моделирование процесса прокатки было выполнено для случая деформирования полосы из углеродистой стали обыкновенного качества типа S235JR.

При постановке задачи использовали следующие условия:

- толщина полосы на входе: 40 мм
- толщина полосы на выходе: 24 мм (обжатие 40%)
- скорость прокатки: 1 м/с
- диаметр рабочего валка: 900 мм
- диаметр опорного валка: 1600 мм
- коэффициент трения подшипников: 0,02
- коэффициент трения рабочий валок - полоса и рабочий валок - опорный валок: 0,45

Конфигурация моделей для 4х-валковой клети и 2х-валковой клети показаны на рисунках 2.1 и 2.2.

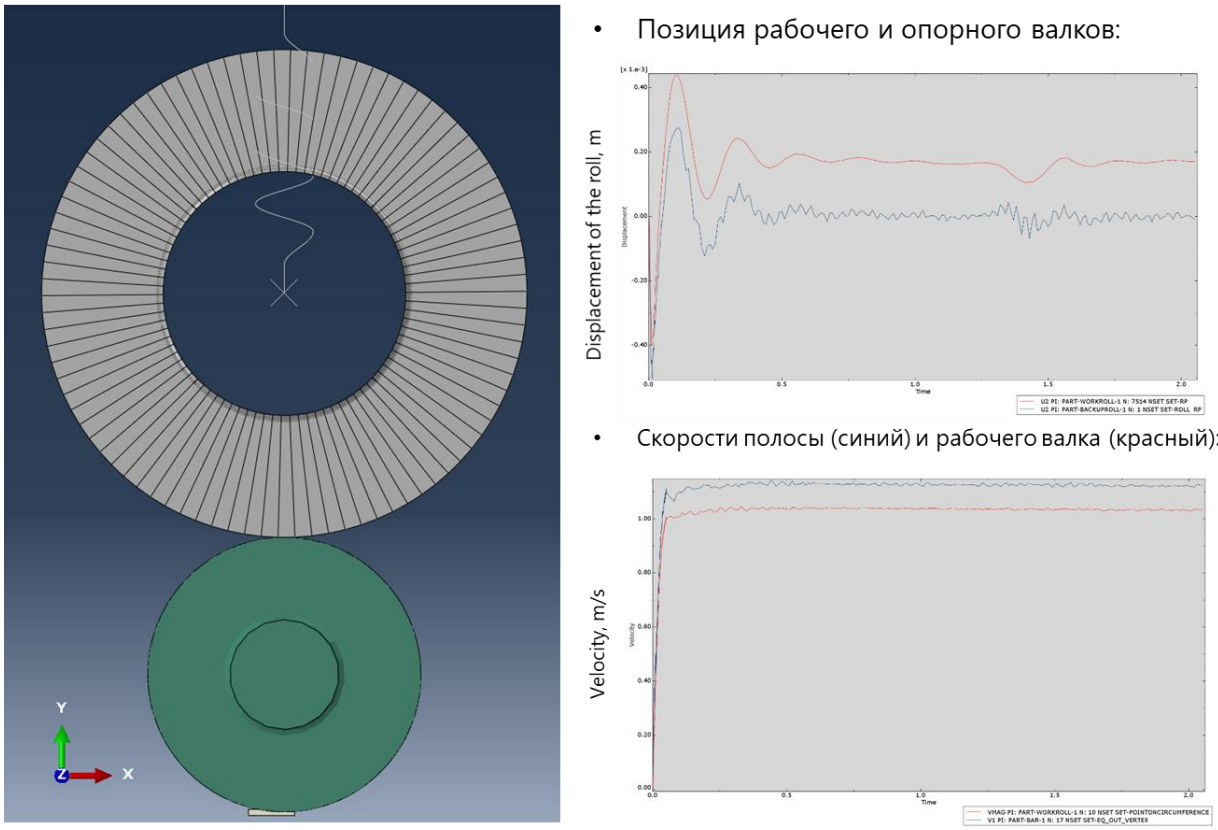


Рисунок 2.1 – Конфигурация модели 4х-валковой системы

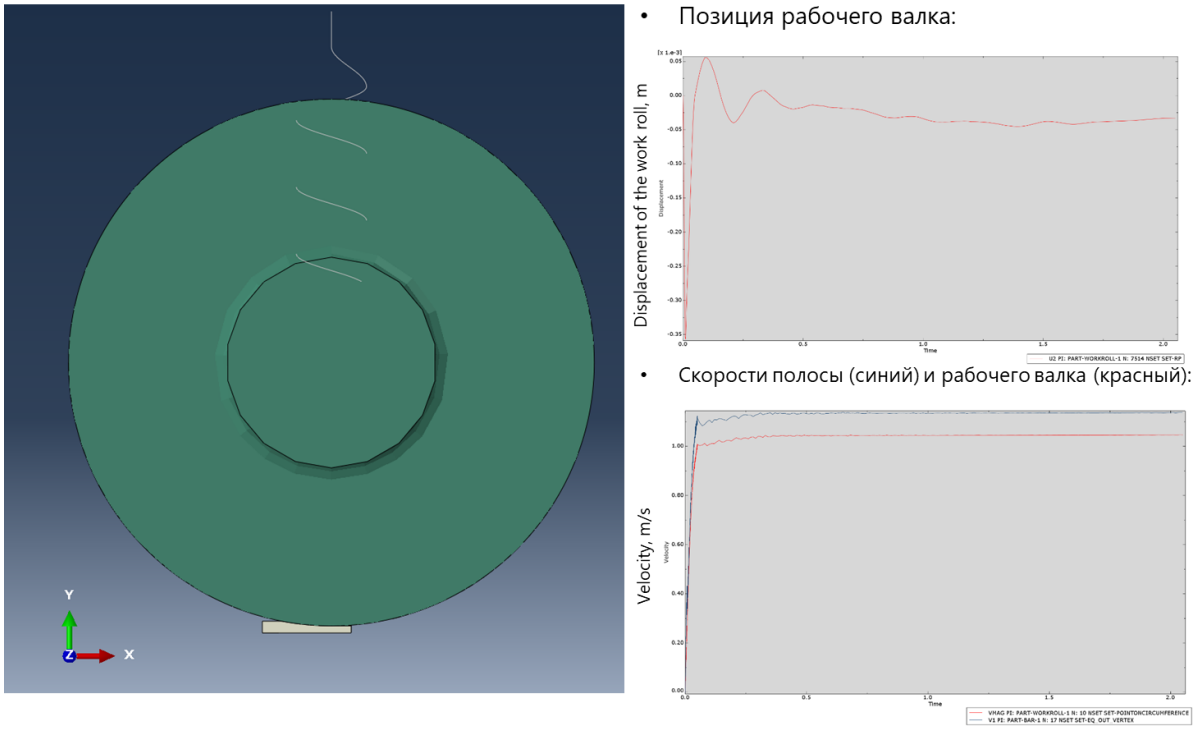


Рисунок 2.2 – Конфигурация модели 2х-валковой системы

Механические характеристики заготовки были заданы с помощью кривой, рассчитанной в программе JmatPro для стали S235JR при температуре 1000 ^{0}C (рисунок 2.3).

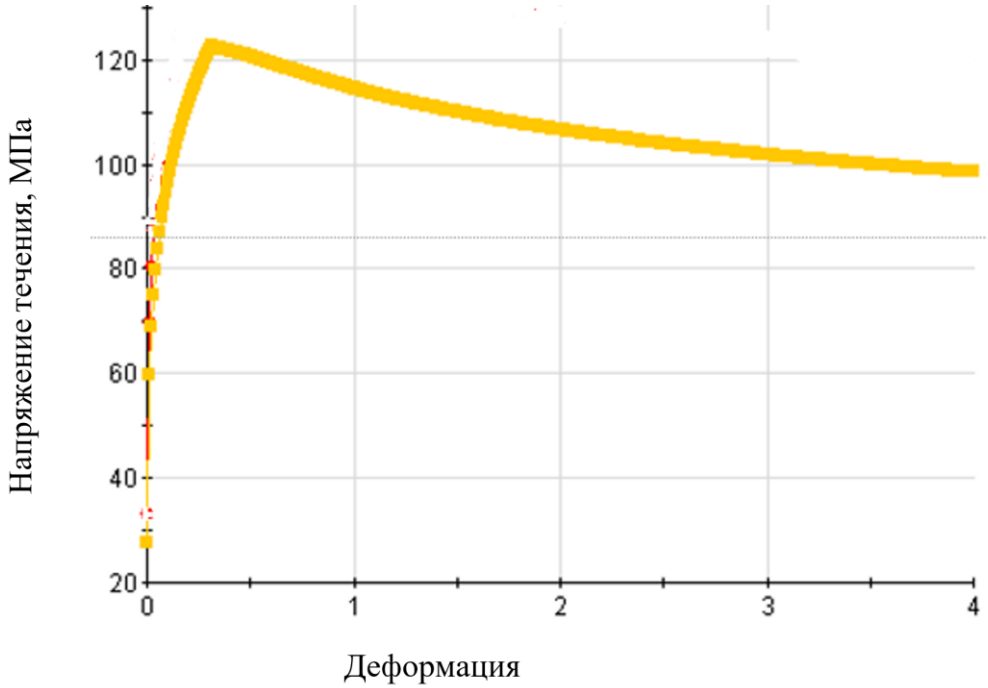


Рисунок 2.3 – Кривая течения металла стали S235JR при температуре 1000 ^{0}C

Результаты моделирования представлены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1. – Результат моделирования прокатки в 4х-валковой системы и 2х-валковой системы

Параметр	2х-валковая система	4х-валковая система
Контактное давление, МПа	333 (среднее значение), 576 (максимальное значение)	366 МПа (среднее значение), 463 МПа (максимальное значение)
Крутящий момент, МН·м	0,87	1,30
Усилие прокатки, МН	37,2	36,0

Крутящий момент привода рабочего валка 4х-валковой системы, затрачиваемый на вращение опорного валка, по результатам моделирования оказался на 50 % больше, чем в 2х-валковой при практически равных значениях контактного давления и усилия прокатки.

Основными составляющими дополнительных потерь в 4х-валковой системе по результатам моделирования были:

- трение в подшипниках опорного валка: до 20–30 %;

- трение качения между рабочим и опорным валком: 10–20 %.

Таблица 2.2 – Результат расчета дополнительных потерь в 4х-валковой клети

Параметр	2х валковая система	4х валковая система
Крутящий момент, МН·м	0,87	1,30
Момент трения, действующий на рабочий валок, МН·м	0,73 (84 % от момента привода)	0,77 МН·м (59 %)
Момент инерции опорного валка, МН·м	-	0,09 МН·м (> 1 %)
Момент трения в подшипнике опорного валка, МН·м	-	0,30 МН·м (23 %)
Момент прокатки, МН·м	0,14 (16 % от момента привода)	0,14 МН·м (17 %)

Для подтверждения данного вывода была выполнена прокатка в клети лабораторного стана с деформацией свинцовой пластины (общий вид которого представлен на рисунке 2.4)

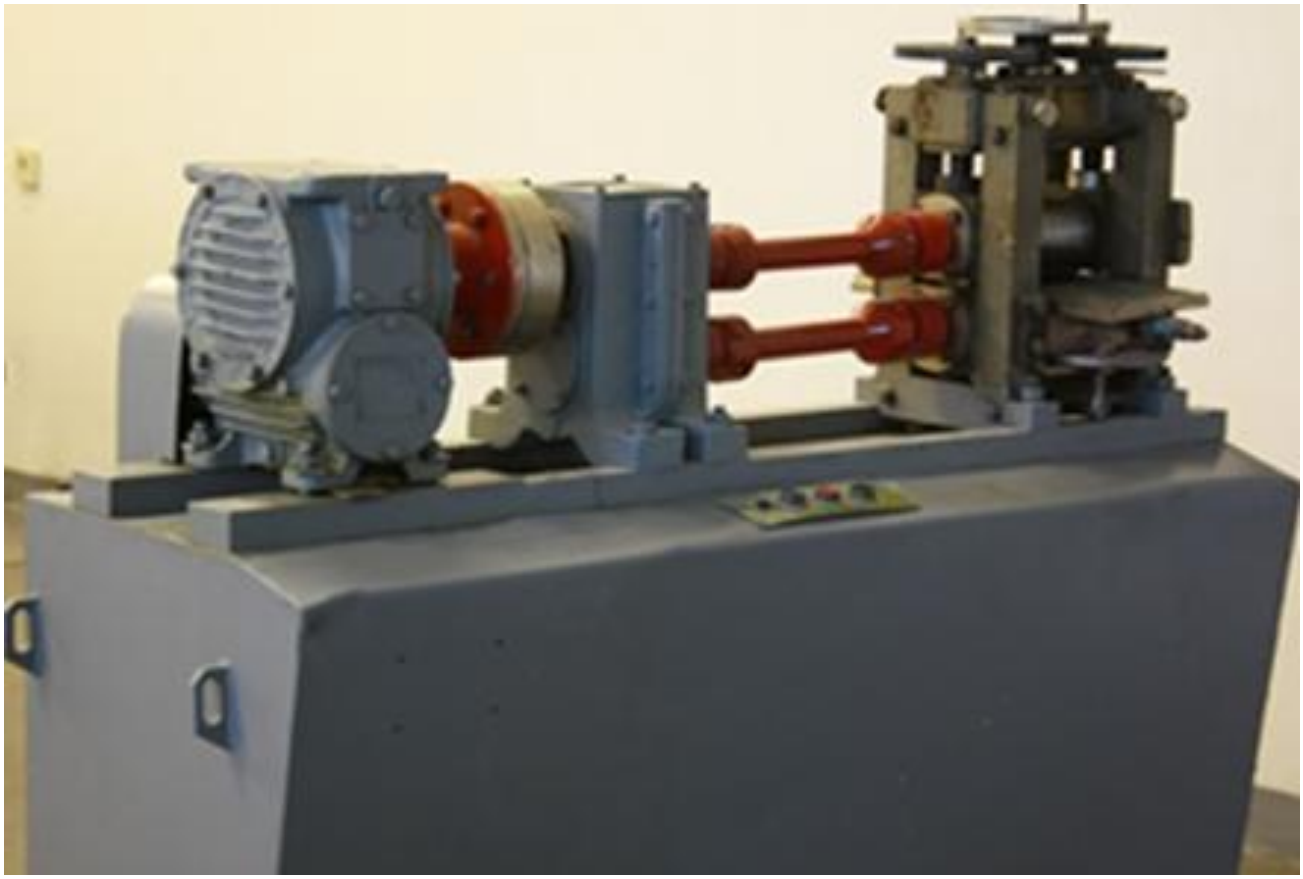


Рисунок 2.4 – Общий вида лабораторного стана

Порядок и результаты опытной прокатки были следующими:

- деформированию подвергли свинцовый образец прямоугольного сечения толщиной 5 мм и шириной 40 мм, обжатие за проход составило 1 мм;
- привод валков осуществляли с помощью динамометрического ключа, для оценки момента, изменяли усилие срабатывания этого ключа от 0 до 100 Н·м с шагом 1 Н*м;
- в первый раз проход выполнили только в рабочих валках (имитация прокатки в клети «дуо»). Момент, необходимый для привода рабочего валка составил 50 Н·м;
- во второй раз проход с таким же обжатием выполнили на сжатых опорном и рабочем валке (имитация прокатки в клети «кварто»). Момент, необходимый для привода рабочего валка, составил 76 Н·м.

Таким образом, дополнительные затраты энергии в 4х-валковой системе на вращение холостого опорного валка связаны с преодолением трения в подшипниках опорного валка и трением качения в межвалковом контакте.

2.2 Разработка методики расчета требуемой мощности прокатки

В предыдущей главе были рассмотрены известные подходы к решению задачи повышения энергоэффективности процесса непрерывной прокатки. Очевидно, что качество решения обозначенной проблемы будет в значительной степени зависеть от используемой методики расчета требуемой мощности привода рабочих валков прокатных клетей.

В последних известных работах представлены подходы, основанные на эмпирических данных, собранных на действующих станах. Стоит отметить, что такой путь решения проблемы не будет эффективным по нижеследующим причинам. Например, при расширении сортамента прокатного стана известные регрессионные уравнения для оценки требуемой мощности привода рабочих валков могут приводить к значительным ошибкам расчета, а применение

программных средств, основанных на конечно-элементном анализе процесса пластической деформации, может не учесть всех особенностей реального технологического процесса.

В связи с вышесказанным для решения задачи повышения энергоэффективности процесса прокатки была использована методика расчета требуемой мощности привода рабочих клетей непрерывных станов, основанная на упруго-пластическом очаге деформации [48].

Одним из недостатков отмеченной методики является тот факт, что в ней не учтено влияние ускорения полосы, применяемой при ведении непрерывной горячей прокатки с целью исключения «температурного клина» по длине проката.

Согласно этой методике [48], мощность двигателей главного привода рабочей клети при постоянной скорости прокатки равна:

$$N_{дв.р} = \frac{N_p}{\eta}, \tag{2.1}$$

где η – КПД линии главного привода;

$N_р$ – мощность, необходимая для совершения двумя рабочими валками пластической деформации и преодоления всех видов трения, в том числе трения качения между рабочими и опорными валками:

$$N_р = M_р \omega_р, \tag{2.2}$$

где $\omega_р$ – угловая скорость вращения рабочего валка;

$M_р$ – момент, необходимый для привода рабочих валков (без учета момента инерции при разгонах и торможениях).

На рисунке 2.5 представлена схема действующих сил и моментов в валковом узле 4х-валковой системы.

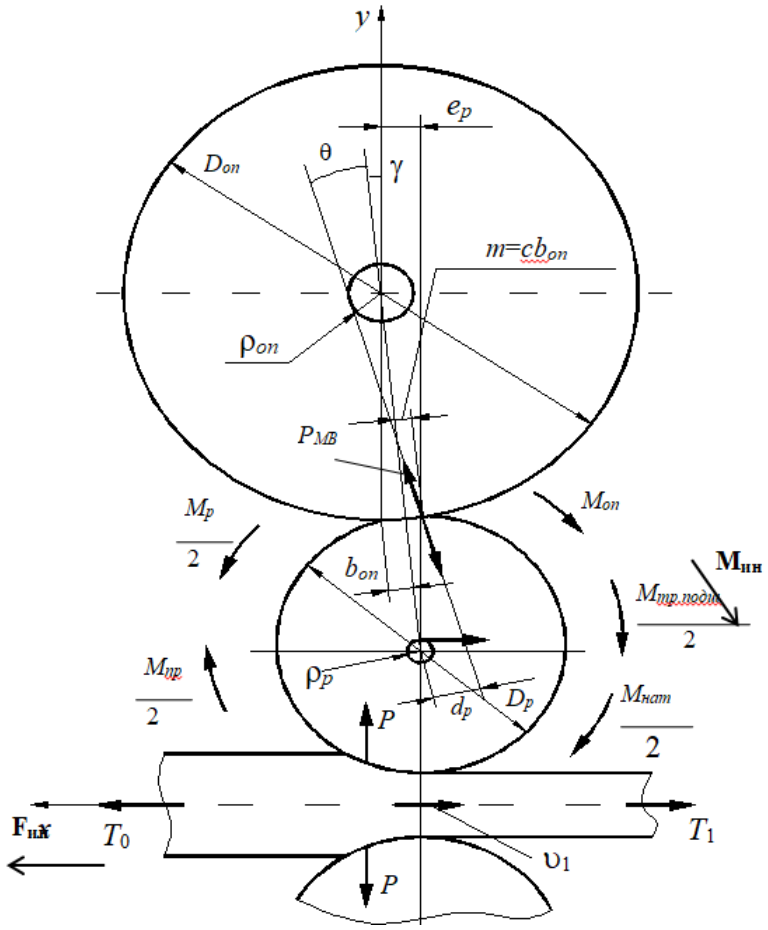


Рисунок 2.5 – Расчетная схема сил и моментов в клети 4х-валковой системы при постоянной скорости прокатки [48]

Момент, необходимый для привода рабочих валков, рассчитывали по формуле:

$$M_р = M_{пр} + M_{нат} + M_{тр.п} + M_{оп} + M_{ин}, \quad (2.3)$$

где $M_{пр}$ – момент прокатки;

$M_{нат}$ – момент, необходимый для преодоления сил натяжений полосы (т.к. обычно заднее натяжение T_0 больше переднего натяжения T_1);

$M_{тр.п}$ – момент, необходимый для преодоления сил трения в подшипниках рабочих валков;

$M_{оп}$ – момент, необходимый для вращения холостых опорных валков;

$M_{ин}$ – момент инерции, действующий на рабочий валок при прокатке с ускорением.

Момент прокатки наиболее достоверно можно вычислить через мощность прокатки:

$$M_{пр} = \frac{N_{пр}}{\omega_р} \quad (2.4)$$

Момент, возникающий от разности сил заднего и переднего натяжений, равен:

$$M_{нат} = \Delta T \frac{D_р}{2}, \quad (2.5)$$

где $\Delta T = T_0 - T_1$ – разность сил заднего и переднего натяжений полосы.

$$M_{тр.п} = \mu_{п.р} \frac{d_{п.р}}{2} \cdot [\Delta N - 2P \cdot tg(\theta + \gamma)], \quad (2.6)$$

где $\mu_{п.р}$ – коэффициент трения в подшипниках рабочих валков;

$d_{п.р}$ – рабочий диаметр этих подшипников;

P – усилие прокатки;

θ – угол между плоскостью действия межвалкового усилия и плоскостью, в которой лежат оси валков (см. рисунок 2.5);

γ – угол между вертикальной осевой плоскостью опорного валка и плоскостью, проходящей через оси рабочих валков (см. рисунок 2.5).

Указанные углы могут быть вычислены с помощью следующих выражений:

$$tg\theta = \frac{2\left(cb_{оп} + \mu_{п.оп} \frac{d_{п.оп}}{2}\right)}{D_{оп}}, \quad (2.7)$$

$$b_{оп} = 0{,}798\sqrt{\eta \cdot \frac{P_{МВ}}{L} \cdot \frac{Dp \cdot Don}{Dp + Don}}, \quad (2.8)$$

где $D_р$, $D_{оп}$ – диаметры бочек рабочего и опорного валков;

L – длина контактирующего участка их бочек;

$P_{МВ}$ – межвалковая сила ($P_{МВ} \approx P$);

η – упругая постоянная (приведенный модуль упругости их материалов):

$$\eta = \frac{1-\nu_{р}^{2}}{E_{р}} + \frac{1-\nu_{оп}^{2}}{E_{оп}}, \qquad (2.9)$$

где $E_{оп}$, $E_{р}$, $\nu_{оп}$, $\nu_{р}$ – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов рабочих и опорных валков;

$$tg\gamma = \frac{2e_{p}}{D_{p} + D_{on}}, \qquad (2.10)$$

$\mu_{п.оп}$ – коэффициент трения в подшипниках опорных валков;

$d_{п.оп}$ – рабочий диаметр этих подшипников;

$e_{р}$ – горизонтальное смещение оси рабочего валка относительно вертикальной осевой плоскости опорного валка.

Часть мощности главного привода рабочей клети, которая затрачивается на вращение холостых опорных валков, определяется с использованием безразмерного коэффициента трения качения, обозначенного далее, как «*c*».

Для определения момента привода опорных валков, который влияет на величину требуемой мощности, используется формула, учитывающая трение качения в межвалковом контакте. Согласно работе [48] доля этого момента от суммарного требуемого может быть весьма существенна.

Момент, необходимый для привода холостого опорного валка $M_{оп}$, рассчитывают по формуле:

$$M_{оп} = \frac{2P}{\cos(\theta+\gamma)} \cdot \left[\frac{D_{p}}{2} \sin\theta + m \cdot \cos\theta \right], \qquad (2.11)$$

где m – коэффициент трения качения, представляющий собой расстояние на площадке межвалкового контакта между плоскостью, проходящей через оси валков, и плоскостью, в которой действует межвалковая сила (см. рисунок 2.5).

Момент инерции, действующий на валок при прокатке с ускорением, будет состоять из двух слагаемых:

$$M_{ин} = F_{ин} \cdot D_р/2 + M_{ин.р.в.} + M_{ин.оп.в.}(D_р/D_{оп}), \quad (2.12)$$

где:

$F_{ин}$ – сила инерции, действующая на полосы в межклетевом промежутке за клетью:

$$F_{ин} = a \cdot l_{мк} \cdot h \cdot b \cdot \rho, \quad (2.13)$$

где a – ускорение полосы при прокатке в чистовой группе клетей, $l_{мк}$ – длина межклетевого промежутка, h и b – толщина и ширина полосы соответственно за клетью;

$M_{ин.р.в}$ – момент инерции, действующий на рабочий валок при ускорении:

$$M_{ин.р.в} = \varepsilon \cdot J_{рв}, \quad (2.14)$$

где:

$J_{рв}$ - момент инерции рабочего валка:

$$J_{р.в.} \approx m_{р.в.} \cdot D_р^2/8 \quad (2.15)$$

ε – угловое ускорение рабочего валка ($\varepsilon = 2 \cdot a/D_р$);

$M_{ин.оп.в}$ – момент инерции, действующий на опорный валок при ускорении:

$$M_{ин.оп.в} = \varepsilon \cdot J_{оп.в} \cdot (D_р/ D_{оп}), \quad (2.16)$$

где:

$J_{оп.в}$ - момент инерции опорного валка:

$$J_{р.в.} \approx m_{р.в.} \cdot D_{оп}^2/8. \quad (2.17)$$

Величину m вычисляют по формуле (2.8):

$$m = cb_{оп}, \quad (2.18)$$

где c – безразмерный коэффициент плеча трения качения;

$b_{оп}$ – половина ширины площадки межвалкового контакта, вычисляемая по формуле Герца.

Точность расчета величины m в первую очередь зависит от достоверности значений коэффициента «c», которая ранее была исследована только для станов холодной прокатки. Методика расчета коэффициента «c», изложенная в работе

[48], может быть использована для станов горячей прокатки, т.к. 4х-валковые системы станов горячей и холодной прокатки идентичны по конструкции. В этой методике коэффициенты трения качения между рабочим и опорным валками определяют с учетом шероховатости поверхности валков; скорости их вращения; сил натяжений полосы; конструктивного параметра клети – угла между вертикальной осевой плоскостью опорного валка и плоскостью, проходящей через оси рабочего и опорного валков.

Для безразмерного коэффициента «*c*» ранее было определено эмпирическое выражение, которое, однако, было получено по экспериментальным данным прокаток на 6-ти клетевом стане 1700:

$$c = 1{,}257 - 0{,}286\frac{p_0}{p_б} - 0{,}057\frac{\omega_{отн}}{\omega_б}, \qquad (2.19)$$

где:

$p_б$ – базисное значение контактного напряжения в межвалковом контакте, МПа ($p_б$ = 100 МПа);

$\omega_б$ – базисное значение относительной угловой скорости рабочих валков (наименьшая величина, рассчитанная после обработки всех режимов прокатки, $с^{-1}$. ($\omega б = 1\ с^{-1}$).

Уравнение было получено для условий горячей прокатки полос из трубных марок сталей в чистовой непрерывной группе клетей.

Стоит отметить, что формула (2.11) неприменима для условий других непрерывных станов, т.к. их конструктивные параметры и технологические условия ведения процесса прокатки могут отличаться от 6-ти клетевого стана 1700.

Вследствие вышесказанного, было принято решение увеличить количество экспериментальных данных, использованных для получения регрессионного уравнения коэффициента трения значениями параметров непрерывного чистовой группы клетей стана 2000.

Методика уточнения уравнения для расчета безразмерного коэффициента плеча трения качения включала в себя последовательность следующих этапов.

Этап 1. Создание базы данных, содержащей информацию о фактических режимах прокатки полос на действующих станах горячей и холодной прокатки.

Этап 2. Для каждого режима прокатки рассчитывают по методикам [48] энергосиловые параметры, не зависящие от коэффициента «*c*»: контактные напряжения, усилия и мощность прокатки.

Этап 3. Варьируя величины «*c*» с заданным шагом, для каждого режима прокатки подбирают такие значения этих коэффициентов, которые минимизируют разность между измеренными и расчетными значениями мощности двигателей рабочей клети.

Этап 4. С помощью стандартных процедур регрессионного анализа получают регрессионное уравнение в виде зависимости коэффициента плеча трения качения от следующих факторов:

а) p_0 – максимального нормального напряжения в межвалковом контакте, полученного путем расчета для всех параметров режима прокатки (обжатий, натяжений, механических свойств полосы) по формуле:

$$p_0 = \frac{2 \cdot q}{\pi \cdot b_{\text{оп}}}; \tag{2.20}$$

где q – погонная нагрузка на площадке межвалкового контакта длиной L, которая вычисленная по формуле:

$$q = \frac{P_{\text{мв}} cos\theta}{L}; \tag{2.21}$$

где $P_{\text{мв}}$, θ – межвалковая сила и угол между ней и плоскостью, проходящей через оси валков (см. рис 2.1)

б) $\omega_{\text{отн}}$ – относительная угловая скорость рабочего и опорного валков:

$$\omega_{\text{отн}}=\omega_{\text{р}}+\omega_{\text{оп}}; \tag{2.22}$$

в) $D_{оп}/D_{р}$ – отношения диаметров бочек опорного и рабочего валков;

г) R_a – среднеарифметическая высота микронеровностей бочки рабочих валков.

Этап 5. Для каждого режима прокатки определили мощность двигателя двумя способами: первым способом мощность двигателя $N_{дв}$ рассчитали при «*c*»=0, то есть без учета потерь энергии на трение качения, а вторым – путем измерения фактических мощностей на действующем стане. Затраты мощности на трение качения определили, как разность упомянутых значений мощностей:

$$N_{тр.к} = N_{дв.ф} - N_{дв.р}^{(c=0)}, \quad (2.23)$$

где $N_{дв.ф}$ – фактическое значение требуемой мощности привода, $N_{дв.р}^{(c=0)}$ – рассчитанное значение мощности при c=0

Таким образом, располагая данными об измеренных технологических и энергосиловых параметрах, имеющимися в АСУТП действующего стана, можно по вышеизложенной методике определить реальные значения коэффициентов трения качения в контакте рабочего и опорного валков и мощность, расходуемую на трение качения.

Статистически обработав полученные данные с помощью программного пакета «*Statistica*», получили новое регрессионное уравнение:

$$c = 1{,}194 - 0{,}274\frac{p_0}{p_б} - 0{,}049\frac{\omega_{отн}}{\omega_б}. \quad (2.24)$$

Достоверность уравнения (2.12) подтверждена критерием Фишера (его расчетное значение составило F=19,7, что превышает табличное F=2,21 при уровне значимости α=0,05) и коэффициентом множественной детерминации R^2 = 0,838.

Значение коэффициента «*c*» в зависимости от диаметра бочки, контактного давления и относительной скорости вращения рабочего валка приведены в Приложении 1.

Апробацию предлагаемой методики расчета потерь энергии на трение качения в межвалковом контакте рабочих клетей выполнили в реальном производстве на двух станах: 6-клетевом стане горячей прокатки «1700» и 7-

клетевой непрерывной группе клетей стана горячей прокатки «2000» ЧерМК ПАО «Северсталь».

Результаты расчетов показали следующее:

– при горячей прокатке значения безразмерного коэффициента «*c*» находятся в диапазоне 0,80-0,96, а величины коэффициентов трения качения – в диапазоне 1,5-5,1 мм

Фактические значения момента для привода холостого опорного валка приведены в Приложении 2.

Для определения достоверности скорректированной методики расчета требуемой мощности двигателей главных приводов ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь» рассчитали и сравнили с фактическими значениями требуемые мощности при прокатке более 2300 полос в 2015-2016 гг., охватывающих основной профильный и марочный сортамент стана, представленный в таблице 2.3.

Таблица 2.3. - Марочный и профильный сортамент полос, для которых произведен расчет суммарной мощности двигателей главных приводов чистовой группы рабочих клетей ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь».

Марки стали	08Ю, 40, 45, 20, 01ЮТ,07ГБЮ, 09Г2, 09Г2С и др.
Толщины полос, мм	1,4 - 16
Ширины полос, мм	900 - 1700

Результаты оценки погрешности расчета мощности главных приводов представлены на рисунке 2.6.

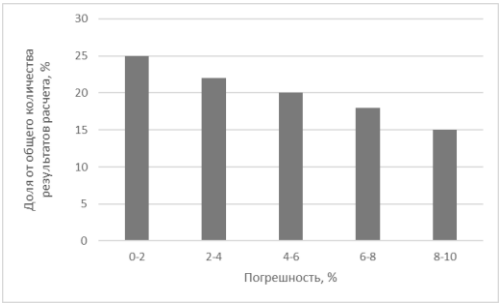


Рисунок 2.6 – Гистограмма распределения погрешностей расчета мощностей главных приводов ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь»

Средняя погрешность расчета составила: $\Delta_{ср}$ = 4,3 % что в 1,5 раза меньше, чем при расчете по уравнению (2.11).

Максимальная погрешность расчета составила 10 %, что почти на 30 % меньше, чем при расчете по уравнению (2.11). 2023 результата расчета из всех 2380 (85% от всех рассчитанных режимов) имеют погрешность до 8 %. Все эти данные показывают, что новая методика обеспечивает существенно более высокую точность расчета, чем используемая в [48].

Выводы по Главе 2:

1. С применением программного пакета ANSYS рассчитали моменты, необходимые для приведения в движение рабочих валков для двух типов клетей: 4х-валковой и 2х-валковой клетей. Дополнительно провели эксперимент на лабораторном стане, который показал, что дополнительные затраты энергии на вращение холостого опорного валка связаны с преодолением трения в подшипниках опорного валка и трением качения в межвалковом контакте

2. В результате моделирования и экспериментальных исследований установлено, что для 4х-валковой системы требуется дополнительная энергия (30–35 %) по сравнению с 2х-валковой из-за затрат на вращение опорного валка, в т.ч. на дополнительное трение в подшипниках опорного валка (20–25 %) и трение качения в межвалковом контакте (10–15 %).

3. Получено регрессионное уравнения для расчета коэффициента трения качения в межвалковом контакте «*c*», применение которого позволило существенно повысить точность расчета требуемой мощности привода рабочих валков.

ГЛАВА 3 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ В ЧИСТОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ СТАНА 2000

Предварительно, для понимая существующих резервов экономии мощности двигателей главных приводов чистовой группы клетей ШПСГП 2000, была проведена оценка сортамента на предмет профилеразмеров полос, потенциальный эффект от режимов производства которых будет максимальным.

В качестве критерия эффективности будем использовать удельную работу прокатки – работу, затраченную на пластическую деформацию единицы объёма металла в единицу времени.

Для расчета удельной работы использовали методику, учитывающую действие касательных напряжений по длине очага деформации (таблица 3.1). Удельную работу прокатки в целом для очага деформации i-й рабочей клети получали путем суммирования a_j, вычисленных по формулам в Таблице 3.1 для отдельных участков:

$$a_{\text{пр}i} = \sum_{j=1}^{j=4} a_j. \qquad (3.1)$$

Таблица 3.1 - Расчетные формулы удельных работ прокатки a_j на каждом участке очага деформации

Номер участка j	Название участка	Расчетная формула a_j, МДж/м^3
1	Участок упругого сжатия полосы на входе в очаг деформации	$a_1 = \tau_1 \left(\frac{1}{tg\frac{\alpha}{2}} + tg\frac{\alpha}{2} \right) ln \frac{h_{i\text{-}1}}{h_{i\text{-}1} - \Delta h_{1\text{упр}}}$
2	Зона отставания пластического участка	$a_2 = \tau_2 \left(\frac{1}{tg\frac{\alpha}{2}} + tg\frac{\alpha}{2} \right) ln \frac{h_{i\text{-}1} - \Delta h_{1\text{упр}}}{h_{,_н}}$
3	Зона опережения пластического участка	$a_3 = -\tau_3 \left(\frac{1}{tg\frac{\alpha}{2}} + tg\frac{\alpha}{2} \right) ln \frac{h_н}{h_{min}}$
4	Зона опережения второго упругого участка	$a_{4.} = -\tau_4 \left(tg\beta + \frac{1}{tg\beta} \right) ln \frac{h_н}{h_{min}}$

Примечание: τ_1, τ_2, τ_3, τ_4 – средние касательные напряжения, действующие на полосу со стороны валков на участке упругого сжатия, пластических участках отставания, опережения и упругого восстановления части толщины полосы соответственно, $\alpha/2$ – угол захвата полосы валками, β – центральный угол валка между минимальной толщиной проката h_{min} и точкой выхода полосы из валков, h_i и h_{i-1} – толщина проката и подката соответственно, $h_н$ – толщина полосы в нейтральном сечении,

Для полос различных толщин в диапазоне 1,2 – 16 мм фиксировали максимальную фактическую разницу в энергозатратах при прокатке одного марочника и типоразмера полос и показали, что максимальная экономия (до 10-15 %) будет ожидаться при оптимизации режимов прокатки полос толщиной от 1,2 до 6,0 мм.

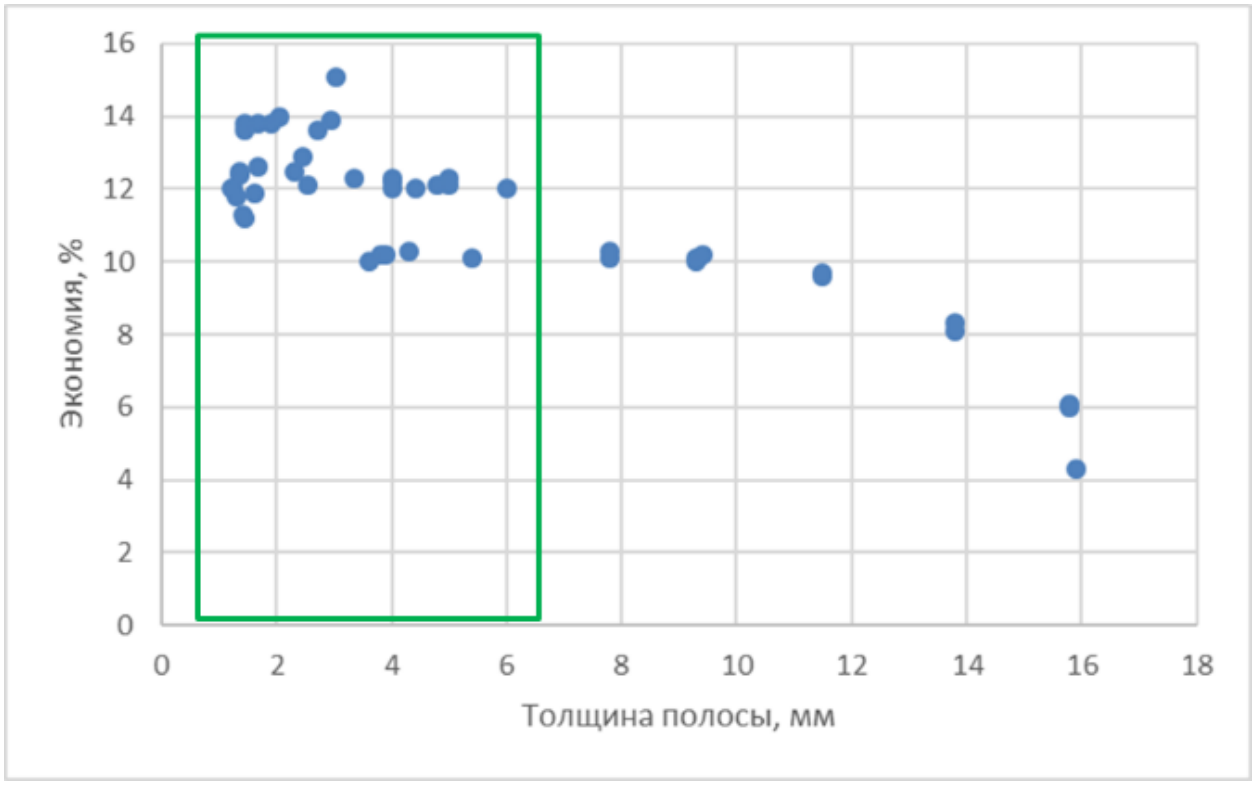


Рисунок 3.1 – Зависимость экономии энергопотребления в чистовой группе клетей от толщины готового проката (разница между самым энергозатратным режимом и самым энергоэффективным)

Для оценки текущего уровня энергозатрат и возможности его снижения была сформирована база данных параметров режимов прокатки в чистовой группе клетей стана 2000. Такая база данных включала следующие данные:

- номера плавок, партии и рулона для каждой г/к полосы;
- марка стали прокатываемой полосы, ее химический состав;
- размеры исходной заготовки – сляба (толщина, ширина, длина);
- усилие прокатки во всех клетях (кроме вертикальной клети-окалиноломателя);
- фактические мощности двигателей привода всех клетей стана (кроме вертикальной клети-окалиноломателя) при существующей производительности;
- обжатия полосы в чистовой группе клетей;
- натяжения полосы между клетями чистовой группы;
- температуры полосы при выдаче из печи, на выходе из черновой группы;
- скорости прокатки полосы во всех клетях, ускорение полосы при прокатке в чистовой группе;
- ширина и толщина готовой полосы;
- время пребывания полосы на промежуточном рольганге;
- материал валков, их геометрические размеры.

Общее количество полос, данные о которых включены в сформированную базу: более 120 000 единиц.

Марки стали, для которых была сформирована база, в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Марочный и профильный сортамент полос, произведенных по режимам прокатки, которые были скорректированы для обеспечения минимальных затрат энергии

Марки стали	09Г2С, 08пс, CHES 30, 15пс, S235JR, Ст3пс, CHES 170, SGCD, Ст3сп
Толщины полос, мм	1,8 - 16
Ширины полос, мм	933 - 1600

3.1 Оценка требуемой мощности двигателей главных приводов

Для выявления возможности снижения потребляемой мощности главными приводами чистовой группы клетей путем корректировки технологических параметров прокатки проанализировали существующие параметры прокатки.

Так, результаты изменения мощности при изменении частных обжатий с сохранением суммарного и изменении температуры подката, а также при изменении только частных обжатий с сохранением суммарного обжатия представлены на рисунке 3.2.

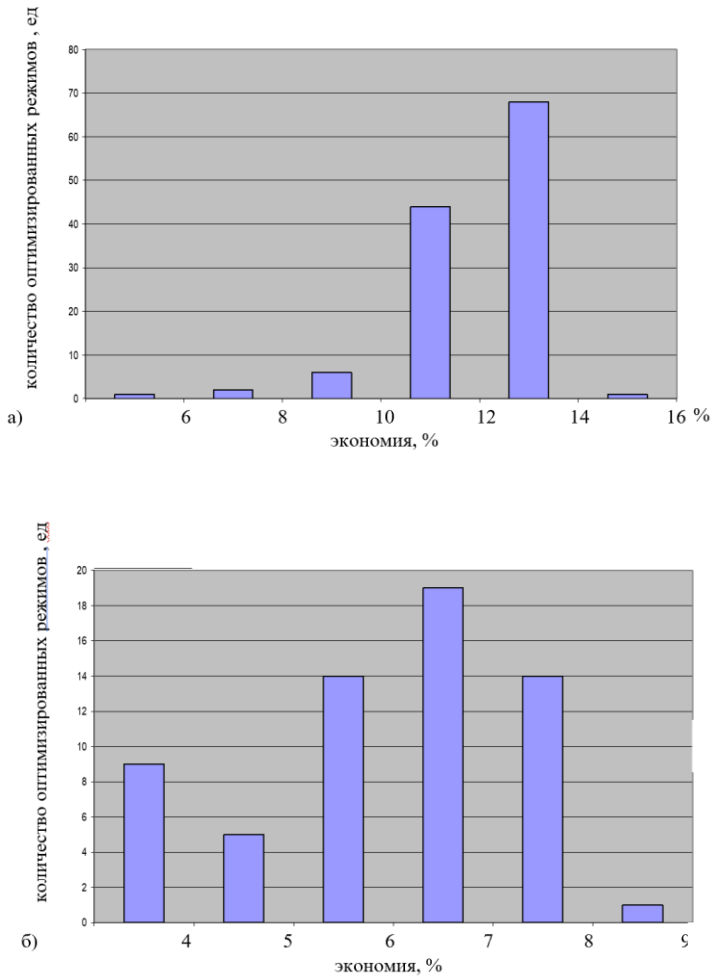


Рисунок 3.2 – Уменьшение суммарной мощности двигателей главных приводов чистовой группы клетей:
а) - при изменении частных обжатий в клетях и увеличении температуры подката на 30 градусов;
б) - только при изменении частных обжатий в клетях

Как видно из рисунка 3.2, одновременное изменение температуры подката и частных обжатий обеспечит уменьшение энергопотребления на большей части сортамента на 11-13% (стальные полосы из сталей марок типа 08пс, 3сп толщинами до 8 мм и ширинами от 1200 до 1300 мм).

При изменении только частных обжатий снижение энергопотребления составит в большей части режимов 6-7%. Было также установлено, что только повышение температуры раската за черновой группой на 30^0 С (без изменений обжатий) приведет к снижению мощности в чистовой группе лишь на 1-1,5%.

В качестве примера в таблицах 3.2 и 3.3 представлены два режима прокатки полосы стали 08пс размерами 2,3х1290 мм.

В таблице 3.3 представлен режим прокатки с наибольшей величиной энергозатрат, а в таблице 3.4 – с наименьшей.

Таблица 3.3 – Существующий режим прокатки полосы из стали 08пс с размерами поперечного сечения 2,3х1292 мм с наибольшей величиной энергозатрат на ведение процесса прокатки

№ клети	толщина полосы на входе в клеть, мм	толщина полосы на выходе из клети, мм	относительное обжатие в клети, %	переднее удельное натяжение, МПа	сопротивление деформации, МПа
6	35,69	20,61	42,2	8	128
7	20,61	10,20	50,5	8	157
8	10,20	6,35	37,7	15	166
9	6,35	4,58	27,8	30	172
10	4,58	3,42	25,2	35	192
11	3,42	2,61	17,9	35	200
12	2,61	2,3	18,0	0	235

Для данного режима температура раската за черновой группой 1080 ^{0}С, суммарная мощность двигателей главных приводов клетей 36,4 МВт, а удельная работа прокатки 1,2 МДж·с/м3

Таблица 3.4 – Существующий режим прокатки полосы из стали 08пс с размерами поперечного сечения 2,3х1292 мм с наименьшей величиной энергозатрат на ведение процесса прокатки

№ клети	толщина полосы на входе в клеть, мм	толщина полосы на выходе из клети, мм	относительное обжатие в клети, %	переднее удельное натяжение, МПа	сопротивление деформации, МПа
6	35,68	17,18	51,8	8	135
7	17,18	9,00	47,5	8	155
8	9,00	5,73	36,3	15	165
9	5,73	4,2	26,8	30	173
10	4,2	3,17	24,4	35	194
11	3,17	2,61	20,6	35	215
12	2,61	2,3	18,0	0	246

Для данного режима суммарная мощность двигателей главных приводов чистовой группы клетей при температуре раската на выходе из черновой группы клетей 1110^0С (температура увеличена по сравнению с существующим вариантом на 30^0С) составила 32,25 МВт, удельная работа прокатки 1,06 МДж·с/м3 (снижение по сравнению с существующим вариантом на 11,1 %).

Характерной особенностью режима, представленного в таблице 3.3, на котором продемонстрирован режим с наименьшей величиной энергозатрат, является максимально возможная загрузка по усилию и мощности прокатки первой клети с одновременной разгрузкой остальных клетей и неизменным частным обжатием в последней клети (ее оставили неизменной, т.к. этот параметр оказывает значительное влияние на механические свойства готового проката).

Такая особенность режима таблицы 3.3 по сравнению с режимом таблицы 3.2 дает основания предположить о возможности снизить уровень энергозатрат при прокатке за счет корректировки только параметров обжатий полосы в рабочих клетях непрерывной группы.

Еще одним практическим примером, показывающим возможность снижения суммарной мощности, была прокатка полос стали марки 09Г2С толщиной 4 мм с различным распределением частных обжатий по клетям чистовой группы стана 2000. В результате удельная работа прокатки полосы была снижена на 8,9 % относительно существующего режима. При этом частные обжатия в первых клетях были снижены, а в последних увеличены.

Таблица 3.5 – Существующий режимы прокатки полосы из стали 09Г2С толщиной 4 мм с различным распределением частных обжатий по клетям чистовой группы

Режим	№ клети							Суммарная мощность, МВт	Удельная работа прокатки (формула 3.1), МДж/м^3
	6	7	8	9	10	11	12		
Полоса 1	34%	37%	32%	27%	22%	17%	13%	32,78	900,5
Полоса 2	40%	38%	31%	26%	20%	14%	10%	35,99	988,7

Для дальнейших исследований спектр исследуемого сортамента (марочного и профильного) был сокращен, исходя из наиболее массовых прокатываемых профилеразмеров и марок сталей.

Марки сталей и размеры готовых полос, наиболее часто обрабатываемых на стане 2000, приведены в табл. 3.6 - 3.8.

Таблица 3.6 – Наиболее массовые марки сталей сортамента стана 2000 в 2015 году

№ п/п	Наименование марки стали	% от общего объема (в тоннах) производства в 2015 году
1	08пс	6,78
2	Сталь 3сп	6,7
3	S235JR	4,58
4	09Г2С	2,34

Окончание Таблицы 3.6

5	S2351	2,19
6	SAE1006	2,06
7	Сталь 3пс	1,65
8	Сталь 2пс	1,53
9	CHES30	1,5
10	S275JR	1,47
11	S275JR	1,47
12	S355MC	1,08
13	SAE10	1,06
14	CHES 1461	0,65
15	S235JR/CHES 1209	0,35
16	SAE 1010	0,27
17	S2750	0,23
18	S235JRC	0,22
19	SAE 1008	0,15
20	SAE 1015	0,15

Таблица 3.7 – Наиболее массовые толщины проката, произведенного на стане 2000 в 2015 году

№ п/п	Диапазон толщин, мм	% от общего объема (в тоннах) производства в 2015 году
1	≤ 2	13,26%
2	2-4	48,41%
3	4-6	19,42%
4	6-8	7,86%
5	8-10	4,18%
6	10-12	1,89%
7	12-14	1,71%
8	14-16	2,83%

Окончание Таблицы 3.7

9	16-18	0,24%
10	18-20	0,02%
11	20-22	0,14%
12	24-26	0,04%

Таблица 3.8 – Наиболее массовые ширины проката, произведенного на стане 2000 в 2015 году

№ п/п	Диапазон ширин, мм	% от общего объема (в тоннах) производства в 2015 году
1	900-1000	2,75%
2	1000-1100	9,25%
3	1100-1200	5,98%
4	1200-1300	40,37%
5	1300-1400	6,97%
6	1400-1500	7,29%
7	1500-1600	24,44%
8	1600-1700	1,98%
9	1700-1800	0,28%
10	>1800	0,68%

На основании вышеприведенных данных для дальнейших исследований были выбраны режимы прокатки стальных полосы из сталей марок типа 08пс, 3сп толщинами до 8 мм и ширинами от 1200 до 1300 мм.

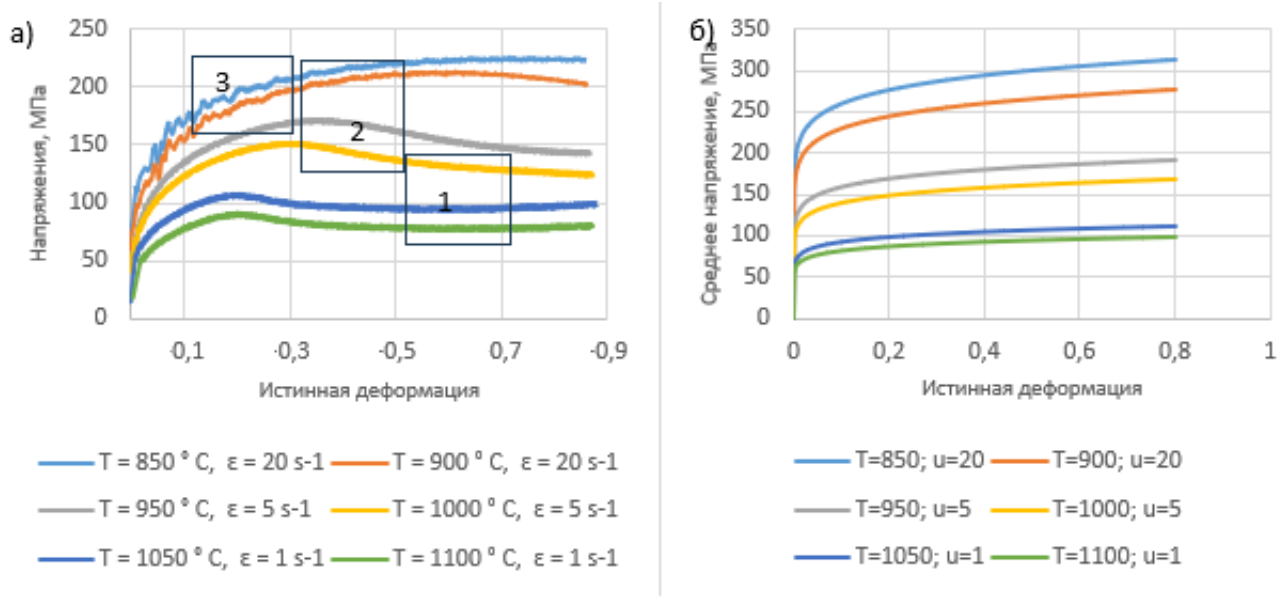
Также был проанализирован профильный сортамент стана, на котором эффект от изменения обжатия на изменение мощности будет максимальным. Было установлено, что величина эффекта снижения удельной работы прокатки при корректировке частных обжатий зависит только от толщины проката, а следовательно, от суммарного обжатия.

Такую закономерность можно объяснить тем, что с уменьшением толщины проката возрастает суммарное обжатие, следовательно, увеличивается количество возможных вариантов перераспределения обжатий между клетями.

3.2 Экспериментальное исследование влияния условий деформирования стальной полосы на сопротивление деформации

Целесообразность переноса обжатий для снижения затрат энергии при производстве горячекатаной полосы физически может быть объяснена процессами упрочнения за счет деформации и разупрочнения в междеформационные паузы (за счет процессов возврата и рекристаллизации). Для уточнения влияния описанного механизма упрочнения и разупрочнения в стали при горячей прокатке на испытательной установке Gleeble 3800 произвели испытания образцов из стали S235JR. По результатам этих испытаний построили кривые течения в координатах деформация – напряжение, которые позволяют оценить процессы упрочнения и разупрочнения, происходящие в стали, зависящие от температуры, скорости и степени деформации.

Кривые, представленные на рисунке 3.3, показывают, что начальная стадия чистовой прокатки проходит в области полного протекания динамической рекристаллизации и изменение величины деформации практически не влияет на уровень истинных напряжений. В данной области деформаций большее влияние на истинное напряжение оказывает температура, при которой происходит деформирование. При прокатке в 7-11 клетях уровень деформации находится в области пикового напряжения, которое соответствует величине максимального упрочнения и незначительно увеличение деформации в данной области приводит к релаксации напряжений, обусловленный динамической рекристаллизацией и, как следствие, к более разупрочненной структуре перед следующей деформацией. В интервале конца прокатки любое увеличение деформации сопровождается увеличением напряжений.



1 – область начальной стадии чистовой прокатки в 6 клети; 2 – область прокатки в 7-11 клетях; 3 – область прокатки в последней 12 клети

Рисунок 3.3 – Кривые деформирования:

а) – кривые пластического течения стали S235JR

б) – кривые среднего напряжения течения для стали S235 при различных температурах и скоростях деформации

Для анализа необходимого усилия прокатки с учетом описанных механизмов, графики перестроили (рисунок 3.3, б), использовав среднее сопротивление деформации σ_{sm}, рассчитанное по формуле (3.2):

$$\sigma_{sm} = \frac{\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma_s d\varepsilon}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \qquad (3.2)$$

Далее, полученные кривые (Рис. 3.3, б) были описаны с помощью формулы Хензеля – Шпиттеля с применением регрессионного анализа и подбором эмпирических коэффициентов. В результате получили формулу для анализа сопротивления деформации исследуемой марки стали:

$$б = 1419\ \varepsilon^{0,1851}\ u^{0,0899}\ e^{-0,0024T}, \qquad (3.3)$$

где ε – относительная деформация; u – скорость деформации; T – температура металла.

Достоверность уравнения подтверждается коэффициентом множественной детерминации $R^2 = 0,959$.

Полученное уравнение совместно с уточненной методикой учета затрат на привод опорного валка было использовано для прогноза снижения энергозатрат в чистовой группе клетей при оптимизации режимов.

В результате выполненного эмпирического исследования были установлены закономерности изменения сопротивления деформации стали в процессе ее деформирования на непрерывном стане горячей прокатки.

Выводы по Главе 3

1. Проанализирован и определен наиболее массовый марочный и профильный сортамент полос, производимый на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 2000, который будет использован для проверки теоретических выводов работы.

2. Выполнена предварительная оценка технологических факторов – обжатий, натяжений полосы и температуры подката – на энергозатраты процесса.

3. Установлено, что максимальный эффект экономии может быть достигнут при оптимизации режимов прокатки полос толщиной от 1,2 до 6,0 мм, средняя экономия при изменении режима обжатий и температурного режима может составить до 10-15 %.

4. На основе физического моделирования путем испытаний образцов из стали S235JR выполнена оценка влияния технологических факторов на энергозатраты процесса деформирования, определены эмпирические коэффициенты формулы для расчета сопротивления деформации, учитывающие процессы упрочнения и разупрочнения в материале полосы во время ее прокатки.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НЕПРЕРЫВНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ С МИНИМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ

4.1 Исследование текущего уровня энергозатрат на действующем ШПСГП

Для исследования уровня энергозатрат на осуществление процесса непрерывной горячей прокатки тонких широких полос проанализированы суммарные мощности, потребляемые двигателями главных приводов рабочих клетей ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь»: рассчитанные суммарные мощности, необходимые для вращения рабочих валков клетей при прокатке всех видов сортамента, были сгруппированы по диапазонам, для каждого диапазона определены доли режимов от их общего количества, которые попали в каждый сгруппированный диапазон при производстве массового сортамента (см. рисунок 4.1).

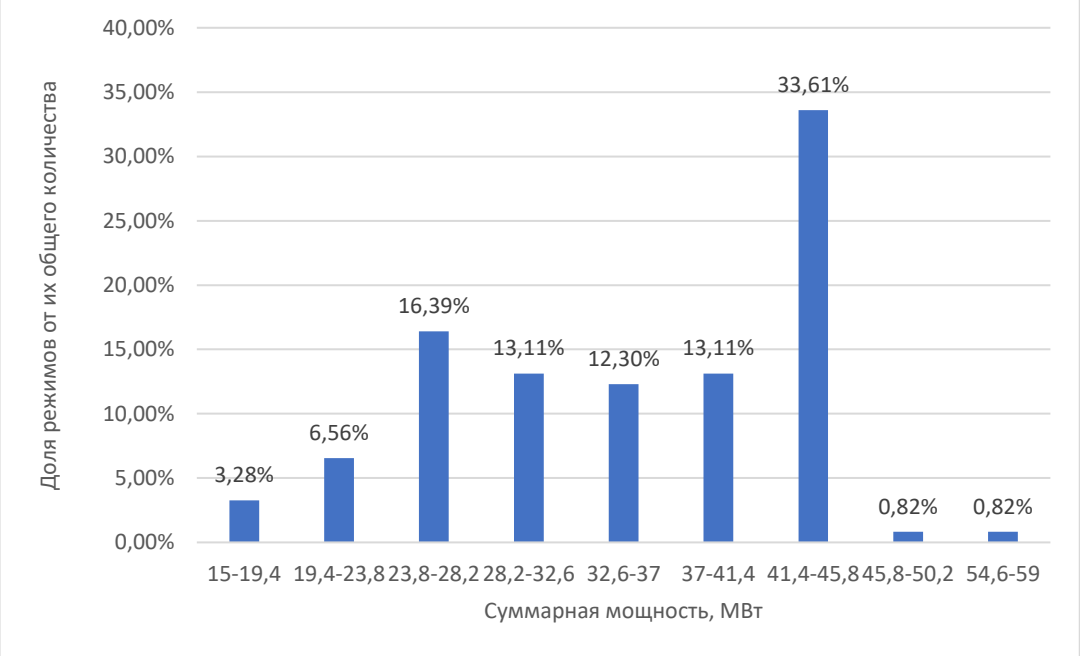


Рисунок 4.1 – Суммарная мощность двигателей клетей чистовой группы ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь» при прокатке массовых групп сортамента

Из рисунка 4.1 следует, что две трети (64,75 %) прокатанных полос были произведены с суммарной потребляемой мощностью от 15 до 41,4 МВт, а одна треть (35,25 %) – с суммарной потребляемой мощностью от 41,4 до 59 МВт. Этот факт позволяет сделать вывод о том, что существуют резервы снижения энергоемкости процесса прокатки в непрерывной группе клетей ШПСГП. Следуя сказанному, оптимальным выглядит вариант, когда весь диапазон энергозатрат будет находиться в первом указанном интервале. При достижении данного оптимального варианта средний уровень энергозатрат снизится примерно на 10–15 %, что весьма существенно. Однако требуется найти способ обеспечения обозначенного сокращения энергопотребления – определить факторы с наибольшим влиянием на процесс прокатки.

Для определения упомянутых выше способов снижения энергопотребления было исследовано влияние факторов технологии: частных обжатий, натяжений и температуры стальной полосы в рабочих клетях на уровень энергозатрат.

На рисунках 4.2–4.5 представлены графики, показывающие влияние факторов технологии на суммарную потребляемую мощность чистовой группы ШПСГП 2000.

Графики построены по результатам прокатки полосы толщиной 4мм из стали марки 08пс.

Рисунок 4.2 – Влияние температуры подката чистовой группы ШПСГП 2000 на суммарную потребляемую мощность

Из рисунка 4.2 следует, что при повышении температуры полосы перед чистовой группой клетей средняя суммарная потребляемая мощность снижается. R-квадрат линии тренда равен 0,0375.

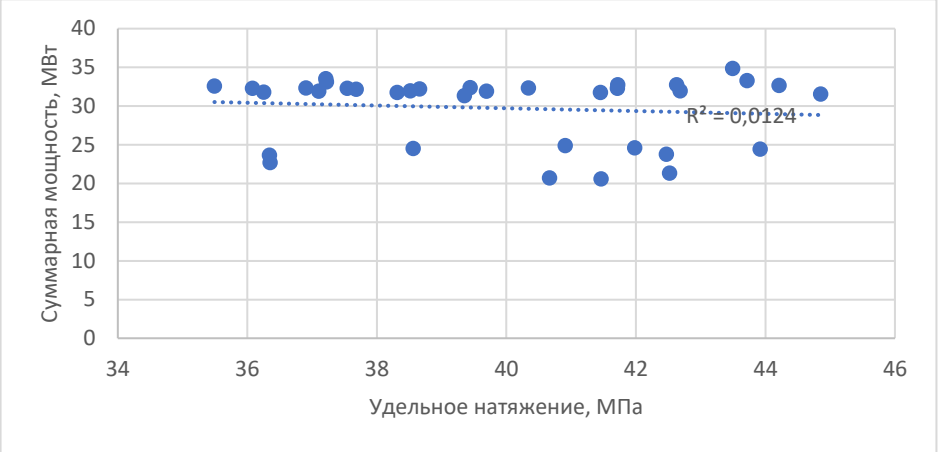


Рисунок 4.3 – Влияние натяжения в последнем межклетевом промежутке чистовой группы ШПСГП 2000 на суммарную потребляемую мощность

Анализ зависимости изменения натяжений в последнем межклетевом не выявил существенного влияния последнего на суммарную потребляемую мощность. Корреляция слабая, R-квадрат линии тренда менее 0,0124.

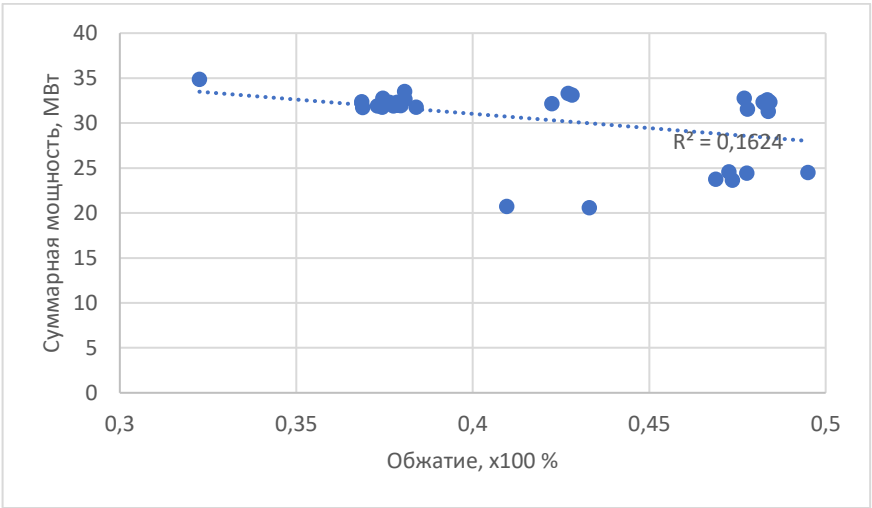


Рисунок 4.4 – Влияние величины обжатия в первой клети чистовой группы ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь» на суммарную потребляемую мощность

Наиболее сильную корреляцию на суммарную потребляемую мощность показало влияние величины обжатия в первой клети чистовой группы, R-квадрат линии тренда равен 0,1624. Наблюдается снижение суммарной потребляемой мощности при увеличении степени обжатия.

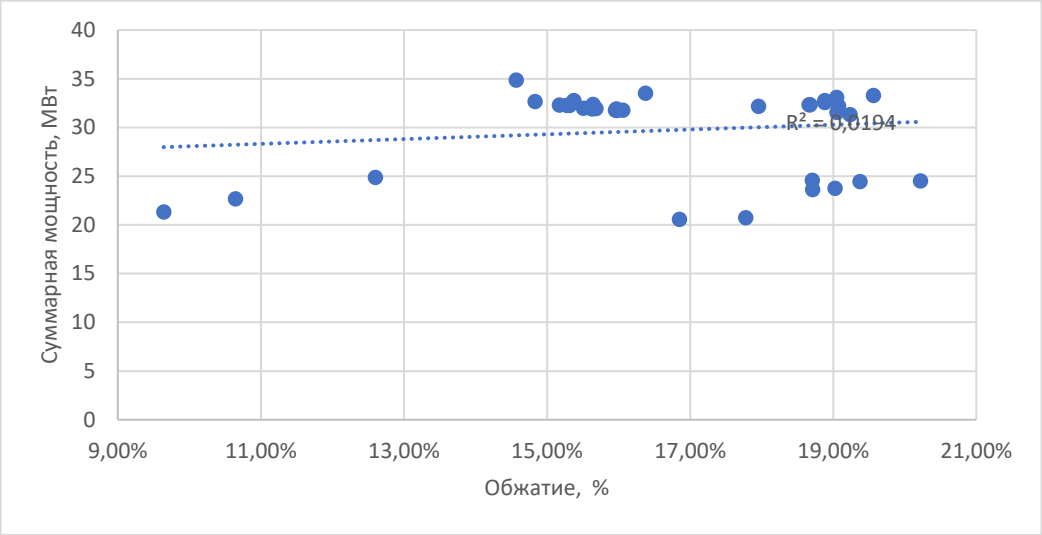


Рисунок 4.5 – Влияние величины обжатия в предпоследней клети чистовой группы ШПСГП 2000 на суммарную потребляемую мощность

Обжатия в предпоследней клети чистовой группы оказывают незначительное влияние на суммарную потребляемую мощность, R-квадрат линии тренда равен 0,0194. Причем наблюдается обратная зависимость – с увеличением обжатия суммарная потребляемая мощность растет.

Для оценки степени воздействия факторов технологии на уровень потребляемой мощности и разработки усовершенствованной методологии расчета параметров прокатки проранжировали эти факторы по степени значимости. Критерием для ранжирования являлся параметр R-квадрат, безразмерная величина, которая показывает долю изменчивости зависимого фактора, в данном случае мощности, от температуры подката, натяжений и обжатий стальной полосы в клетях. Результаты этого ранжирования представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Ранжирование факторов прокатки по степени влияния на уровень энергозатрат в непрерывной группе клетей широкополосного стана

№	Параметр технологии	Величина R-квадрат
1	Частное обжатие полосы в клети	0,02 – 0,16
2	Температура подката	0,04
3	Удельное натяжение полосы	Менее 0,013

Величина R-квадрат показывает своего рода изменчивость изучаемого зависимого фактора (в нашем случае мощности двигателей главных приводов) вызванная независимыми параметрами (в нашем случае температурой полосы, натяжением и обжатием). Так, например, если величина R-квадрат для зависимости фактора y от фактора x равна 0,5, то это означает, что изменение фактора y на 50% вызвано изменением фактора x. В рассмотренных графиках изменения мощности на 16% вызвано изменением обжатий, на 4% - изменением температуры и лишь на 1,3% - изменением натяжений.

Стоит отметить, что фактор удельного натяжения практически не изменяет уровня энергозатрат. Значимым фактором является температура подката, однако изменение величины этого фактора может привести к изменению механических свойств готового проката. Наиболее значимым фактором являются частные обжатия в клетях – путем их перераспределения при расчете режима можно добиться минимального уровня энергозатрат.

Таким образом, анализируя данные с целью поиска значимой регрессионной зависимости, было отмечено, что рассматриваемые корреляции практически не дают рычагов для повышения энергоэффективности. При этом, наиболее сильным фактором являются частные обжатия в клетях и путем их перераспределения можно добиться значимого снижения энергозатрат.

4.2 Разработка усовершенствованной модели процесса горячей прокатки на ШПСГП

Анализируя предыдущий опыт снижения затрат энергии на действующем ШПСГП, можно утверждать, что он, в основном, базируется на следующих рекомендациях:

- для снижения затрат энергии рекомендует уменьшать частные обжатия в последних клетях чистовой группы ШПСГП и увеличить в первых;

- в качестве основного критерия рекомендуется использовать максимальную температуру подката перед чистовой стадией прокатки.

Данные рекомендации имеют ограничения при прокатке стальных полос на ШПСГП 2000, где температурный интервал перед чистовой группой клетей значительно выше и выбор температуры подката при прокатке ответственного сортамента задается параметрами технологии (зачастую технологическими режимами низкотемпературной чистовой прокатки). Температура раската за клетью № 5 (последней в черновой группе клетей) находится в пределах 900 -1200 ° С, температура подката перед чистовой группой клетей находится в пределах 950-1150° С.

Для проверки этого утверждения провели эксперимент с прокаткой полосы из стали 08пс 2,3х1290 мм по двум разным режимам, описанным в главе 3 (перераспределили обжатия на первые клети), но установили постоянную температуру входа в первую клеть чистовой группы.

Параметры стандартного режима приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Режим прокатки полосы размерами 2,3х1290 мм из стали 08пс в чистовой группе клетей стана 2000.

№ клети	толщина полосы на входе в клеть, мм	толщина полосы на выходе из клети, мм	относительное обжатие в клети, %	переднее удельное натяжение, МПа	сопротивление деформации, МПа
6	35,69	20,61	42,2	8	128

Окончание Таблицы 4.2

7	20,61	10,20	50,5	8	157
8	10,20	6,35	37,8	15	166
9	6,35	4,58	27,9	30	172
10	4,58	3,42	25,3	35	192
11	3,42	2,61	17,9	35	200
12	2,61	2,3	18,0	0	235

Для приведенного в таблице 4.2 режима температура раската на выходе из черновой группы клетей составляла 1080 ^{0}С.

Суммарная мощность двигателей главных приводов клетей 36,4 МВт.

Для снижения суммарной мощности приводов было решено перераспределить обжатия:

- увеличить обжатия в первых трех клетях до загрузки по усилию прокатки в диапазоне 80-85% от максимально допустимого значения усилия в клети;

- установить относительное обжатие в последней клети в пределах 12 – 18%;

- относительное обжатие в предпоследней клети установить, исходя из равенства контактных напряжений в предпоследней и последней клетях.

В результате был рассчитан режим прокатки, представленный в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры оптимизированного режима прокатки в чистовой группе клетей стана 2000 полосы из стали 08ПС с размерами сечения 2,3х1290 мм

№ клети	толщина полосы на входе в клеть, мм	толщина полосы на выходе из клети, мм	относительное обжатие в клети, %	переднее удельное натяжение, МПа	сопротивление деформации , МПа
6	35,68	17,18	51,8	8	135
7	17,18	9,00	47,5	8	155
8	9,00	5,73	36,3	15	165
9	5,73	4,2	26,8	30	173
10	4,2	3,17	24,4	35	194

Окончание Таблицы 4.3

11	3,17	2,61	20,6	35	215
12	2,61	2,3	18,0	0	246

Для приведенного в таблице 4.3 режима температура раската на выходе из черновой группы клетей также составляла 1080 ^{0}C.

В данном эксперименте суммарная мощность двигателей главных приводов чистовой группы клетей снизилась до 35,12 МВт (стандартный вариант - 36,40 МВт). Снижение суммарной мощности по сравнению со стандартным вариантом составило всего 3,5 %. (при ожидаемых 10,0–11,5 %).

Этот факт показал противоречие с полученными зависимостями, что повлекло за собой необходимость рассмотрения процессов, происходящих в металле во время горячей прокатки. Учитывая изложенное, были проведены предварительные промышленные исследования, которые должны были продемонстрировать возможность повышения энергоэффективности технологических режимов широкополосных станов горячей прокатки за счет корректировки факторов прокатки отдельно от других.

Такой уровень снижения энергопотребления недостаточен, т.к. при горячей прокатке возникает большое количество дестабилизирующих воздействий (например, колебания температуры полосы, механических свойств материала полосы), которые могут полностью исключить весь эффект экономии. Также в начале данной главы был определен резерв экономии 10-15 %, которого в приведенном примере достичь не удалось.

В этой связи, проанализируем целесообразность переноса обжатий с первых клетей чистовой группы ШПСГП на последующие клети для снижения затрат энергии при производстве горячекатаной полосы.

Известно, что в процессе горячей прокатки в чистовой группе клетей в полосе проходят процессы упрочнения за счет деформационного наклепа и разупрочнения в междеформационные паузы за счет процессов возврата и рекристаллизации. Степень упрочнения (остаточная деформация) перед входом в каждую клеть может быть различна, так как она зависит от химического состава производимого проката,

скорости, степени деформации и продолжительности междеформационной паузы. В данном контексте под степенью упрочнения (остаточной деформацией) понимается уровень наклепа, сохраняющегося после последней деформации через определенный интервал времени. Если остаточная деформация равна нулю, это значит, что наклеп, внесенный последней деформацией, полностью снимается процессами возврата и рекристаллизации и металл становиться мягче. Если остаточная деформация равна единице, значит следующая деформация будет добавлять упрочнение к уже внесенному последней деформацией и металл будет становиться прочнее и тверже. В реальных условиях обычно происходит частичная аннигиляция дислокаций и перед последующей деформацией остается часть наклепа от предыдущей. Затраты энергии на деформацию проката в каждой клети напрямую зависят от уровня упрочнения (остаточной деформации) перед входом в нее, т.к. дислокационная плотность напрямую влияет на сопротивление деформации.

Рассмотрим несколько типичных случаев изменения остаточной деформации перед каждой клетью чистовой группы ШПСГП.

Ниже на рисунке 3.6 приведен график изменения остаточной деформации в каждой клети ШПСГП 2000 при производстве полосы из стали марки S235JR толщиной 1,7 мм. По оси ординат отложена доля остаточной деформации перед входом в каждую клеть, по оси абсцисс – номер клети.

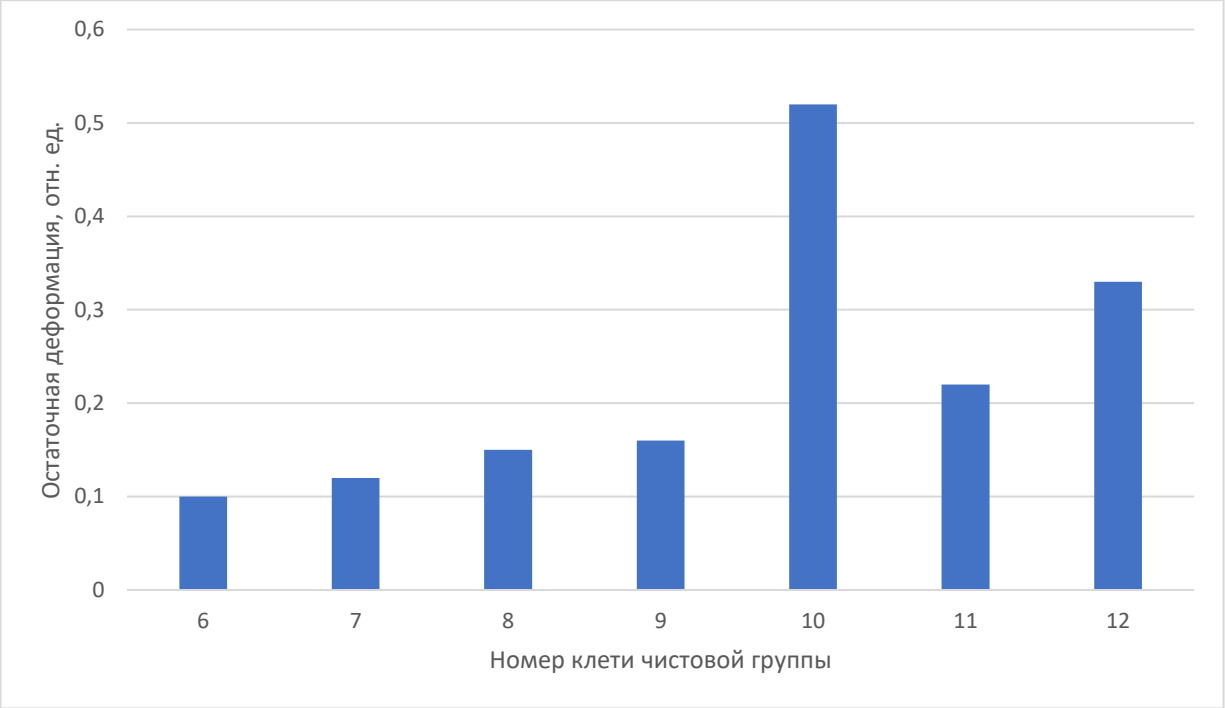


Рисунок 4.6 – Остаточная деформация при прокатке полосы из стали S235JR толщиной 1,7 мм

Из рисунка 4.6 следует, что остаточная деформация в первых четырех клетях чистовой группы (клети 6–9) значительно ниже, чем в последних (клети 10–12). Для такого сортамента целесообразно увеличивать частные обжатия в первых клетях чистовой группы ШПСГП и снижать в последних.

Далее рассмотрим прокатку стали марки 09Г2С толщиной 2.6 мм. График изменения остаточной деформации приведен на рисунке 4.7.

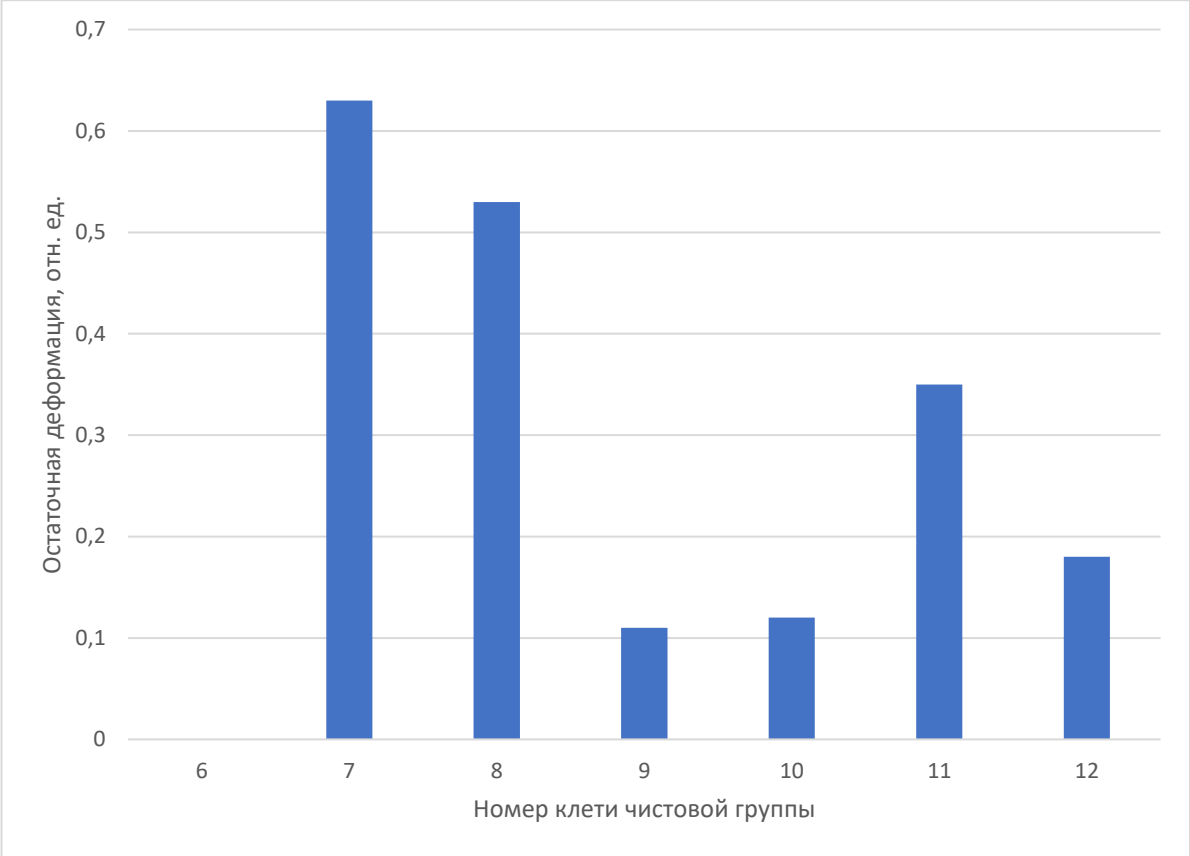


Рисунок 4.7 – Остаточная деформация при прокатке полосы из стали 09Г2С толщиной 2,6 мм

При прокатке полосы из стали 09Г2С распределение остаточной деформации качественно другое. Перед входом в первую клеть чистовой группы (клеть №6) остаточная деформация равна нулю, далее в седьмой и восьмой клетях ее уровень существенно возрастает, а в клети номер 9 и 10 - снижается. Таким образом увеличивать частные обжатия в клетях 7 и 8 при прокатке данной полосы нецелесообразно. Гораздо эффективнее максимально увеличить частные обжатия в клетях 6, 9 и 10.

Третий пример распределения остаточной деформации приведен рисунке 4.8. График построен для прокатки полосы марки ст3пс толщиной 1,5 мм.

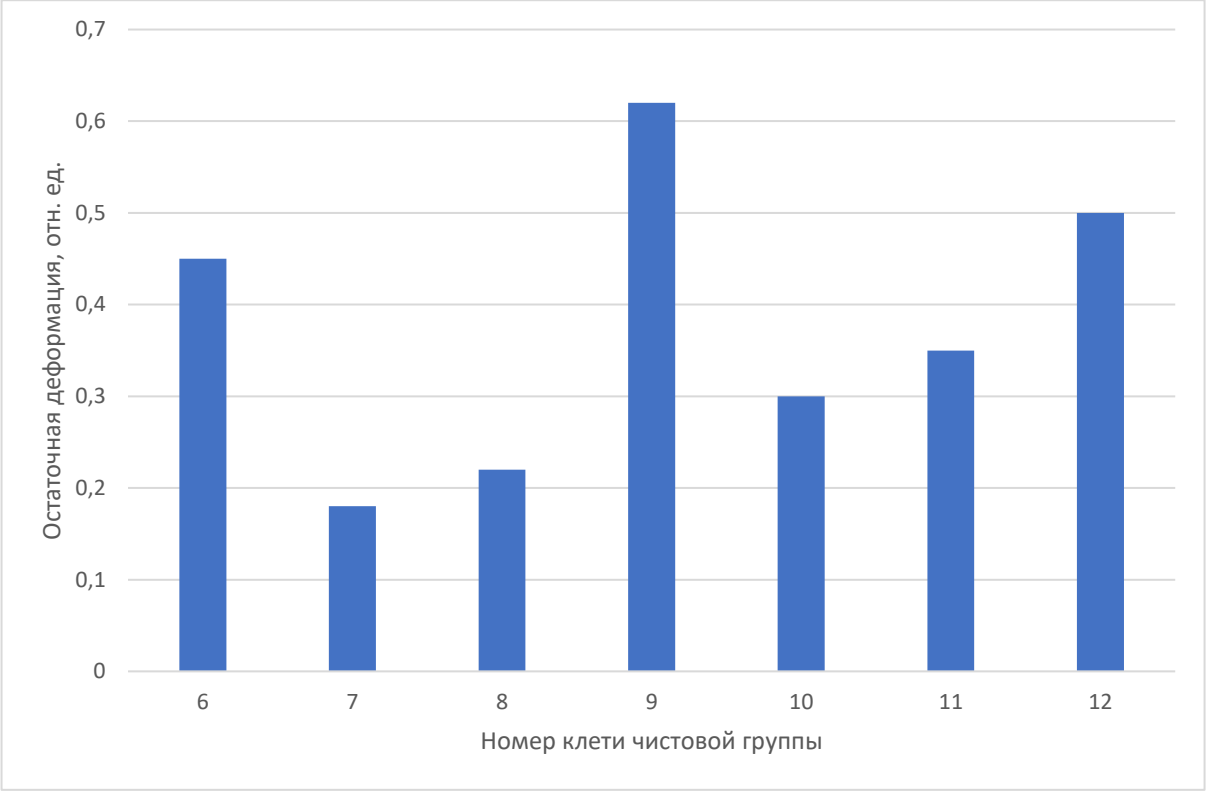


Рисунок 4.8 – Остаточная деформация при прокатке полосы из стали ст3пс толщиной 1,5 мм

При прокатке данной полосы остаточная деформация сохраняется на достаточно высоком уровне при входе в клеть №6 (первая клеть чистовой группы ШПСГП 2000). Далее ее уровень снижается в клетях 7 и 8, возрастает в клети номер 9 и повторно снижается в клети 10. Наиболее энергоэффективным решением для данного сортамента будет увеличение частных обжатий в клети номер 7 (вторая клеть чистовой группы ШПСГП 2000) и увеличение частных обжатий в предпоследних клетях чистовой группы (клети номер 10 и 11).

В качестве теоретической основы этих исследований принята математическая модель [74], связывающая в единый алгоритм технологические, конструктивные и энергосиловые параметры широкополосного стана горячей прокатки.

Расчет сопротивления деформации в данном случае должен дополнительно учитывать релаксацию напряжений, во время пауз между деформациями, а также изменение размера зерна при его рекристаллизации. Степень упрочнения

(остаточная деформация) перед входом в каждую клеть может быть различна, она зависит от химического состава производимого проката, скорости, степени деформации и продолжительности междеформационной паузы.

Это обстоятельство ограничивает возможность использования регрессионного анализа для установления наиболее энергоэффективного режима прокатки для различных марок сталей и типоразмеров полос.

Поэтому, для решения поставленной задачи, была разработана методика компьютерной оптимизации технологического режима прокатки в непрерывной группе клетей ШПСГП с помощью метода симплексов [70]. Данная методика позволяет минимизировать суммарную потребляемую мощность, изменяя частные обжатия в каждой клети чистовой группы клетей ШПСГП с одновременным поиском наименее энергозатратного режима. Метод симплексов позволяет проводить оптимизацию в многомерном пространстве (в нашем случае использовать вариации по изменению частных обжатий в чистовой группе клетей), т.е. не линейно изменять обжатия, перераспределяя их от первой к последней, а находить такое сочетание, которое дает наименьшую расчетную величину суммарной требуемой мощности главных двигателей приводов клетей.

Его сущность заключается в следующем:

- поиск из первых опытов значений факторов, соответствующих наиболее благоприятным из известных режимов оптимизируемого процесса;

- сравнение между собой результатов опытов, нахождение среди них и исключение из рассмотрения самого «плохого» с точки зрения выбранного критерия оптимальности (в нашем случае минимальная суммарная мощность двигателей главных приводов чистовой группы клетей);

- достижение экстремума критерия оптимальности, при котором новый расчет приводит к возврату в предыдущую точку факторного пространства.

Суть методики состоит в следующем. На первом шаге, отталкиваясь от исходного режима, формируется группа так называемых «опорных» режимов прокатки, количество которых равно числу клетей, участвующих в распределении

обжатий [70]. Для всех «опорных» режимов по модели взаимосвязанных технологических и энергосиловых параметров рассчитывается суммарная мощность главных приводов рабочих клетей, результаты расчетов сравниваются между собой, и «опорный» режим обжатий с максимальной суммарной мощностью заменяется новым, в котором распределение обжатий рассчитывается по специальной формуле, обеспечивающей меньшую суммарную мощность. Далее указанная процедура повторяется до тех пор, пока в последнем из рассчитанных режимов суммарная мощность не станет больше, чем в предпоследнем. На этом итерационные процедуры заканчиваются, а режим с минимальной суммарной мощностью признается отвечающим критерию оптимизации.

Разработанная методика расчета энергосиловых параметров чистовой группы клетей ШПСГП 2000 реализована как программа в файле Excel с учетом усовершенствованной в Главе 3 методики расчета момента и мощности двигателей главного привода четырехвалковых клетей непрерывных широкополосных станов горячей прокатки.

Параметры режимов, используемые в программе, сгруппированы таким образом, чтобы они могли быть использованы в том виде, в котором находятся на сайте ИВЦ ПАО «Северсталь».

4.3 Алгоритм расчета режимов прокатки, обеспечивающих минимум энергозатрат на исполнение технологического процесса

Существенную долю затрат на производство горячекатаного проката составляют затраты самого процесса прокатки.

Для поиска наименее затратных режимов прокатки по величине требуемой мощности привода рабочих клетей в чистовой группе будем использовать рассмотренную ранее методику расчета мощности и метод оптимизации параметра с помощью симплексов.

Основным критерием расчета – оптимизации является достижение наименьшей возможной расчетной величины суммарной требуемой мощности главных двигателей приводов клетей.

Сущность и порядок расчета, реализуемые в данном подходе, представлен ниже.

На 1 этапе определяем наибольшие диапазоны изменения факторов – величин обжатий. Переходим к «кодированным переменным» факторов для исходного «симплекса». Исходный симплекс составляли только для 5-и первых клетей чистовой группы, в последней 12 клети чистовой группы обжатие оставили равным исходному, в 11 клети обжатие определяем, исходя из обжатия в 12 клети и конечной толщин.

Формулы для перехода к кодированным переменным имеют вид:

$$X_i = (x_i - x_{\text{ср}})/\Delta x_{max}, \qquad (4.1)$$

где x_i – текущее значение фактора, $x_{\text{ср}}$ – среднее значение факторов из известных значений, Δx_{max} – максимальное изменение фактора относительно его среднего значения.

Средние значения факторов возьмем равными известному существующему режиму обжатий, установим диапазоны варьирования фактора обжатия, например, до 5%. Один из вариантов исходных параметров представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Исходные параметры обжатий в чистовой группе клетей

№ клети (i)	Среднее значение фактора обжатия $\varepsilon_{i\text{ср}}$, %	Диапазон варьирования $\Delta\varepsilon_i$, %
6	47,78	3
7	38,30	3
8	38,70	2
9	31,96	2
10	24,19	2

Окончание Таблицы 4.4

11	12,58	Определится, исходя из условия сохранения частного обжатия в последней клети
12	12,28	0

Для каждого сортамента в качестве средних параметров обжатий могут быть взяты существующие параметры режимов обжатий.

Далее *на 2 этапе* рассчитываем значения факторов в кодированных переменных для «исходного симплекса», формулы для расчета представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Формулы для расчета параметров «исходного симплекса»

Номер расчетного опыта	Значение фактора X_1	Значение фактора X_2	…	Значение фактора X_{n-1}	Значение фактора X_n	Мощность привода
1	k_1	k_2	…	k_{n-1}	k_n	y_1
2	$-R_1$	k_2	…	k_{n-1}	k_n	Y_2
3	0	$-R_2$	…	k_{n-1}	k_n	y_1
…	…	…	…	…	…	…
n-1	k_1	k_2	…	k_{n-1}	k_n	y_1
n	k_1	k_2	…	k_{n-1}	k_n	y_1
n+1	k_1	k_2	…	k_{n-1}	k_n	y_1

Примечание: параметры, представленные таблице, вычисляются следующим образом:

$$k_i = \sqrt{\frac{1}{2i(i+1)}} \qquad (4.2)$$

$R_i = ik_i$; i – номер фактора.

Далее определяем действительное значение факторов x_i (в роли которых выступают частные обжатия ε_i):

$$\varepsilon_i = \Delta\varepsilon_i \cdot X_i + \varepsilon_{i\text{ср}}, \quad (4.3)$$

Для найденных режимов обжатий ε_i рассчитываем суммарную мощность привода по ранее представленной методике.

Выбираем «наихудший» с точки зрения энергоэффективности режим.

Определяем следующий шаг (сочетание параметров обжатий) для оптимизации с помощью зависимости:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{n}\left(\sum_{j=1}^{n+1}\varepsilon_{ji} - \varepsilon_i^*\right) - \varepsilon_i^*, \quad (4.4)$$

где n – число факторов в матрице планирования; j – номер расчетного опыта; ε_i^* - значение обжатия в i-й клети в «наихудшем» режиме.

По рассчитанным значениям параметров заменяем «худший» режим из ранее определенной совокупности параметров на режим, рассчитанный с помощью представленной выше формулы.

Обратим внимание, что суммарная мощность для вновь рассчитанного режима технологии будет меньше.

Продолжаем такой расчет режимов до тех пор, пока суммарная мощность вновь не начнет расти.

Как только мы получим новый режим с большей суммарной мощностью – это будет говорить о том, что предыдущий рассчитанный режим технологии был наилучшим с точки зрения снижения энергозатрат.

В качестве примера ниже представлена таблица исходного симплекса в кодированных переменных и в действительных.

Исходный симплекс для частных обжатий в кодированных переменных для одного из видов сортамента представлен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Параметры обжатий для «исходного симплекса» в кодированных переменных

№ варианта	Обжатие в клети				
	6	7	8	9	10
1	0,5	0,288675	0,204124	0,158	0,129
2	-3	0,288675	0,204124	0,158	0,129
3	0	-2,02073	0,204124	0,158	0,129
4	0	0	-1,63299	0,158	0,129
5	0	0	0	-1,423	0,129
5+1	0	0	0	0	-1,290

Перейдем к действительным значениям параметров, используя формулу:

$X_i = (x_i - x_{ср})/\Delta x_{max}$ (x_i – текущее значение фактора, $x_{ср}$ – среднее значение факторов из известных значений, Δx_{max} – максимальное изменение фактора относительно его среднего значения, X_i – это обжатие в i-й клети в кодированных переменных), т.е.:

$$\varepsilon_i = X_i + \varepsilon_{iср}/\Delta\varepsilon_i \qquad (4.5)$$

Таблица 4.7 – Параметры обжатий для «исходного симплекса» в действительных значениях

№	Обжатие в клети, доля							Суммарная мощность привода, МВт
	6	7	8	9	10	11	12	
1	0,492	0,391	0,391	0,323	0,242	0,073	0,124	37,463
2	0,387	0,391	0,391	0,323	0,242	0,232	0,124	42,025
3	0,477	0,321	0,391	0,323	0,242	0,191	0,124	40,776
4	0,477	0,382	0,354	0,323	0,242	0,163	0,124	39,531
5	0,477	0,382	0,387	0,291	0,242	0,157	0,124	39,218
6	0,477	0,382	0,387	0,319	0,214	0,154	0,124	38,927

Рассчитываем для каждого такого режима суммарную мощность привода, выбираем «наихудший» с точки зрения энергоэффективности режим.

Определяем следующий шаг (сочетание параметров обжатий) для оптимизации.

По рассчитанным значениям параметров заменяем «худший» режим из ранее определенной совокупности параметров на режим, рассчитанный с помощью представленной выше формулы.

Например, обжатие в 6 клети:

$\varepsilon_6 = 2/5*([0,492944+0,387944+\ldots+ 0,477944] - 0,387944) - 0,387944 = 0,574$ и т.д.

Для полученного режима обжатий снова рассчитываем суммарную мощность главных приводов рабочих клетей.

Заменяем в таблице исходного симплекса (таблица 4.7) «наихудший» технологический режим вновь рассчитанным:

Таблица 4.8 – Параметры режимов при очередном шаге оптимизации

№	Обжатие в клети, доля							Суммарная мощность привода, МВт
	6	7	8	9	10	11	12	
1	0,492	0,391	0,391	0,323	0,242	0,073	0,124	37,463
2	0,574	-	-	-	-	-	-	36,589
3	0,477	0,321	0,391	0,323	0,242	0,191	0,124	40,776
4	0,477	0,382	0,354	0,323	0,242	0,163	0,124	39,531
5	0,477	0,382	0,387	0,291	0,242	0,157	0,124	39,218
6	0,477	0,382	0,387	0,319	0,214	0,154	0,124	38,927

Примечание: видно, что вновь рассчитанный по вариант обжатий (режим №2) обладает меньшей требуемой суммарной мощности привода.

Обратим внимание, что суммарная мощность (таблица 4.7) для вновь рассчитанного режима технологии будет меньше.

Продолжаем такой расчет режимов до тех пор, пока суммарная мощность вновь не начнет расти.

Как только мы получим новый режим с большей суммарной мощностью – это будет говорить о том, что предыдущий рассчитанный режим технологии был наилучшим с точки зрения снижения энергозатрат.

Разработанный алгоритм компьютерной оптимизации технологического режима прокатки в непрерывной группе клетей ШПСГП отличается от известных тем, что позволяет минимизировать суммарную потребляемую мощность, изменяя частные обжатия в каждой клети чистовой группы клетей ШПСГП. С помощью него показано, что для достижения максимального эффекта снижения потребляемой мощности, иногда необходимо увеличивать частные обжатия не в 1-й, а во 2-й, 3-й и предпоследних клетях ШПСГП.

4.4 Исследование влияния на уровень энергозатрат ШПСГП каждого из значимых факторов технологии

В разделе 4.1 было представлено влияние наиболее важных факторов прокатки – температуры подката, частных обжатий и удельных натяжений стальной полосы - на общий уровень энергозатрат в клетях непрерывной группы ШПСГП 2000. Данные, приведённые в разделе 4.1, основаны на текущих, не оптимизированных режимах прокатки.

Далее рассмотрим, как использование алгоритма оптимизации и варьирование каждого из значимых факторов технологии теоретически может повлиять на уровень энергозатрат ШПСГП.

Для анализа выбрали два режима горячей прокатки полосы толщиной 1,2 мм и толщиной 16 мм стали марки 09Г2С текущего производства. Сортамент толщиной 16-25 мм в рассмотрение не брали, т.к. объем производимых полос такой толщины на ШПСГП 2000 незначителен (менее 1 % от общего объема) и, в основном, это сложный штрипсовой сортамент, требующий уникальных температурно-деформационных режимов.

Относительные обжатия варьировали в реальных диапазонах: в клетях № 6 и № 11–20-40 %. Температуру начала процесса прокатки варьировали в диапазоне 950- 1150 °С, исходя из технологической инструкции ШПСГП 2000.

На рис. 4.9–4.11 представлены графики, показывающие, как варьирование основных факторов технологии влияет на экономию суммарной потребляемой мощности чистовой группы стана.

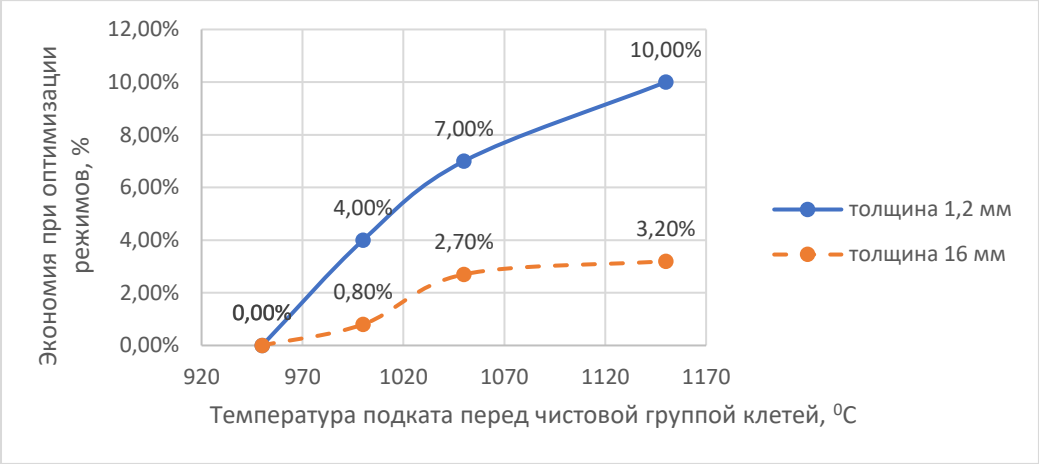


Рисунок 4.9 – Влияние температуры подката перед чистовой группой ШПСГП на экономию суммарной потребляемой мощности

Из рисунка 4.9 следует, что повышение температуры подката перед чистовой группой клетей на 200 °С позволяет экономить 10 % энергозатрат при производстве полос толщиной 1,2 мм и 3,2 % энергозатрат при производстве полос толщиной 16 мм.

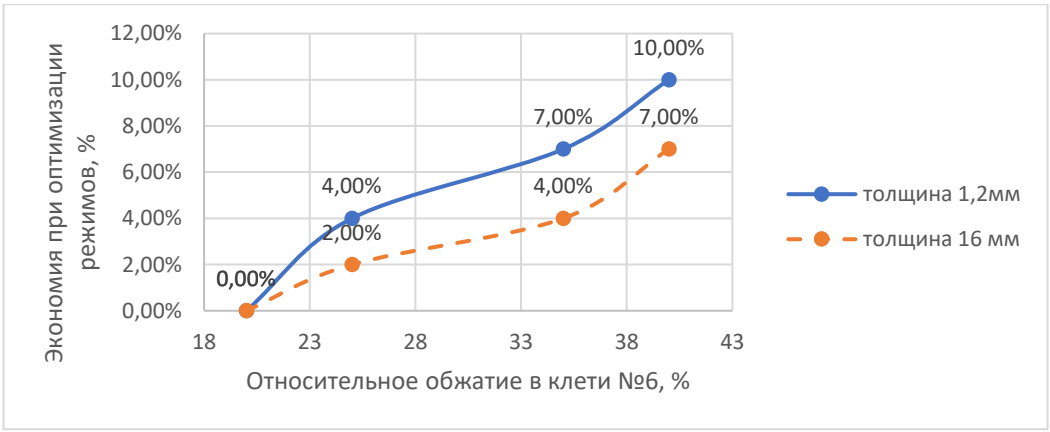


Рисунок 4.10 – Влияние относительного обжатия в клети №6 ШПСГП на экономию суммарной потребляемой мощности

На рисунке 4.10 представлен расчет изменения энергозатрат при увеличении относительного обжатия в клети №6 при прокатке полосы с нулевым уровнем остаточной деформации перед клетью №6 (аналогично прокату из стали марки 09Г2С толщиной 2,6 мм, график остаточной деформации для которой был приведен на рисунке 4.6). Из рисунка 4.11 следует, что если увеличить частные обжатия на 20 % в первой клети чистовой группы ШПСГП, то можно достичь энергоэффективности 10 % при прокатке тонких полос (1,2 мм) и 7 % при прокатке толстых полос (16 мм).

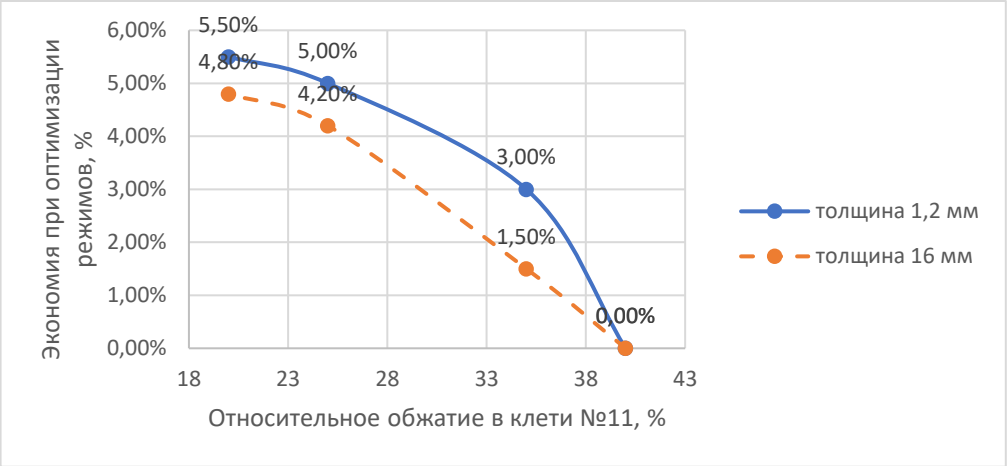


Рисунок 4.11 – Влияние относительного обжатия в клети №11 ШПСГП на экономию суммарной потребляемой мощности

На рисунке 4.11 представлена зависимость экономии при увеличении относительных обжатий в клети №11. Расчет велся с учетом наличия остаточной деформации на уровне 0.35 (по аналогии с прокатом из стали марки 09Г2С толщиной 2,6 мм). Из рисунка видно, что при наличии существенного уровня остаточной деформации для увеличения энергоэффективности целесообразнее снижать частные обжатия до минимального уровня. Это в рассматриваемом примере может привести к экономии энергии на 5,5 % для полос толщиной 1,2 мм и на 4,8 % для полос толщиной 16 мм.

Отдельно рассмотрим влияние переднего и заднего удельных натяжений полосы в клетях на уровень энергозатрат в каждой клети. На рис. 4.12 – 4.13

представлено влияние заднего и переднего удельных натяжений на уровень энергозатрат в клети №11 соответственно.

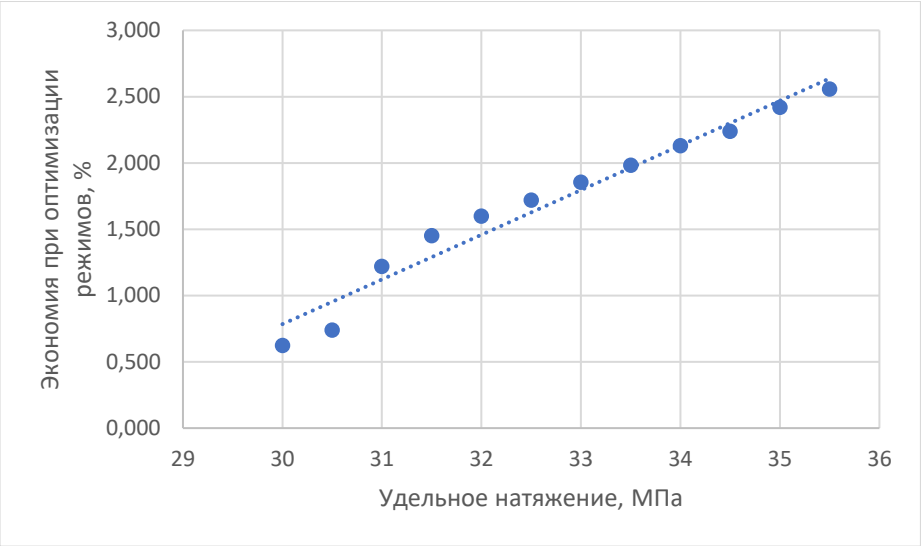


Рисунок 4.12 – Влияние заднего удельного натяжения в клети №11 ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь» на экономию суммарной потребляемой мощности

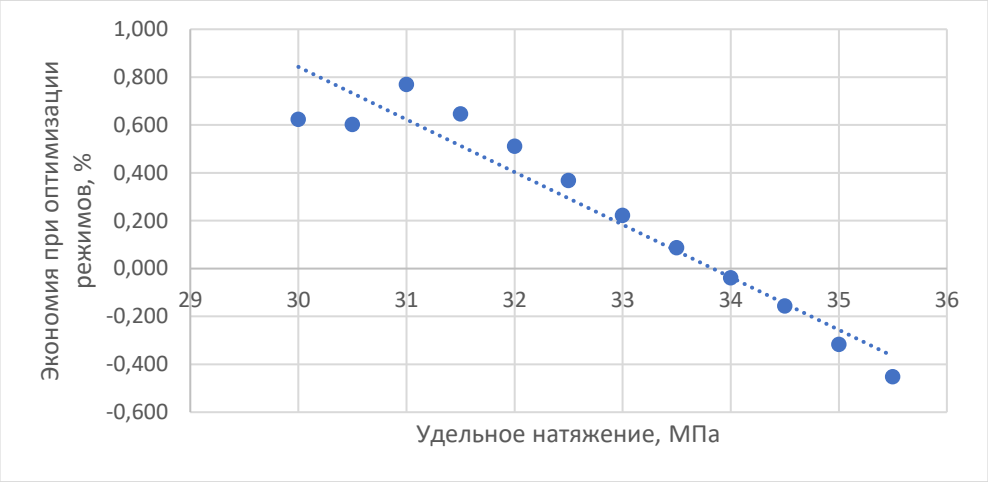


Рисунок 4.13 – Влияние переднего удельного натяжения в клети №11 ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь» на экономию суммарной потребляемой мощности

Данные рисунков 4.12 и 4.13 подтверждают общеизвестный вывод о взаимопротивоположном влиянии переднего и заднего удельного натяжений в клети на требуемую мощность: при росте переднего и снижении заднего натяжений требуемая мощность уменьшается. Причем при увеличении переднего натяжения

на фиксированное значение требуемая мощность уменьшатся на такую же величину, как и при снижении заднего натяжения на то же фиксированное значение. Этот вывод подтверждает ранее сделанное заключение о неэффективности воздействия натяжений на уровень энергозатрат в целом на стане: при росте переднего натяжения в данной клети снижение требуемой мощности в клети окажется почти таким же, как и рост требуемой мощности в клети последующей.

В результате установлено, что при горячей прокатке наиболее эффективными средствами воздействия на экономию являются относительные обжатия и температура подката. Варьирование и перераспределение обжатий между клетями ШПСГП, увеличение температуры подката теоретически позволяют снизить суммарную потребляемую мощность до 10 %. Также исследования показали, что при горячей прокатке с ростом заднего и переднего удельного натяжений суммарная мощность практически не изменяется.

Выводы по Главе 4:

1. Показано, что регрессионные зависимости влияния различных технологических параметров на суммарную потребляемую мощность, не дают рычагов для повышения энергоэффективности процесса горячей прокатки. При этом было отмечено, что наиболее сильным фактором являются частные обжатия в клетях и путем их перераспределения можно добиться значимого снижения энергозатрат.

2. Разработан алгоритм оптимизации технологического режима прокатки в непрерывной группе клетей ШПСГП путем поиска наименее затратных режимов прокатки по величине требуемой мощности посредством перераспределения частных обжатий в клетях и увеличения температуры начала чистовой стадии прокатки.

3. Установлен вклад в среднюю экономию мощности режимов обжатий и температурных режимов. Показано, что увеличение температуры подката и

перераспределение обжатий между клетями ШПСГП теоретически позволяют снизить суммарную потребляемую мощность до 10 %. Причем, чем меньше толщина готового проката, тем большего эффекта можно ожидать от оптимизации технологических режимов.

ГЛАВА 5. ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ

К готовой продукции ШПСГП предъявляются требования к микроструктуре проката, ее механическим свойствам, которые, различны для рядового сортамента и полос специального назначения, например для последующего производства нефтегазовых труб.

Эти критерии необходимо учитывать при оптимизации режимов ШПСГП.

По назначению этот сортамент разделен на следующие группы:

- рядовой прокат из углеродистых марок стали (прокат, к которому не предъявляются повышенные требования по механическим свойствам и качеству);

- конструкционный прокат из низколегированных марок стали (прокат, требующий получения высоких значений механических свойств);

- прокат для автомобилестроения, в т.ч. из свехнизкоуглеродистых сталей типа IF, к которому предъявляются специальные технологические ограничения, влияющие на конечные свойства холоднокатаного проката);

- штрипсовый прокат из среднелегированных марок стали для нефтегазовых труб, в т.ч. коррозионностойкий;

- прокат из специальных марок стали, в т.ч. динамных (данный прокат при охлаждении, даже на воздухе, склонен к охрупчиванию и приобретению повышенных внутренних напряжений, которые могут приводить к растрескиванию металла).

Ниже на рисунке 5.1 представлены доли сортамента ШПСГП 2000.

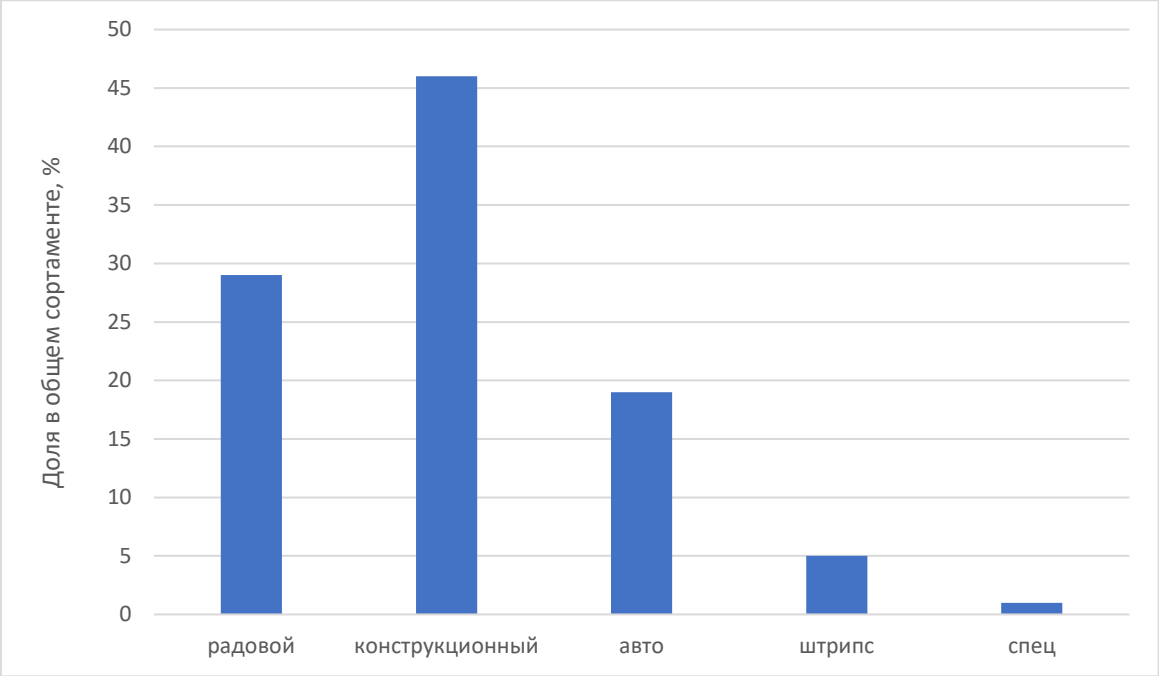


Рисунок 5.1 – Доли сортамента ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь» по назначению произведенных полос

Из рисунка 5.1 следует, что доля рядового и конструкционного сортамента составляет 75 %. Как будет показано далее, данные категории менее всего восприимчивы к изменению технологических параметров, таких, как изменение частных обжатий и температуры стальной полосы в рабочих клетях. Оставшиеся 25 % сортамента приходятся на прокат для автомобилестроения, штрипсовой и специальный сортамент, где любые изменения технологии производства горячекатаной полосы могут сказаться на конечном качестве готового продукта.

Далее рассмотрим, как предложенная в Главе 4 методика влияет на изменение микроструктуры и механических свойств проката в каждой категории. В рассмотрение не будем брать прокат из специальных марок стали ввиду малого объема и сложности их производства.

5.1 Анализ влияния режимов прокатки на качество рядового сортамента и сортамента конструкционного назначения

Рядовой и конструкционный сортамент ШПСГП 2000 представлен такими марками, как ст2сп, ст3сп, ст20пс, S235JR, 09Г2С и другие.

Как было отмечено ранее, из всего рядового и конструкционного сортамента ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь» 80 % произведенного объема приходится на прокат из сталей 08пс, ст3пс, 09Г2С и S235JR. Для проверки разработанных рекомендаций по изменению температурно-деформационных режимов прокатки возьмем полосы, прокатанные из этих марок, стали в диапазоне толщин 1,2 мм и 16 мм и выявим, как изменение обжатий и температуры повлияло на микроструктуру и механические свойства.

Ниже в таблице 5.1 представлены типовые технологические режимы проката сталей ст3пс, 09Г2С и S235JR.

Таблица 5.1 – Типовые технологические параметры производства проката сталей ст3пс, 09Г2С и S235JR

Марка / толщина, мм	Т6, ^{0}С	Т12, ^{0}С	h6, мм	h7, мм	h8, мм	h9, мм	h10, мм	h11, мм	h12, мм
ст3пс/ 1,3	1020	890	28,81	13,44	6,39	3,97	2,61	1,85	1,44
ст3пс/ 10	1010	880	43,35	31,06	22,88	18,29	14,80	12,57	10,24
09Г2С/ 2,6	1045	970	30,38	18,87	10,96	7,21	5,01	3,66	2,92
09Г2С/16,0	1000	920	41,15	33,43	27,13	22,80	19,61	17,52	16,25
S235JR/ 1,7	1010	900	34,47	16,15	8,81	5,29	3,50	2,42	1,91
S235JR/ 15	1020	930	41,61	31,85	24,08	20,69	18,14	16,43	15,38

Примечание: hi – толщина металла на входе в клеть.

Дальше рассмотрим, как перераспределение обжатий влияет на конечную структуру и свойства проката из рядовых и конструкционных марок стали, а также рассчитаем прогноз снижения энергозатрат ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь». Для этого с помощью разработанной методики оптимизации режимов прокатки на ШПСГП изменим типовые технологические режимы прокатки полос на представленные в таблице 5.2.

Ожидаемая экономия энергии была рассчитана с использованием алгоритма оптимизации технологического режима прокатки (Глава 4), как процент, на который снижается работа (формула 5.1) при условии эквивалентного времени прокатки в чистовой группе клетей ШПСГП.

$$A = N_{пр} * t \quad (5.1)$$

где:

Nпр - суммарная мощность привода чистовой группы клетей;

t – время прокатки в чистовой группе клетей

Таблица 5.2 – Усовершенствованные технологические параметры производства проката сталей ст3пс, 09Г2С и S235JR

Марка / толщина, мм	Т6, ^{0}С	Т12, ^{0}С	h6, мм	h7, мм	h8, мм	h9, мм	h10, мм	h11, мм	h12, мм	Ожидаемая экономия энергии, %
ст3пс/ 1,3	1019	888	29,6	15,4	6,5	3,7	2,1	1,6	1,3	9
ст3пс/ 10	1010	880	43,3	26,8	19,4	15,1	12,6	10,9	10,2	3
09Г2С/ 2,6	1045	970	30,3	21,5	13,1	8,8	6,2	4,6	2,9	10

Окончание Таблицы 5.2

09Г2С/ 16,0	1000	921	41,1	29,3	24,7	21,1	18,3	16,5	16,2	5
S235JR /1,7	1008	900	34,4	20,4	9,7	6,0	4,0	2,8	1,9	10
S235JR /15	1023	928	41,6	29,4	23,8	19,9	18,0	16,6	15,3	3

Примечание: hi – толщина металла на входе в клеть.

Данные, приведенные в таблице 5.2, показывают, что изменение схемы обжатий в чистовой группе клетей с помощью разработанной методики оптимизации может привести к экономии энергии в интервале 3-10 %.

5.2 Первая серия опытных прокаток и ее результаты

Первая серия опытных прокаток была проведена на полосах из стали ст3пс с размерами сечения: 3,0 х 1250 мм и 4,0 х 1250 мм.

При производстве каждого из двух перечисленных видов сортамента два сляба прокатывались с использованием оптимизированной технологии, остальные - с использованием существующей технологии.

Для первой серии опытных прокаток было решено снизить максимально допустимые величины частных обжатий по причине возможного выхода из строя оборудования стана. Данные ограничения представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Максимально допустимые величины частных обжатий в непрерывной группе клетей ШПСГП 2000 при проведении первой серии опытных прокаток.

№ клети	6	7	8	9	10	11	12
Максимальная величина частного обжатия, %	50	45	35	25	25	25	25

Базовые (текущие) и оптимизированные режимы прокатки в чистовой группе клетей, которые были использованы в предварительной серии испытаний, приведены в таблицах 5.4 и 5.5. Также в таблицах приведено значение фактического снижения энергопотребления при прокатке по оптимизированным режимам.

Таблица 5.4 – Базовые и оптимизированные режимы прокатки полос из стали марки ст3пс размерами 3,0 х 1250 мм.

№ клети	параметры базового режима			параметры оптимизированного режима			Ожидаемая экономия энергии, %
	толщина полосы на входе в клеть, мм	толщина полосы на выходе из клети, мм	частное обжатие в клети, %	толщина полосы на входе в клеть, мм	толщина полосы на выходе из клети, мм	частное обжатие в клети, %	
6	37,0	22,5	39,4	37,0	20,1	45,5	1,76
7	22,5	13,2	41,4	20,1	11,5	42,5	
8	13,2	8,4	35,9	11,5	7,2	37,9	
9	8,4	6,2	26,9	7,2	5,4	24,3	
10	6,2	4,7	22,9	5,4	4,3	20,9	
11	4,7	3,5	16,7	4,3	3,5	7,7	
12	3,5	3,0	10,5	3,5	3,0	10,5	

Таблица 5.5 – Базовые и оптимизированные режимы прокатки полос из стали марки ст3пс размерами 4,0 х 1250 мм.

№ клети	параметры базового режима			параметры оптимизированного режима			Ожидаемая экономия энергии, %
	толщина полосы на входе в клеть, мм	толщина полосы на выходе из клети, мм	частное обжатие в клети, %	толщина полосы на входе в клеть, мм	толщина полосы на выходе из клети, мм	частное обжатие в клети, %	
6	35	21,3	39,1	35	20,8	40,5	2,72
7	21,3	13,4	37,1	20,8	12,6	39,6	
8	13,4	8,9	33,5	12,6	8,5	32,1	
9	8,9	6,4	28,0	8,5	6,2	27,6	
10	6,4	5,1	20,3	6,2	4,8	22,5	
11	5,1	4,3	17,1	4,8	4,3	9,0	
12	4,3	4,0	7,5	4,3	4,0	7,5	

Кроме величин частных обжатий, приведенных в таблицах 5.4 и 5.5, все параметры технологии в оптимизированных и базовых режимах прокатки оставались неизменными.

Как видно из таблиц в оптимизированных режимах прокатки несколько увеличено частное обжатие в первых клетях чистовой группы при одновременном снижении частных обжатий в остальных клетях. Такое перераспределение позволило снизить потребление электроэнергии в чистовой группе на 1,76–2,72 %.

С учетом ограничений по максимальным частным обжатиям установленная по результатам предварительной серии испытаний максимальная экономия энергии составила до 3 % от существующего уровня энергопотребления, что является существенным, но не максимально возможным уровнем экономии. В

связи с тем, что при производстве первой серии опытных прокаток не были превышены допустимые нагрузки, для достижения более высокой экономии при проведении второй серии опытных прокаток были расширены возможные диапазоны варьирования обжатий при оптимизации с учетом допустимых значений величин частных обжатий в непрерывной группе клетей ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь» (Таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Максимально допустимые величины частных обжатий в непрерывной группе клетей ШПСГП 2000.

№ клети	6	7	8	9	10	11	12
Максимальная величина частного обжатия, %	55	56	55	37	30	25	25

5.3 Вторая серия опытных прокаток с использованием режимов, скорректированных по результатам первой серии испытаний

Вторая серия промышленных испытаний была выполнена при прокатке полосы из стали S235JR с размерами сечения 3х1200 мм. Оптимизированный и базовый режимы обжатия при производстве указанной полосы приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Оптимизированный и базовый режимы обжатия полосы с размерами сечения 3х1200 мм из стали S235JR.

Режим	№ клети						
	6	7	8	9	10	11	12
Базовый	46,0%	43,5%	33,4%	27,8%	21,3%	15,8%	9%
Оптимизированный	39,5%	47,0%	31,8%	25,7%	22,3%	24,2%	8,5%

Фактические режимы обжатий полосы в чистовой группе клетей при прокатке по базовой и оптимизированной технологиям и соответствующие им

средние расходы электроэнергии двигателями главных приводов представлены в таблицах 5.8 и 5.9.

Серия промышленных испытаний включала прокатку 13 рулонов: 6 рулонов с использованием базовой технологии, 7 с использованием оптимизированной технологии.

Таблица 5.8 – Параметры базового режима производства полосы с размерами сечения 3х1200 мм из стали S235JR

Параметр	№ клети						
	6	7	8	9	10	11	12
Относительное обжатие, %	46,0	43,5	33,4	27,8	21,3	15,8	9,0
Время деформации, с	0,0725	0,0300	0,0144	0,0081	0,0046	0,0031	0,0020
Сопротивление деформации, МПа	175,6	217,4	247,2	279,2	307,8	323,2	311,0
Мощность прокатки, кВт	6692,0	8935,1	7306,5	6878,2	5138,8	3669,4	1691,7
Работа деформации, кДж	2458,9	1873,5	1034,7	716,2	347,7	205,9	81,6

Суммарная мощность прокатки и сумма работ прокатки при производстве полосы в чистовой группе клетей составила 40311,7 кВт и 6718,6 кДж соответственно.

Таблица 5.9 – Параметры оптимизированного режима производства полосы с размерами сечения 3х1200 мм из стали S235JR

Параметр	№ клети						
	6	7	8	9	10	11	12
Относительное обжатие, %	39,5	47,0	31,8	25,7	22,3	24,2	8,5
Время деформации, с	0,0813	0,0341	0,0160	0,0093	0,0055	0,0037	0,0020
Сопротивление деформации, МПа	158,4	204	225,4	248,8	279,6	330,0	292,7
Мощность прокатки, кВт	4477,4	9486,5	5912,3	5116,8	4807,4	7365,8	1475,2
Работа деформации, кДж	1820,2	2117,0	893,9	580,7	357,3	436,8	71,1

Суммарная мощность прокатки и сумма работ прокатки при производстве полосы в чистовой группе клетей составила 38541,4 кВт и 6276,9 кДж соответственно.

Как видно из таблиц, основным отличием оптимизированного варианта распределения обжатий от базового является целенаправленное увеличение степеней деформации в клетях 7, 10 и 11. Прогноз суммарной требуемой мощности для базового режима – 40,3 МВт, оптимизированного – 38,5 МВт. Прогноз экономии энергии за счет снижения суммарной работы деформации – 6,6 %.

По результатам контроля расхода электроэнергии главными приводами клетей ШПСГП 2000 с помощью системы АСКУЭ (автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии) установлено, что фактическое снижение энергопотребления при работе по оптимизированной технологии составило 6,5%, что оказалось незначительно больше предварительного прогноза.

Далее удостоверились, что оптимизированные режимы существенно не изменяют микроструктуру и свойства прокатанной стали. Результаты сравнения механических свойств и микроструктуры проката, произведенного по двум типам режимов, показаны в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Микроструктура и свойства проката S235JR, произведенных по стандартным и оптимизированным режимам

Марка стали/режим, мм	Тип микроструктуры	Диаметр зерна феррита, мкм	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
S235JR стандартный режим	Феррит 98,1 %, перлит 1,9 %	6,9	335	395
S235JR/ оптимизированный режим	Феррит 97,3 %, перлит 2,7 %	7.2	336	392

Из приведенного анализа следует, что изменение технологических режимов производства проката не оказало существенного влияния на формирование микроструктуры проката и не изменило механические свойства в диапазоне погрешности определения характеристик. Тип и соотношение компонентов микроструктуры также меняется незначительно.

5.4 Практическое применение разработанного алгоритма для штрипсового проката с повышенной прочностью и коррозионной стойкостью

Основываясь на изложенных принципах оптимизации, следующим шагом

были разработаны температурно-скоростные и деформационные режимы производства рулонного проката 08ХНД (Северкор К52 - прокат с повышенной коррозионной стойкостью в водных средах) на ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь». Для этого были выплавлены и прокатаны опытные партии рулонного проката толщиной 8мм.

Ниже в таблицах 5.10 и 5.11 приведены: базовый режим прокатки полосы 08ХНД толщиной 8 мм и микроструктура проката, произведенного по данному режиму.

Таблица 5.10 – Базовый режим производства проката стали 08ХНД

Марка стали/ толщина, мм	Тнчп ^{0}C	Ткп, ^{0}C	h6, мм	h7, мм	h8, мм	h9, мм	h10, мм	h11, мм	h12, мм
08ХНД / 8,0	995	875	46,26	31,02	20,27	14,86	11,91	10,0	8,55

Примечание: hi – толщина металла на входе в клеть.

Таблица 5.11 – Микроструктура проката 08ХНД, произведенного по базовому режиму

Марка стали/ толщина, мм	Тип микроструктуры	Диаметр зерна феррита, мкм	Объемная доля феррита, %	Объемная доля перлита, %	Объемная доля бейнита, %
08ХНД / 8,0	Феррит, перлит	5,3	99	1	-

Скорректированные с помощью методики компьютерной оптимизации технологические режимы прокатки приведены в Таблице 5.12. Ожидаемая экономия от изменения схемы обжатий составила 9,7 %. При этом, для получения целевой микроструктуры, были введены следующие ограничения: величина

единичного относительного обжатия в первом проходе должна быть не менее 30%, а в последнем проходе не более 10%.

Таблица 5.12 – Скорректированные параметры производства проката стали 08ХНД

Марка стали/ толщинк, мм	Тнчп ^{0}C	Ткп, ^{0}C	h6, мм	h7, мм	h8, мм	h9, мм	h10, мм	h11, мм	h12, мм	Ожидаемая экономия энергии, %
08ХНД / 8,0	995	875	46,26	26,53	18,52	13,97	11,42	9,74	8,55	9,7

Примечание: hi – толщина металла на входе в клеть.

После прокатки по оптимизированной технологии фактическая экономия составила порядка 9,2 %. Таким образом, было продемонстрировано, что даже при ограничении технологических условий проведения чистовой прокатки возможна, корректировка обжатий в клетях 7–11 способствует существенной экономии энергии.

В таблице 5.13 приведена микроструктура проката, полученная при использовании усовершенствованных технологических параметров производства.

Таблица 5.13 – Микроструктура при усовершенствованных технологических параметрах производства

Марка стали/ толщина, мм	Тип микроструктуры	Диаметр зерна феррита, мкм	Объемная доля феррита, %	Объемная доля перлита, %	Объемная доля бейнита, %
08ХНД / 8,0	Феррит, перлит	5,5	99	1	-

Из данных таблицы 5.13 можно сделать вывод, что изменения обжатий в клетях 7-11 не приводят к потере качества проката и могут быть использованы в текущем технологическом процессе. Данное решение легло в основу изобретений, изложенных в патентах РФ 2675307, RU 2679375 и международном патенте WO 2019/117756.

Еще одним примером использования разработанного метода, является оптимизированная технология производства рулонного проката для изготовления насосно-компрессорных труб группы прочности Кс по ГОСТ 52203-04. Определяющими характеристиками данного проката, являются высокий предел прочности, обеспечивающий требуемую дальнейшую прочность трубы, достаточно низкий предел текучести и отсутствие структур закалочного типа (бейнит, мартенсит и т.п.), обеспечивающих хорошую формуемость проката. Это может быть обеспечено получением равномерной феррито-перлитной структуры с содержанием феррита 40-70%, в которой отсутствуют элементы структуры закалочного типа.

В таблицах 5.14 и 5.15 приведены базовый режим прокатки полосы Кс толщиной 8 мм и микроструктура проката, произведенного по данным режимам.

Таблица 5.14 – Технологические параметры производства проката стали Кс

Марка стали/ толщина, мм	Тнчп ^{0}C	Ткп, ^{0}C	h6, мм	h7, мм	h8, мм	h9, мм	h10, мм	h11, мм	h12, мм
Кс / 8,0	1038	889	40,21	30,05	22,49	17,36	14,15	11,03	9,01

Примечание: hi – толщина металла на входе в клеть.

Таблица 5.15 – Микроструктура проката Кс, произведенного по базовому режиму

Марка стали/ толщина, мм	Тип микроструктуры	Диаметр зерна феррита, мкм	Объемная доля феррита, %	Объемная доля перлита, %	Объемная доля бейнита, %
Кс / 8,0	Феррит, перлит	6,1	62,7	37,3	-

Расчетная оптимизация технологии также показала целесообразность переноса обжатий с первых клетей чистовой группы, на 9 и 11 клети (Таблица 5.16). Как было отмечено выше для данного типа проката критически важно сохранить

целевую микроструктуру. Поэтому для обеспечения разработанного энергоэффективного режима прокатки и получения целевой микроструктуры, с учетом необходимости повышения частных обжатий в последних клетях чистовой группы, было предложено температуру конца чистовой прокатки поддерживать диапазоне T_{nr}+20°С÷A_{r3}+50°С, где T_{nr} - температура остановки рекристаллизации.

Таблица 5.16 – Скорректированные параметры производства проката стали Кс

Марка стали/ толщина, мм	Тнчп ^{0}С	Ткп, ^{0}С	h6, мм	h7, мм	h8, мм	h9, мм	h10, мм	h11, мм	h12, мм	Ожидаемая экономия энергии, %
Кс / 8,0	1038	889	40,30	32,24	25,38	20,41	15,08	13,12	10,07	7,3

Примечание: hi – толщина металла на входе в клеть.

Таблица 5.17 – Микроструктура проката Кс после корректировки технологических параметров производства

Марка стали/ толщина, мм	Тип микроструктуры	Диаметр зерна феррита, мкм	Объемная доля феррита, %	Объемная доля перлита, %	Объемная доля бейнита, %
Кс / 8,0	Феррит, перлит	6,5	63,0	37,0	-

Далее произвели серию опытных прокаток и в итоге была разработана энергоэффективная технология, которая фактически обеспечивает экономию энергии порядка 6,5 % и получение целевой микроструктуры проката. Данное решение вошло в формулу изобретения в патенте РФ 2689348.

Учитывая экономическую эффективность предложенного алгоритма оптимизации технологического режима прокатки, он внедрен в производство на стане 2000, начиная с мая 2019 года.

С учетом положительного результата второй серии испытаний были рассчитаны 165 вариантов оптимизированных режимов прокатки с учетом дифференциации всего сортамента ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь» по толщине и ширине. Данные режимы использовались на протяжении 1 месяца.

В таблице 5.18 приведены результаты фактической экономии за указанный временной интервал по сравнению с аналогичным временным интервалом работы с использованием базовой (существовавшей) технологии распределения обжатий.

Таблица 5.18 – Результаты фактического распределения снижения энергопотребления

Марки стали	Толщины, мм	Ширины, мм	Фактическое снижение затрат энергии, %	Доля от всего сортамента, для которого достигнута фактическая экономия, %
S275JR S275JR S355MC	8-16	900-1200	2,0-2,5	3,07
			2,5-3,0	2,04
			3,0-3,5	1,02
08пс Сталь 3сп S235JR 09Г2С	6-8	1200-1300	3,5-4,0	10,20
			4,0-4,5	9,18
			4,5-5,0	11,22
			5,0-5,5	12,24
			5,5-6,0	9,18
			6,0-6,5	5,10
			6,5-7,0	11,22

Окончание Таблицы 5.18

SAE 1010 SAE 1008 SAE 1015	2-6	1500-1600	7,0-7,5	5,10
			7,5-8,0	6,12
			8,0-8,5	5,10
			8,5-9,0	3,07
			9,0-9,5	3,07
			9,5-10,0	3,07

Из таблицы 5.18 видно, что в наибольшем количестве режимов прокатки (12,24 % от общего количества) снижение энергозатрат составило 5-5,5 %, что весьма существенно, максимальное снижение энергозатрат достигло 10%, наименьшее 2-2,5%. Причем эффект наибольшей экономии электрической энергии происходит при прокатке наиболее тонких полос, а наименьшей – при прокатке наиболее толстых полос. Данный практический вывод совпал с результатами теоретических расчетов, приведенных в Главе 4.

По результатам успешной промышленной апробации созданные режимы с мая 2019 год внедрены в производство на ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь».

Оценку погрешности результатов измерений проводили с учетом ГОСТ Р 8.736-2011 Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

При оценке считали, что не исключённая систематическая погрешность отсутствует, т.к. по данным автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) происходит оценка энергозатрат, которые учитываются при формировании себестоимости и отпускной цены продукции.

Класс точности средств измерения АСКУЭ стана 2000 – 0,5, т.е. предельная погрешность измерения составляет не более 0,5% от измеренной величины мощности, что с учетом реальных диапазонов снижения энергозатрат (до 10%) не оказывает значимого влияния на достоверность полученных результатов снижения мощности.

Выводы по Главе 5:

1. Установлено, что применение разработанного алгоритма оптимизации режимов прокатки на ШПСГП, применительно к наиболее массовому сортаменту из рядовых и конструкционных марок сталей, не приводит к существенным изменениям микроструктуры и механических свойств и не ограничивают применение разработанной методики на всем рядовом и конструкционном сортаменте, производимом на ШПСГП.

2. Рассчитаны и успешно испытаны усовершенствованные режимы горячей прокатки, обеспечивающие снижение расхода электроэнергии двигателями главных приводов ШПСГП 2000 при прокатке наиболее массового сортамента.

3. Подтверждена фактическая экономия энергозатрат на ведение процесса непрерывной горячей прокатки 4,3–9,7% от ранее существовавшего уровня расхода энергии.

4. Показано применение алгоритма оптимизации при разработке новых марок шприпсовой стали.

5. Созданные энергоэффективные режимы внедрены в производство на ШПСГП 2000 ПАО «Северсталь».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации были использованы современные методы конечно-элементного компьютерного моделирования, результаты лабораторных и промышленных экспериментов, на основании которых предложены новые научно-обоснованные технологические решения, позволяющие существенно повысить энергоэффективность процесса непрерывной горячей прокатки.

Результаты проведенной работы заключаются в следующем:

1. В результате моделирования и экспериментальных исследований установлено, что для 4х-валковой системы требуется дополнительная энергия (30–35 %) по сравнению с 2х-валковой из-за затрат на вращение опорного валка, в т.ч. на трение в подшипниках опорных валков (20–25 %) и трение качения в межвалковом контакте (10–15 %).

2. Раскрыт и количественно описан механизм влияния чередующихся процессов деформационного упрочнения и разупрочнения в межклетевых паузах на энергозатраты. Установлено, что уровень остаточной деформации перед входом в клеть, определяемый химическим составом стали, степенью деформации и продолжительностью паузы, является фактором, влияющим на сопротивление деформации.

3. Разработан и апробирован алгоритм оптимизации режимов прокатки, использующий уточненные энергосиловую и реологическую модели. Алгоритм на основе метода симплексов позволяет находить распределение обжатий в чистовой группе клетей, обеспечивающее минимальную суммарную мощность главных приводов.

4. Установлено, что наиболее эффективными технологическими факторами для снижения энергозатрат являются частные обжатия в клетях и температура подката, в то время как влияние межклетевых натяжений в рамках исследованного диапазона оказалось статистически незначимым.

5. На примере марок сталей S235JR, 08ХНД и Кс подтверждена эффективность разработанного комплекса моделей и алгоритма. Промышленные

испытания показали снижение энергопотребления на 4,3–9,7 %, при этом микроструктура и механические свойства готового проката остались на уровне требований стандартов или базовых режимов.

6. Разработанный алгоритм применен для совершенствования технологических процессов для различных типов проката на действующем ШПСГП 2000. Разработаны, испытаны и внедрены в производство усовершенствованные режимы горячей прокатки, обеспечивающие снижение расхода электроэнергии двигателями главных приводов ШПСГП 2000.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки, Учебник для студентов машиностроительных и металлургических вузов. — М.: Металлургия, 1980. — 320 с.

2. Железнов Ю.Д., Григорян Г.Г., Урусов В.П., и др. Технологические факторы процесса тонколистовой прокатки и форма полосы. «Известия ВУЗов, Черная металлургия», 1968, №11, с.72-76.

3. Павлов И.М., Железнов Ю.Д., Григорян Г.Г. и др. "Профиль и форма полосы в связи с неравномерностью деформации при прокатке". "Известия ВУЗов. Ч. Металлургия", 1969, № 3, с.95-99.

4. Железнов Ю.Д., Павлов И.М., Григорян Г.Г. и др. "Влияние внешних частей на деформацию по ширине прокатываемой полосы". Известия ВУЗов. Чернея металлургия, 1970, №11, с. 81-85.

5. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Опперман К. и др. "О соотношении усилий в клетях с принудительным изгибом рабочих валков". Известия ВУЗов. Цветная металлургия, 1971, № 2, с.145-150.

6. Челюсткин А.Б., Григорян Г.Г., Койнов Т.А. "Связь темпера- термо-скоростных условий прокатки с профилем полосы". Известия ВУЗОв. Ч. Металлургия, 1974, №7, с.87-90.

7. Челюсткин А.Б., Григорян Г.Г., Койнов Т.А. "О проблемах горячей прокатки тонких полос". Известия ВУЗов. Ч. Металлургия, № 9, с. 89-93.

8. Челюсткин А.Б., Григорян Г.Г., Койнов Т.А. "О проблемах горячей прокатки толстых листов". Известия ВУЗов. Ч. Металлургия, 1974, № II, с. 69-72.

9. Железнов Ю.Д., Григорян Г.Г., Пличко Н.П. и др. "Формирование геометрии горячекатаной полосы в клетях непрерывного широкополосного стана". Листопрокатное производство, М., Металлургия, 1974, №3, с. 102-106.

10. Григорян Г.Г., Мирошников И.К., Шаталов Р.Л. и др. "Влияние формы горячекатаной полосы на производительность агрегатов резки". Бюллетень

ЦНИИИиТЭЧМ, 1974, №2.

11. "Настройка, стабилизация и контроль процессов тонколистовой прокатки" Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А. и др. М., Металлургия, 1975.

12. Григорян Г.Г., Челюсткин А.Б., Койнов Т.А. "Температурный режим горячей прокатки на непрерывных широкополосных станах". Теория и технология обработки металлов давлением. МИСиС, №81, с. 48-54.

13. Челюсткин А.Б., Крупин А.В., Григорян Г.Г. и др. "Возможные пути интенсификации производства горячекатаных полос". Теория и технология обработки металлов давлением. М., Металлургия, 1975, №86, с. 6-15.

14. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Крупин А.В. и др. "Влияние режима натяжений на утяжку полосы в непрерывной группе широкополосного стана". Теория и технология обработки металлов давлением. М., Металлургия, 1975, № 86, с. 15-22.

15. Григорин Г.Г., Астахов И.Г., Шаталов Р.Л. "Исследование процесс, прокатки в чистовой группе непрерывного широкополосного стана с помощью математической модели". Теория и технология обработки металлов давлением. М., Металлургия, МИСиС, 1975, №66, с. 23-33.

16. Железнов Ю.Д., Челюсткин А.Б., Григорян Г.Г. "Алгоритмизация управления непрерывной группы широкополосного стана". Теория и технология обработки металлов давлением. МИСиС, 1975, № 86, с. 129-136.

17. Павлов И.М., Железнов Ю.Д., Григорян Г.Г. и др. "Результаты исследования процесса тонколистовой прокатки". Теория прокатки. (Материалы Всесоюзной конференции). М., Металлургия, 1975, с. 238-242.

18. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Кэпштейн Э. и др. "Устойчивость процесса тонколистовой прокатки с учетом поперечного течения металла". Известия ВУЗов. Ч. Металлургия, 1975, №3, с. 127-129.

19. Григорян Г.Г., Койнов Т.А., Челюсткин А.Б. "Управление режимом горячей прокатки на непрерывных широкополосных станах". Автоматика и

телемеханика, 1975, №2, с.167-175.

20. Григорян Г.Г., Коцарь С.Л., Железнов Ю.Д. "Учет схемы деформации при анализе формирования в процессе листовой прокатки". Известия ВУЗов. Ч. Металлургия, 1976, №7, с.88-92.

21. Железнов Ю.Д. Франценюк И.В., Григорян Г.Г. и др. "Управление чистовой группой широкополосного стана с применением УВМ", "Сталь", 1976, №5, с. 424-428.

22. Железнов Ю.Д., Коцарь С.Л., Григорян Г.Г. и др. "Оптимизация режимов прокатки и структуры технологического потока современного широкополосного стана", "Сталь", 1976, №8, с. 724-725.

23. Григорян Г.Г., Липухин Ю.В., Волков Б.И. и др. "Влияние стабилизации процессов тонколистовой прокатки и настройки непрерывных станов на их производительность". Новые технологические процессы обработки металлов давлением. Научные труды МИСиС. М., Металлургия, 1976, № 98, с. 7-13.

24. Григорян Г.Г., Поляков Б.А., Кузнецов Л.А. и др. "Учет устойчивости процесса прокатки в алгоритмах настройки непрерывных станов". Новые технологические процессы ОМД. Научные труды МИСиС. М., Металлургия, 1976, № 98, с. 50-53.

25. Коцарь С.Л., Поляков Б.А., Григорян Г.Г. и др. "Совершенствование режимов горячей прокатки на широкополосном стане "Сталь" 1977, №4, с. 338-339.

26. Григорян Г.Г., Поляков Б.А., Пятецкий В.Е. и др. "Совместное регулирование толщины профиля и формы полосы на широкополосном стане горячей прокатки". Новые технологические процессы ОВД. Научные труды МИСиС, 1977, №101, с.43-48.

27. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Гуров А.С. и др. "Измерение удельных натяжений в полосе при горячей прокатке". Новые технологические процессы ОВД. Научные труды МИСиС, 1977, №102, с.49-55.

28. Григорян Г.Г., Коцарь С.Л., Поляков Б.А. и др. "Повышение производительности широкополосного стана горячей прокатки". "Металлург",

1976, №7, с. 31-32.

29. Челюсткин А.Б., Григорян Г.Г., Койнов Т.А. "Температурный режим прокатки полос в черновой группе". Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1976, №11, с. 93-96.39.

30. Технология прокатного производства. В 2-х книгах. Кн. 2. Справочник. Беняковский М.А., Богоявленский К.Н., Виткин А.И., и д.р. Под редакцией Зюзина В.И. и Третьякова А.В., М:»Металлургия», 1991, 423 с.

31. Горячая прокатка широких полос. Хлопонин В.Н., Полухин П.И., Погоржельский В.И., Полухин В.П., М: Металлургия. 1991, 198 с.

32. Титов В.А. Горячая прокатка листовой стали. Учебное пособие. Череповец: НИЛ ММТ и СЭП. 1995, 122 с.

33. Бочков Н.Г., Сафонова В.Н. Экономия металла в прокатном производстве. – М. Металлургия. 1997. – 336 с.

34. Коцарь С.Л., Белянский А.Д., Мухин Ю.А. Технология листопрокатного производства. – М. Металлургия. 1997. – 272 с.

35. Прогрессивные технологические процессы в обработке металлов давлением: Сб. научных трудов/ под ред. акад. Б.А. Никифорова. Магнитогорск: МГМА, 1997. – 288 с.

36. Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства: Материалы 2-й Всеросийской научно-технической конференции. – Череповец: ЧГУ, 2001. – 120 с.

37. Теория и практика производства проката: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-технической конференции. – Липецк: ЛГТУ, - 2001. – 496 с.

38. International Forum for the Properties and Application of IF Steels (IF Steels 2003), May 12-14/2003 / Arcadia Ichigaya, Tokyo, Japan, 2003 - page 440.

39. Беняковский М.А., Масленников В.А. Автомобильная сталь и тонкий лист. Ч. Издательский дом «Череповец», 2007 – 636 с.

40. Моделирование процесса прокатки широких полос с учетом зоны

прилипания в очаге деформации. /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов //Труды седьмого Конгресса прокатчиков. Москва. -2007. - С. 484-492.

41. Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации. /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов //Производство проката. № 4. - 2007. - С. 7-15.

42. Уточненный расчет мощности двигателей главного привода широкополосных станов горячей прокатки. /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Производство проката. № 10. -2007. - С. 5-12.

43. Новый метод энергосилового расчета широкополосных станов горячей прокатки. /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Вестник ЧГУ. № 3. - 2008. - С. 19-26.

44. Повышение эффективности листопрокатного производства на основе новых методов моделирования процессов прокатки. /Э.А.Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов //Материалы IV Международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования». - Вологда: ВоГТУ, -2008. - С. 13-15.

45. Моделирование контактных напряжений и усилий горячей прокатки тонких широких полос с учетом зоны прилипания и упругих участков очага деформации. /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Металлы. № 2. - 2007. - С. 26-34.

46. К вопросу о влиянии трения первого и второго рода на энергосиловые параметры горячей прокатки в клетях кварто. /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Металлы. № 6. -2007. - С. 47-56.

47. Эффективные режимы горячей прокатки тонких полос на широкополосных станах. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Производство проката. № 1.- 2009. - С. 10-16.

48. И.А. Кожевникова, Э.А. Гарбер. Производство проката. Том 1. Книга 2.

Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов. – М.: «Теплотехник», 2010. – 252 с.

49. Всеросийский научный семинар «Научно технический прогресс в металлургии», в рамках Всероссийской научно-технической конференции «Череповецкие научные чтения – 2010» (22-23 ноября 2010 г.): Сборник статей. – Череповец, ЧГУ, 2011, - 151 с. (статья, включенная в обзор: с.121-131).

50. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В. Моделирование и совершенствование теплового режима и профилировок валков широкополосных станов горячей прокатки. Моногр. – Череповец, ЧГУ, М: «Теплотехник», 2013.-113 с.

51. Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы девятой международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГУ, 2014.-251 с. (статья, включенная в обзор: с.55-59).

52. Ю.В. Коновалов. Справочник прокатчика. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос. М. «Теплотехник», 2008.-640 с.

53. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства: Учеб. пособие. – С.Пб. Наука, 2008 – 527 с.

54. V. Colla, M. Vannucci and R. Valentini. Neural network based prediction of roughing and finishing times in a hot strip mill.

55. Амиров Р.Н., Дема Р.Р., Лукьянов С.И., Ярославцев А.В., Мартынова У.Д. Применение нейронных сетей для моделирования энергосиловых параметров клетей чистовой группы НШСГП 2000 ОАО «ММК». Вестник МГТУ им Г.И. Носова. 2012. №2. С.102-103.

56. Johannes Fresner, Christina Krenn. Theoretical minimum consumption calculation as starting point for cleaner production option identification as a new approach to benchmarking.

57. Flat-rolled steel process: advance technologies /editor Vladimir Ginzburg/ CRC Press, Taylor and Francis Group, London, New York, 2009, 372 page.

58. Chubenko, V., Khinotskaya, A., Yarosh, T., Saithareiev, L. Sustainable

development of the steel plate hot rolling technology due to energy-power process parameters justification (2020) E3S Web of Conferences, 166, статья № 06009

59. Kharchenko, M.V., Dema, R.R., Bilichenko, V.I. Energy reduction technologies based on the lubricant supply in the roll contact system “quarto” during the hot strip rolling (2016) Materials Science Forum, 870, pp. 446-453.

60. Dema, R.R., Kalugina, O.B., Tyuteryakov, N.Sh. Dependents of energy consumption at the wide-strip hot rolling on a mode option of rolls lubrication modeling (2017) 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings, статья № 8076435

61. Tan, M., Duan, B., Li, Y., Zhou, X. Numerical modelling and parametric analysis of energy consumption during single-pass hot rolling (2013) International Journal of Applied Mathematics and Statistics, 48 (18), pp. 423-432.

62. Daneryd, A., Olsson, M.G., Lindkvist, R. Energy efficient rolling on-line minimization of energy consumption in the hot rolling of long products (2007) Nordic Steel and Mining Review, (3), pp. 98-100.

63. Lee, J.H., Choi, J.W., Hwang, S.M., Kwak, W.J. A precision on-line model for the prediction of deformation energy and frictional energy in hot strip rolling (2004) Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME, 32, pp. 565-572.

64. Промышленные испытания на непрерывных станах энергоэффективных режимов прокатки тонких стальных полос [Текст]/ Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Дилигенский Е.В., Мишнев П.А., Дятлов И.А., Антонов В.Ю.// Производство проката. – 2013. – № 5. – с. 9–12;

65. Энергосиловой расчет широкополосных станов горячей прокатки с учетом влияния температур на упругие свойства горячекатаных тонких полос [Текст]/ Гарбер Э.А., Поспелов И.Д., Кожевникова И.А.// Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – № 31 - 3 – с. 8–13

66. Новая методика расчета энергосиловых параметров широкополосных стальной горячей прокатки [Текст]/ Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А.//

Сталь. – 2009. – №9 – с. 54

67. Гарбер Э.А., Поспелов И.Д., Кожевникова И.А.// Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – № 31 - 3 – с. 8–13

68. Пономарев В.Б., Лошкарев А.Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций. – Екатеринбург, ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ», 2006 г. – 129 с.

69. Хемди А. Таха. Глава 3. Симплекс-метод // Введение в исследование операций. Operations Research: An Introduction. — 7-е изд. — М.: «Вильямс», 2007. — С. 95—141.

70. Разработка и промышленные исследования энергоэффективных режимов горячей прокатки широких стальных полос./ Э.А. Гарбер, Д.Л. Шалаевский, А.В. Митрофанов, П.А. Мишнев, А.А. Огольцов.// Черная металлургия, 2016. №5. С.38-43.

71. Оптимизация технологического режима широкополосного стана горячей прокатки по критерию «минимум расхода энергии». Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Митрофанов А.В. Механическое оборудование металлургических заводов. 2016. № 1 (6). С. 3-9.

72. Митрофанов А.В., Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л. Методы уменьшения энергозатрат при горячей прокатке стальных широких полос. Череповецкие научные чтения - 2016. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. В 3 частях., 2017. С. 133-134.

73. STAN 2000: computer model for simulation of steels hot rolling on mill 2000 of Severstal. Ogoltcov A., Sokolov D., Sokolov S., Vasilyev A. Conference: METAL'2015, At Brno, Czech Republic

74. Модель для предсказания коэффициента Лэнкфорда промышленного листа автомобильных сталей. / Васильев А.А., Соколов Д.Ф., Соколов С.Ф., Глухов П.А., Колбасников Н.Г., Митрофанов А.В. // Сталь. 2018.- № 2. - С. 16-21.

75. Factors affecting housing and utilities pipe corrosion resistance. Mitrofanov A.V., Petrova M.V., Kirillov I.E., Rodionova I.G., Udod K.A., Endel’ N.I. Metallurgist.

2016. Т. 60. № 1-2. С. 76-80.

76. «Северкор» - современный прокат для нефтепромысловых трубопроводов. Родионова И.Г., Митрофанов А.В., Тихонов С.М., Сидорова Е.П., Комиссаров А.А., Кузнецов Д.В., Барабошкин К.А., Киселев Д.А. Инженерная практика. 2017. №12. С. 38-44.

77. Способ производства низколегированных рулонных полос с повышенной коррозионной стойкостью. Митрофанов А.В., Тихонов С.М., Сидорова Е.П., Комиссаров А.А., Кузнецов Д.В., Барабошкин К.А., Киселев Д.А., Матросов М.Ю., Родионова И.Г., Серов Г.В., Зайцев А.И. / Патент РФ 2675307.

78. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке. 1991. 254 с.

79. Гарбер Э.А., Митрофанов А.В., Шалаевский Д.Л. Повышение энергоэффективности процесса непрерывной горячей прокатки на стане 2000 ЛПЦ-2 ПАО «Северсталь». Материалы III Международной научной конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017». С. 69-73

80. Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Мишнев П.А., Михеева И.А., Палигин Р.Б., Улучшение плоскостности горячекатаных стальных широких полос путем оптимизации настройки параметров технологического режима. Проблемы черной металлургии - 2015. международный научный семинар в рамках Всероссийской научно-практической конференции, 2016, с. 76-82.

ПРИЛОЖЕНИЕ А1- Значение коэффициента «*c*» в зависимости от диаметра бочки, контактного давления и относительной скорости вращения рабочего валка

№	p, Мпа	wотн, с-1	D, мм	c
1	700	1,2	700	0,9172
2	710	1,21	700	0,9215
3	720	1,22	700	0,8742
4	730	1,23	700	0,8650
5	740	1,24	700	0,8835
6	750	1,25	700	0,9121
7	760	1,26	700	0,8913
8	770	1,27	700	0,8685
9	780	1,28	700	0,9205
10	790	1,29	700	0,8623
11	800	1,3	700	0,8555
12	810	1,31	700	0,8756
13	820	1,32	700	0,8903
14	830	1,33	700	0,8458
15	840	1,34	700	0,8691
16	850	1,35	700	0,9098
17	860	1,36	700	0,8566
18	870	1,37	700	0,8785
19	880	1,38	700	0,8595
20	890	1,39	700	0,8072
21	900	1,4	700	0,8606
22	910	1,41	700	0,8229
23	920	1,42	700	0,7863
24	930	1,43	700	0,8382
25	940	1,44	700	0,7919
26	950	1,45	700	0,7835
27	960	1,46	700	0,8588
28	970	1,47	700	0,8150
29	980	1,48	700	0,7762
30	990	1,49	700	0,7670
31	1000	1,5	700	0,7507
32	1010	1,51	700	0,8132
33	1020	1,52	700	0,7486
34	1030	1,53	700	0,7867
35	1040	1,54	700	0,7396
36	1050	1,55	700	0,7673
37	1060	1,56	700	0,8035
38	1070	1,57	700	0,7681

39	1080	1,58	700	0,8124
40	1090	1,59	700	0,7975
41	700	1,2	800	0,9367
42	710	1,21	800	0,9537
43	720	1,22	800	0,8722
44	730	1,23	800	0,9427
45	740	1,24	800	0,9193
46	750	1,25	800	0,9104
47	760	1,26	800	0,8604
48	770	1,27	800	0,9342
49	780	1,28	800	0,8528
50	790	1,29	800	0,8363
51	800	1,3	800	0,8826
52	810	1,31	800	0,8663
53	820	1,32	800	0,8447
54	830	1,33	800	0,8321
55	840	1,34	800	0,8643
56	850	1,35	800	0,8815
57	860	1,36	800	0,8775
58	870	1,37	800	0,8300
59	880	1,38	800	0,8560
60	890	1,39	800	0,8513
61	900	1,4	800	0,8295
62	910	1,41	800	0,8162
63	920	1,42	800	0,7887
64	930	1,43	800	0,8546
65	940	1,44	800	0,8369
66	950	1,45	800	0,7652
67	960	1,46	800	0,8371
68	970	1,47	800	0,8462
69	980	1,48	800	0,8100
70	990	1,49	800	0,7702
71	1000	1,5	800	0,8130
72	1010	1,51	800	0,7965
73	1020	1,52	800	0,7791
74	1030	1,53	800	0,7811
75	1040	1,54	800	0,7610
76	1050	1,55	800	0,7764
77	1060	1,56	800	0,7542
78	1070	1,57	800	0,8009
79	1080	1,58	800	0,7610
80	1090	1,59	800	0,8004
81	700	1,2	800	0,9055

82	710	1,21	800	0,9562
83	720	1,22	800	0,9403
84	730	1,23	800	0,9392
85	740	1,24	800	0,9355
86	750	1,25	800	0,9467
87	760	1,26	800	0,9111
88	770	1,27	800	0,8623
89	780	1,28	800	0,8621
90	790	1,29	800	0,8828
91	800	1,3	800	0,8353
92	810	1,31	800	0,8925
93	820	1,32	800	0,9068
94	830	1,33	800	0,8252
95	840	1,34	800	0,8838
96	850	1,35	800	0,8519
97	860	1,36	800	0,8595

ПРИЛОЖЕНИЕ А2 - Фактические значения момента на вращение холостого опорного валка

№	с, б/р	Моп, кН м
1	0,9172	628,3324
2	0,9215	697,1848
3	0,8742	727,7715
4	0,865	915,8551
5	0,8835	881,7339
6	0,9121	558,1026
7	0,8913	452,3936
8	0,8685	654,4673
9	0,9205	765,0901
10	0,8623	787,6572
11	0,8555	992,6538
12	0,8756	956,5111
13	0,8903	595,608
14	0,8458	468,84
15	0,8691	714,4576
16	0,9098	824,0604
17	0,8566	851,7816
18	0,8785	1108,533
19	0,8595	1020,065
20	0,8072	586,1132
21	0,8606	517,2765
22	0,8229	732,8513
23	0,7863	770,8508
24	0,8382	901,3269
25	0,7919	1079,657
26	0,7835	1003,834
27	0,8588	672,6259
28	0,815	527,9688
29	0,7762	744,4356
30	0,767	809,142
31	0,7507	867,9969
32	0,8132	1191,26
33	0,7486	1029,791
34	0,7867	661,0841
35	0,7396	513,6995
36	0,7673	788,4641
37	0,8035	907,5822
38	0,7681	950,2837

39	0,8124	1272,569
40	0,7975	1172,348
41	0,9367	534,9447
42	0,9537	452,2193
43	0,8722	614,5765
44	0,9427	733,315
45	0,9193	786,5761
46	0,9104	990,3331
47	0,8604	881,8876
48	0,9342	586,8686
49	0,8528	444,2431
50	0,8363	646,5715
51	0,8826	752,3988
52	0,8663	811,3441
53	0,8447	1004,625
54	0,8321	931,4357
55	0,8643	592,3169
56	0,8815	500,4033
57	0,8775	738,5382
58	0,83	769,4698
59	0,856	870,98
60	0,8513	1098,906
61	0,8295	1006,835
62	0,8162	605,9661
63	0,7887	484,5946
64	0,8546	777,8095
65	0,8369	838,2926
66	0,7652	840,5244
67	0,8371	1165,565
68	0,8462	1106,991
69	0,81	647,6217
70	0,7702	509,2343
71	0,813	795,6425
72	0,7965	857,2379
73	0,7791	918,8511
74	0,7811	1166,895
75	0,761	1067,376
76	0,7764	665,0972
77	0,7542	533,914
78	0,8009	838,6668
79	0,761	875,7953
80	0,8004	1008,754
81	0,9055	919,336

82	0,9562	915,6012
83	0,9403	552,3435
84	0,9392	457,8886
85	0,9355	677,49
86	0,9467	756,6026
87	0,9111	800,6291
88	0,8623	963,0235
89	0,8621	906,8835
90	0,8828	568,9836
91	0,8353	446,2841
92	0,8925	707,4906
93	0,9068	792,3546
94	0,8252	791,9341
95	0,8838	1076,765
96	0,8519	976,5777
97	0,8595	603,0518

ПРИЛОЖЕНИЕ А3 - Акт внедрения результатов работы

УТВЕРЖДАЮ
Директор по техническому развитию и качеству
_____ П.А. Мишнев
«___» _____ 2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов работ

«Разработка модели взаимосвязанных технологических, температурно-деформационных и энергосиловых параметров широкополосного стана горячей прокатки с целью разработки наиболее энергоэффективного способа получения готового проката»

Краткое описание выполненной работы:

- разработана методика оптимизации параметров горячей прокатки на стане «2000» по критерию «минимум энергозатрат» и ее программная реализация, внедренная в АСУ стана 2000
- рассчитаны и испытаны на стане «2000» оптимизированные режимы прокатки, подтверждена их эффективность.

Решения, получившие правовую охрану: нет.

Срок начала фактического внедрения: июнь 2019 г.

Начальник УНПиТ Р.Р. Адигамов

Старший менеджер УНПиТ А.А. Попова

Руководитель проекта от Заказчика – Старший менеджер УНПиТ А.В. Митрофанов

ПРИЛОЖЕНИЕ А4 - Заключение по результатам НИОКР

Заключение по результатам НИОКР

Наименование работы: «Разработка модели взаимосвязанных технологических, температурно-деформационных и энергосиловых параметров широкополосного стана горячей прокатки с целью разработки наиболее энергоэффективного способа получения готового проката»

Получен результат: положительный.

Сумма ожидаемой экономической выгоды (дохода): фактический эффект может быть получен, начиная с 3 квартала 2019 г., за счет снижения удельного расхода электроэнергии

Срок, предполагаемый для внедрения: июнь 2019 г.

Дата составления: 26.04.2019 г.

Начальник УНПиТ	Р.Р. Адигамов
Старший менеджер УНПиТ	А.А. Попова
Руководитель проекта от Заказчика – Старший менеджер УНПиТ	А.В. Митрофанов