На правах рукописи

МИТРОФАНОВ Артем Викторович

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОКРАТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Специальность 2.6.4. – Обработка металлов давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Липецк – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет»

Научный руководитель:	**Шалаевский Дмитрий Леонидович** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлургии, машиностроения и технологического оборудования ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет»
Официальные оппоненты:	**Шаталов Роман Львович** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»
	Мунтин Александр Вадимович кандидат технических наук, директор Инженерно-технологического центра АО «Выксунский металлургический завод»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

Защита диссертации состоится 28 апреля 2026 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.323.01 на базе ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» и на сайте *www.stu.lipetsk.ru*.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью организации, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: *398055, г. Липецк, ул. Московская, 30, Диссертационный совет 24.2.323.01*. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: d212.108.03@stu.lipetsk.ru.

Автореферат разослан «16» марта 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.323.01,
д-р техн. наук, доцент И.А. Седых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 них 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.

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 включала 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.

Достоверность результатов работы. Достоверность научных результатов обеспечена корректным использованием математических методов, включая метод конечных элементов (МКЭ) и статистические, 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 практически не отличается от предварительного прогноза по модели.

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 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 81 наименования. Работа содержит 118 страниц машинописного текста, 26 рисунков, 39 таблиц и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертации. При обосновании актуальности темы на примере непрерывной чистовой группы клетей стана 2000 показано, что существуют резервы экономии энергии, расходуемой на привод рабочих валков.

В первой главе проведен критический анализ отечественных и зарубежных научных работ, посвященных энергосиловым расчетам и снижению энергозатрат процесса непрерывной горячей прокатки.

Установлено, что существующие методы обладают рядом существенных ограничений, главным из которых является отсутствие адекватного учета динамики процессов деформационного упрочнения и разупрочнения (возврата и рекристаллизации) в межклетевых паузах чистовой группы стана. Это не позволяет с достаточной точностью прогнозировать сопротивление деформации и оптимально распределять обжатия для минимизации энергопотребления.

На основе предварительных промышленных данных для стана 2000 показана принципиальная возможность снижения энергозатрат на 3–4 % за счет перераспределения обжатий.

Наиболее точным из рассмотренных методов энергосилового расчета признан метод А. Гарбера и И.А. Кожевниковой, однако выявлена необходимость уточнения в ней потерь мощности на привод опорных валков в 4х-валковых системах.

Сделан вывод о необходимости разработки нового оптимизационного алгоритма, интегрирующего уточненную энергосиловую модель с моделью структурных превращений в металле.

Во второй главе показано, что существенная разница между мощностью прокатки и мощностью, необходимой для привода рабочего валка в 4х-валковой системе, связана с затратами на вращение холостого опорного валка.

Для этого с помощью программного пакета конечно-элементного анализа рассчитаны моменты, необходимые для приведения во вращение рабочих валков двух типов клетей (имитация прокатки углеродистой стали обычного качества типа S235JR в клети, аналогичной чистовой группе клетей непрерывного широкополосного стана (НШПС) 2000). Моделирование проводилось отдельно для 4х-валковой системы и 2х-валковой системы. Результаты представлены в таблице 1.

Моделируемые условия: толщина полосы на входе – 40 мм, 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 между рабочим валком и полосой, между опорным и рабочим валками – 0,45.

Напряжение течения металла в зависимости от эффективной деформации задавалось с помощью кривой, рассчитанной в программе JmatPro для стали S235JR при температуре 1000 ^{0}C и скорости деформации 1с$^{-1}$ (рисунок 1).

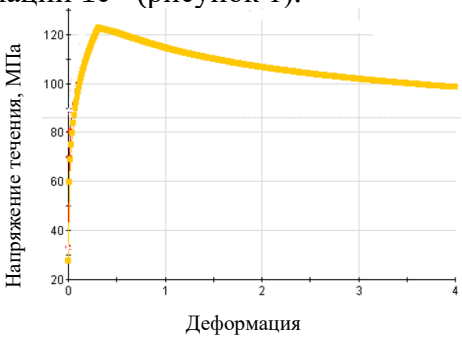

Рисунок 1 – Кривая течения металла стали типа S235JR при температуре 1000 ^{0}C

Таблица 1 – Результат моделирования прокатки в клетях 4х-валковой системы и 2х-валковой системы

Параметр	2-х валковая система	4-х 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 4-х валковой системы, затрачиваемый на вращение опорного валка, по результатам моделирования оказался на 33 % больше, чем в 2-х валковой при практически равных значениях контактного давления и усилия прокатки.

Основные составляющие дополнительных потерь в 4-х валковой системе по результатам моделирования (Таблица 2):

– трение в подшипниках опорного валка (основная доля): до 20–25 %,
– трение качения между рабочим и опорным валком: 10–15 %.

Таблица 2 – Результат расчета вклада дополнительных потерь в 4-х валковой системе

Параметр	2х валковая система	4х валковая система
Момент на валу двигателей главного 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 результатов компьютерного моделирования была выполнена прокатка свинцовой пластины в клети лабораторного стана. Порядок и результаты опытной прокатки были следующими:

- деформированию подвергался свинцовый образец прямоугольного сечения толщиной 5 мм и шириной 40 мм, обжатие за проход составило 1 мм;
- привод валков осуществлялся 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 2х-валковой системы). 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 4х-валковой системы). 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.

На основе результатов моделирования и эксперимента было установлено, что затраты на вращение опорного валка, которые изменяются в зависимости от жёсткости прокатываемой полосы, можно учесть с помощью уточненного значения коэффициента плеча трения качения.

С использованием существующей базы режимов прокатки в чистовой группе стана 2000 ПАО «Северсталь» был сформирован набор исходных данных, с помощью которых определили достоверное уравнение для расчета трения качения в межвалковом контакте, это уравнение имеет вид:

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

где $p_б$ и $\omega_б$ – базисные значения контактного напряжения (МПа) и относительной угловой скорости ($с^{-1}$) соответственно, принятые равными их минимальным расчетным величинам по всей совокупности промышленных режимов прокатки: $p_б$ = 100 МПа, $\omega_б$ = 1 $с^{-1}$.
Уравнение было получено для условий горячей прокатки полос из трубных марок сталей в чистовой непрерывной группе клетей.

Достоверность уравнения подтверждена коэффициентом множественной детерминации R^2 = 0,838. При сравнении фактических значений мощности привода рабочих валков с результатами расчета средняя погрешность составила 4,3 %, максимальная погрешность – 10 %, при этом 85% от всех рассчитанных режимов имели погрешность до 8 %.

В третьей главе проведена оценка существующих резервов экономии энергопотребления для двигателей главных приводов чистовой группы клетей ШПСГП 2000. Показано, что максимальная экономия (до 10-15 %) будет ожидаться при оптимизации режимов прокатки полос толщиной от 1,2 до 6,0 мм (рисунок 2).

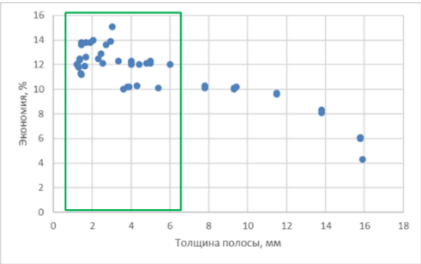

Рисунок 2 – Зависимость потенциальной экономии энергопотребления в чистовой группе клетей от толщины готового проката (разница между самым энергозатратным режимом и самым энергоэффективным)

Для оценки потенциала энергосбережения проведен сравнительный анализ промышленных режимов прокатки, выявивший значительный разброс энергозатрат при производстве однотипной продукции. Так, для полос из стали 08пс сечением 2,3×1290 мм различие в энергопотреблении между наименее и наиболее затратными режимами достигло 11,5 %. Анализ показал, что основной вклад в это различие внесло различное распределение обжатий по клетям чистовой группы. Характерной особенностью наиболее затратных режимов была экстремальная загрузка первой клети при разгрузке последующих и фиксированном обжатии в конечной клети.

Системный характер выявленной зависимости подтвержден на примере прокатки полос из стали 09Г2С толщиной 4 мм. Целенаправленное перераспределение обжатий – снижение в первых и увеличение в последних клетях чистовой группы при неизменной температуре – позволило достичь экономии энергопотребления в 8,9% по сравнению с базовым режимом. Этот результат доказывает, что значительного снижения энергозатрат можно достичь исключительно за счет рационального перераспределения деформации по проходам.

В результате был проанализирован весь сортамент стана на предмет профилеразмеров полос, потенциальный эффект от оптимизации на которых будет максимальным. Для этого варьировались все рассмотренные выше технологические факторы и установлено, что величина эффекта снижения затрат энергии зависит от конечной толщины проката, а, следовательно, от суммарного обжатия. Экономия повышается с уменьшением толщины проката. Такую закономерность можно объяснить тем, что с уменьшением толщины проката возрастает суммарное обжатие, следовательно, увеличивается количество вариантов перераспределения обжатий между клетями.

Целесообразность перераспределения 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).

Известно, что при прокатке 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. Затраты энергии на деформацию проката в каждой клети напрямую зависят от уровня упрочнения (остаточной деформации) перед входом в нее, так как дислокационная плотность напрямую влияет на сопротивление деформации.

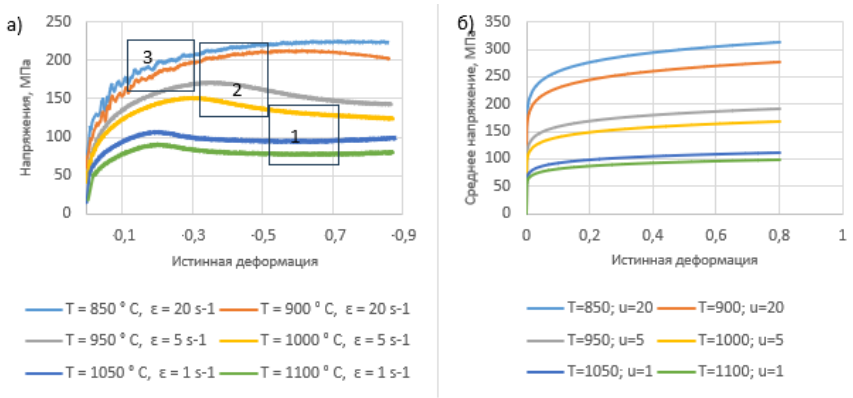

Рисунок 3 – (а) кривые пластического течения стали S235JR с отмеченными областями (1) – начальной стадии чистовой прокатки (2) – прокатки в 7-11 клетях (3) – конца чистовой прокатки (б) кривые среднего напряжения течения для стали S235 при различных температурах и скоростях деформации

С целью уточнения степени влияния описанного механизма, на примере проката из стали S235JR, на установке Gleeble 3800 построены кривые в координатах: деформация – напряжение, которые позволяют учесть процессы упрочнения (увеличение прочности материала при деформации) и разупрочнения (снижение прочности при нагреве или длительной деформации) в стали, зависящие от температуры, скорости и степени деформации.

Из представленных на Рисунке 3 кривых видно, 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 напряжение оказывает температура, при которой происходит деформация (Рисунок 3, обл. 1). Другая ситуация возникает в деформационно-скоростном интервале прокатки в 7–11 клетях. Уровень деформации находится в области пикового напряжения, которое соответствует величине максимального упрочнения, и незначительное увеличение деформации в данной области приводит к релаксации напряжений, обусловленной динамической рекристаллизацией и, как следствие, к более разупрочненной структуре пред следующей деформацией (Рисунок 3, обл. 2). В интервале конца прокатки любое увеличение истиной деформации сопровождается пропорциональным увеличением истинных напряжений (Рисунок 3, обл. 3).

Для анализа необходимого усилия прокатки с учетом описанных механизмов, графики перестроили (Рисунок 4, б), использовав среднее сопротивление деформации σ_{sm}, рассчитанное по формуле:

$$\sigma_{sm} = \frac{\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma_s d\varepsilon}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \qquad (2)$$

где σ_S – переменное значение сопротивления деформации в зависимости величины деформации, ε_1 и ε_2 – наименьшее и наибольшее значение деформации, в пределах которой происходит усреднение сопротивление деформации.

Далее, полученные кривые (Рисунок. 4, 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:

$$\sigma = 1419\ \varepsilon^{0,1851}\ u^{0,0899}\ e^{-0,0024T}, \qquad (3)$$

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

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

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

В четвертой главе изложен алгоритм оптимизации режимов прокатки для минимизации затрат энергии на ведение процесса горячей прокатки.

Для определения способов снижения энергопотребления было исследовано влияние следующих факторов технологии: частные обжатия, натяжения и температуры стальной полосы в рабочих клетях непрерывной группы ШПСГП.

Рассмотрено, как факторы технологии статистически влияют на уровень энергозатрат при прокатке полосы из стали марки 08пс.

Рисунок 4 демонстрирует следующее:

- повышение температуры полосы перед чистовой группой клетей снижает требуемую мощность, зависимость очень слабая – R^2 линии тренда равен 0,04;

- изменение натяжений в последнем межклетевом промежутке также не выявил существенного влияния последнего на требуемую мощность, корреляция очень слабая, R^2 менее 0,013;

- наибольшее влияние из рассматриваемых факторов показало обжатие в первой клети – R^2 равен 0,16, происходит снижение требуемой мощности при увеличении степени обжатия; обжатие в предпоследней клети чистовой группы оказывают незначительное влияние, причем зависимость обратная – с увеличением обжатия требуемая мощность растет.

Анализ параметров прокатки с целью поиска значимой регрессионной зависимости показал слабую связь между величиной экономии мощности и обжатиями для эффективного управления энергозатратами. Вместе с тем, было установлено, что наиболее значимым фактором являются частные обжатия в клетях и путем их перераспределения можно добиться значимого снижения энергозатрат.

Для проверки последнего утверждения был проведен эксперимент, в рамках которого произвели прокатку полосы из стали 08пс 2,3х1290 мм по двум разным режимам. В обоих режимах задавалась постоянная температура входа в первую клеть чистовой группы. В первом режиме использовались базовые обжатия, а во втором режиме были перераспределены обжатия на первые клети. В опытном режиме экономия по сравнению со стандартным вариантом составила 3,5 % при ожидаемых 10,0-11,5 %. Полученное расхождение между экспериментальными данными и ожидаемыми результатами потребовало более глубокого анализа физических процессов, протекающих в металле в ходе горячей прокатки.

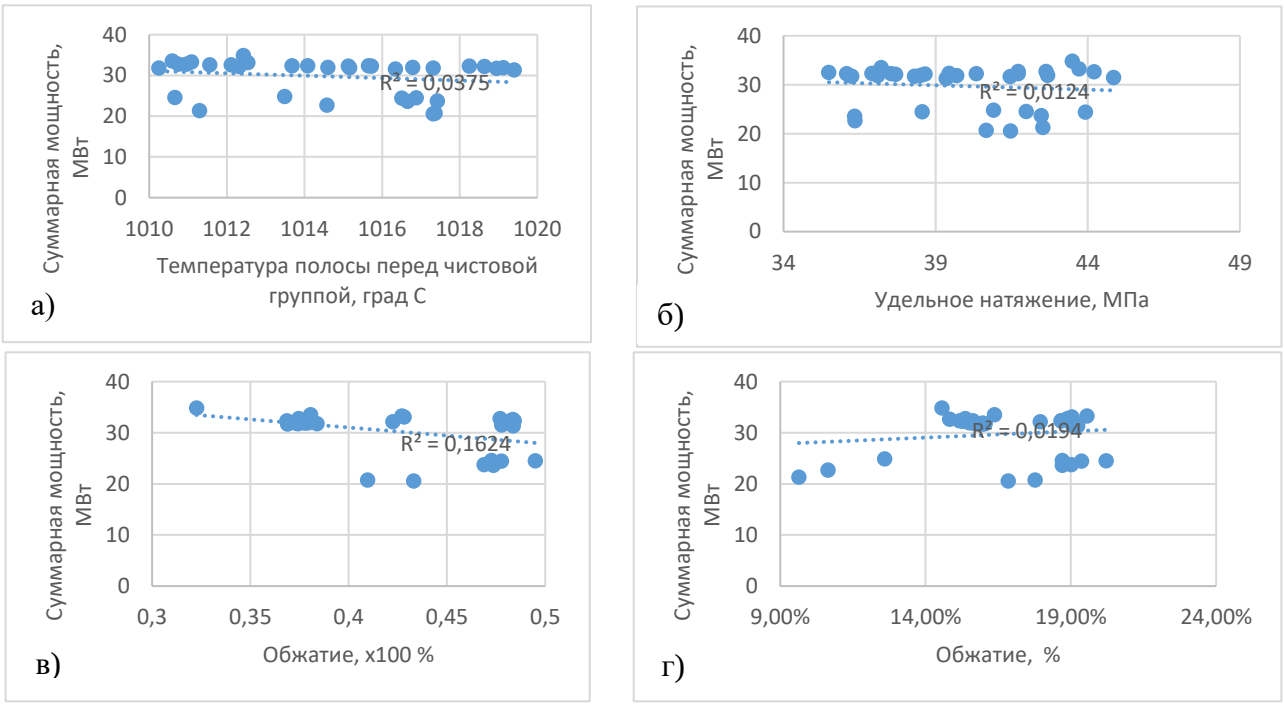

Рисунок 4 – Влияние параметров прокатки на требуемую мощность двигателей главного привода клетей: а) влияние температуры полосы перед чистовой группой клетей; б) влияние переднего удельного натяжения полосы; в) влияние обжатия в первой клети чистовой группы; г) влияние обжатия в предпоследней клети чистовой группы

Для уменьшения возможного количества вариантов режимов прокатки, для которых необходимо рассчитать расход мощности, чтобы определить наименее энергозатратный режим прокатки в непрерывной группе клетей ШПСГП целесообразно использовать один из методов оптимизации процессов, например, метод симплексов. Метод симплексов в данном случае позволяет проводить оптимизацию в многомерном пространстве

(использовать вариации по изменению частных обжатий в чистовой группе клетей), перераспределяя обжатия от первой клети к последней, и находить такое их сочетание, которое дает наименьшую расчетную величину суммарной требуемой мощности главных двигателей приводов клетей при наименьшем количестве вариантов распределения этих обжатий.

Суть алгоритма состоит в следующем. На первом шаге, на основе исходного режима прокатки, формируется группа так называемых «опорных» режимов, количество которых равно числу клетей, участвующих в распределении обжатий. Для всех «опорных» режимов рассчитывается суммарная мощность главных приводов рабочих клетей. Результаты расчетов сравниваются, режим с наибольшей суммарной мощностью заменяется на новый, в котором распределение обжатий обеспечивает 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. Созданный алгоритм послужил основой при создании программы для ЭВМ.

Расчеты, проведенные с использованием разработанного алгоритма, демонстрируют необходимость увеличения частных обжатий не только в 1-й, а и во 2-й, 3-й и предпоследних клетях ШПСГП при производстве некоторых групп сортамента для достижения максимального эффекта снижения потребляемой мощности.

Разработанный алгоритм оптимизации на основе метода симплексов, включающий уточненную методику расчета коэффициента плеча трения качения и реологическое уравнение (3), обеспечивает прогнозирование снижения энергопотребления при оптимизации режимов прокатки с точностью более 95 %, подтвержденное промышленными испытаниями.

В пятой главе на примере действующего ШПСГП (стан 2000 ПАО «Северсталь») изложены результаты усовершенствования технологии горячей прокатки, полученные с использованием результатов работы.

Серия промышленных испытаний была выполнена при прокатке полосы из стали S235JR с размерами сечения 3х1200 мм. Оптимизация технологии проводилась с использованием алгоритма (программы для ЭВМ), описанной в Главе 4, прогноз требуемой мощности – с использованием полученных формул (1) и (3).

Серия промышленных испытаний включала прокатку 13 рулонов: 6 рулонов с использованием базовой технологии, 7 с использованием оптимизированной технологии. Средние параметры базовых и оптимизированных вариантов распределений обжатий представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – 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

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

Таблица 4 – 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

Примечание: 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 автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии установлено, что фактическое снижение энергопотребления при прокатке опытных партий по оптимизированной технологии составило 6,5%, что практически совпало с прогнозом экономии энергии (6,6 %). Кроме того, было установлено, что оптимизированные режимы прокатки не приводят к изменению микроструктуры и механических свойств готового проката (таблица 5).

Таблица 5 – Микроструктура и свойства проката S235JR, произведенных по стандартным и оптимизированным режимам

Режим прокатки	Тип микроструктуры (среднее соотношение фаз)	Средний диаметр зерна феррита, мкм	Среднее значение предела текучести, МПа	Среднее значение временного сопротивления разрыву, МПа
базовый	Феррит 98,1 %, перлит 1,9 %	6,9	335	395
оптимизированный	Феррит 97,3 %, перлит 2,7 %	7.2	336	392

На основе изложенных принципов оптимизации были разработаны и опробованы 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 апробации режимов были выплавлены и прокатаны опытные партии рулонного проката толщиной 8 мм.

Таблица 6 содержит температурно-деформационные параметры базового и оптимизированного режимов прокатки и характеристики микроструктуры полосы 08ХНД толщиной 8 мм.

Таблица 6 – Температурно-деформационные параметры базового и оптимизированного режимов прокатки полосы из стали 08ХНД

Режим	Тнчп ^{0}C	Ткп, ^{0}C	h перед клетью №6, мм	h перед клетью №7, мм	h перед клетью №8, мм	h перед клетью №9, мм	h перед клетью №10, мм	h перед клетью №11, мм	h перед клетью №12, мм
Базовый	990-1000	870-880	46,26	31,02	20,27	14,86	11,91	10,0	8,55
Оптим.	990-1000	870-880	46,30	26,53	18,52	13,97	11,42	9,74	8,55

Таблица 7 – Микроструктура проката 08ХНД, произведенного по базовому режиму

Режим	Тип микроструктуры	Средний диаметр зерна феррита, мкм	Средняя объемная доля феррита, %	Средняя объемная доля перлита, %	Средняя объемная доля бейнита, %
Базовый	Феррит, перлит	5,3	99	1	-
Оптим.	Феррит, перлит	5,5	99	1	-

Экономия от изменения схемы обжатий составила 9,2 %. Для получения целевой микроструктуры были заданы следующие ограничения: величина единичного относительного обжатия в первом проходе – не менее 30 %, в последнем – не более 10 %.

Таким образом, было продемонстрировано, что даже при наличии ограничений технологических условий проведения чистовой прокатки возможная корректировка обжатий в клетях 7–11 способствует экономии энергии. В таблице 7 приведена микроструктура проката, полученная при использовании оптимизированных технологических параметров производства. Из данных таблицы сделан 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.) для хорошей формуемости проката. Это может быть обеспечено получением равномерной феррито-перлитной структуры с содержанием феррита 40-70%.

В таблицах 8 и 9 приведены базовый и оптимизированный режим прокатки полосы Кс толщиной 8 мм и микроструктура проката, произведенного по данным режимам.

Таблица 8 – Технологические параметры производства проката стали Кс

Режим	Температура начала чистовой прокатки, ^{0}C	Температура конца чистовой прокатки, ^{0}C	h перед клетью №6, мм	h перед клетью №7, мм	h перед клетью №8, мм	h перед клетью №9, мм	h перед клетью №10, мм	h перед клетью №11, мм	h перед клетью №12, мм
Базовый	1030-1040	885-895	40,21	30,05	22,49	17,36	14,15	11,03	9,01
Оптим.	1030-1040	885-895	40,30	32,24	25,38	20,41	15,08	13,12	10,07

Таблица 9 – Микроструктура проката Кс, произведенного по базовому режиму

Режим	Тип микроструктуры	Средний диаметр зерна феррита, мкм	Средняя объемная доля феррита, %	Средняя объемная доля перлита, %	Средняя объемная доля бейнита, %
Базовый	Феррит, перлит	6,1	62,7	37,3	-
Оптим.	Феррит, перлит	6,5	63,0	37,0	-

Расчетная оптимизация технологии также показала целесообразность переноса обжатий с первых клетей чистовой группы, на 9 и 11 клети (таблица 10). Для совмещения энергоэффективного режима с целевой микроструктурой предложено поддерживать температуру конца прокатки в диапазоне T_{nr}+20°C÷A_{r3}+50°C, где T_{nr} - температура остановки рекристаллизации.

Серия опытных прокаток подтвердила, что разработанная технология обеспечивает экономию энергии в 6,5 % и позволяет получать прокат с целевой микроструктурой. Данное решение защищено патентом РФ № 2689348.

Практическая значимость работы подтверждается результатами опробования на стане 2000 ПАО «Северсталь»: разработанный алгоритм оптимизации обеспечивает снижение расхода электроэнергии на 3,0–10,0 % при сохранении качества проката. Технические решения внедрены в производство и защищены патентами.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

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.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Mitrofanov A.V.** Study of the Influence of Hot Continuous Rolling Parameters on the Amount of Power Consumption for the Technological Process. Steel Transl. 55, 776–779 (2025) (перевод).
   Митрофанов А.В. Исследование влияния параметров горячей непрерывной прокатки на величину затрат мощности для ведения технологического процесса. //Прокатное

производство. Приложение к журналу «Технология металлов». – 2024. – № 22. – С. 35-39

2. **Mitrofanov A.V**, Shalaevskii D.L, Sokolov S.F., Sokolov D.F. Developing Energy Efficient Modes of Hot Rolling of Broad Strips with Strain Hardening. Steel Transl. 50, №8 567–569 (2020) (перевод).
   Митрофанов А.В., Шалаевский Д.Л., Соколов С.Ф., Соколов Д.Ф. Разработка энергоэффективных режимов горячей прокатки широких полос с учетом деформационного упрочнения. – Сталь. – 2020. – № 8. – С. 31-33.
3. Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., **Митрофанов А.В.**, Мишнев П.А., Огольцов А.А. Разработка и промышленные исследования энергоэффективных режимов горячей прокатки широких стальных полос. – Черная металлургия. – 2016. – №5. – С.38-43.

Патенты на изобретения:

4. **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. Способ производства низколегированных рулонных полос с повышенной коррозионной стойкостью. МПК C21D 9/46
5. Барабошкин К.А., **Митрофанов А.В.**, Вархалева Т.С. / Патент РФ 2689348. Способ производства горячекатаного проката повышенной прочности. МПК C21D 9/46
6. **Митрофанов А.В.**, Барабошкин К.А., Киселев Д.А., Мезин Ф.И., Кузнецов Д.В., Тихонов С.М., Серов Г.В., Сидорова Е.П., Комиссаров А.А., Матросов М.Ю. Патент RU 2679375 Способ производства низкоуглеродистой стали с повышенной коррозионной стойкостью. МПК C21D 9/46
7. **Mitrofanov A.V.**, Baraboshkin K.A, Tikhonov S.M, Sidorova E.P. et. WO 2019/117756 A1 Method of manufacturing low-alloyed coiled strip of higher corrosion resistance.

Прочие публикации:

8. Шалаевский Д.Л., **Митрофанов А.В.**, Корепина К.П. Повышение плоскостности готовых стальных полос на энергосберегающих режимах непрерывной горячей прокатки. – Сталь. – 2022. – №2. – С. 15-17.
9. Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., **Митрофанов А.В.** Оптимизация технологического режима широкополосного стана горячей прокатки по критерию «минимум расхода энергии». – Механическое оборудование металлургических заводов. – 2016. – № 1 (6). – С. 3-9.
10. **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.
11. 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
12. **Митрофанов А.В.**, Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л. Оптимизация параметров технологии горячей прокатки на ШПСГП по критерию «минимум расхода энергии». – Материалы IV Международной научной конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2019». – С. 147-152
13. Ogoltcov A., **Mitrofanov A.** Hot rolling coil technology development for pipes intended for extraction and transportation of petroleum products. "AISTech 2021 – Proceedings of the Iron and Steel Technology Conference" Vol. 2021 – June. 2021
14. Родионова И.Г., **Митрофанов А.В.**, Тихонов С.М., Сидорова Е.П., Комиссаров А.А., Кузнецов Д.В., Барабошкин К.А., Киселев Д.А. «Северкор» - современный прокат для нефтепромысловых трубопроводов. – Инженерная практика. – 2017. – №12. – С. 38-44.