

На правах рукописи



ДЁМА РОМАН РАФАЭЛЕВИЧ

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СМАЗЫВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ
ВАЛКОВ ЛИСТОВЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Магнитогорск – 2021

Работа выполнена на кафедре «Машины и технологии обработки давлением и машиностроение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный консультант

ПЛАТОВ Сергей Иосифович,
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

АРТЮХ Виктор Геннадиевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
политехнический университета Петра Великого»,
г. Санкт-Петербург.

ГОРБАТЮК Сергей Михайлович,
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»»,
г. Москва.

ШАТАЛОВ Роман Львович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»,
г. Москва.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Защита состоится «24» июня 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.111.03 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Терентьев Дмитрий Вячеславович

Актуальность работы. Российская Федерация является одним из крупнейших мировых производителей листового проката, а также одним из ведущих экспортеров листового горячекатаного проката (ЛГП). Объем выпуска ЛГП в РФ измеряется десятками миллионов тонн, а области применения данного вида металлопроката достаточно обширны и универсальны: от изготовления металлоконструкций для массового производства до уникальных изделий, например, магистральных трубопроводов, изделий судо- и мостостроения, автомобилестроения и т.д. Существенный объем ЛГП производится на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки (НШСГП).

Металлургическим предприятиям в нашей стране, выпускающим ЛГП (ПАО «ММК», ПАО «Северсталь», ПАО «НЛМК» и др.), для успешного конкурентирования на внешнем и внутреннем рынках металлопроката необходимо постоянно решать вопросы, связанные с получением продукции заданного уровня свойств (соответствующие геометрические и прочностные показатели качества) с одновременным снижением её себестоимости.

Современные экономические условия диктуют необходимость проведения исследований, направленных на снижение потребляемых ресурсов при производстве ЛГП, в частности, снижение энергетических затрат и повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков. Для этого металлургическим предприятиям необходимо осваивать и внедрять новые технологии, что всегда связано с необходимостью модернизации или замены действующего оборудования.

На металлургических предприятиях одно из направлений снижения уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛГП с заданными свойствами возможно за счет совершенствования оборудования, разработки и внедрения новых технологических режимов смазывания и охлаждения валков и полосы, в том числе на НШСГП.

Для снижения уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛГП необходимо реализовать технические решения по совершенствованию оборудования, разработать и внедрить технологию эффективного воздействия на процессы смазывания и охлаждения валков и полосы. Под термином «**эффективное воздействие**» понимаются следующие технологические режимы: объемы подаваемого на поверхность валков смазочного материала (СМ) и охладителя для каждой из прокатных клетей в зависимости от температурно-скоростных режимов прокатки приводящее к снижению энергосиловых и фрикционных параметров, а также повышению эксплуатационной стойкости рабочих валков. Эффективность воздействия (\mathcal{E}_i) на процессы системы «опорный валок-рабочий валок» оценивались по предложенным в работе показателям, при соблюдении условий: $\mathcal{E}_i \geq 1$ и $\mathcal{E}_i \rightarrow \max$.

Технологические режимы возможно рассчитать по результатам математического моделирования. Разработанные подходы и алгоритмы позволят производить настройку (адаптацию) режимов смазывания и охлаждения в зависимости от параметров прокатки в рамках монтажных партий, а также реализовать новые технические решения по совершенствованию оборудования.

В настоящее время вопросы смазывания и охлаждения валков при производстве ЛГП изучены недостаточно глубоко. Для практической реализации исследуемых процессов существует необходимость в теоретическом и экспериментальном обосновании новых решений, направленных на совершенствование технологии и оборудования для смазывания и охлаждения валков листовых станов горячей прокатки.

Степень разработанности темы исследования. Известен ряд исследований, посвященных тематике диссертации. Большой вклад в развитие теории и технологии производства ЛГП внесли: Целиков А.И., Третьяков Е.М., Третьяков А.В., Королев А.А., Полухин П.И., Железнов Ю.Д., Полухин В.П., Коновалов Ю.В., Рокотян С.Е., Хлопонин В.Н., Гелей Ш., Мураками С., Дженкинс В.Г., Шичков А.Н., Белянский А.Д., Макарова Е.В., Белосевич В.К., Василев Я.Д., Коцарь С.Л., Мазур В.Л., Заверюха В.Н., Мелешко В.И., Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Мазур И.П., Мухин Ю.А., Бельский С.М., Салганик В.М., Песин А.М., Румянцев М.И., Денисов С.В., Зиновьев А.В., Шаталов Р.Л., Генкин А.Л., Колбасников Н.Г., Горбатьюк С.М., Колесников А.Г., Артюх В.Г., а также другие российские и зарубежные ученые. Имеющийся опыт является хорошей базой для развития теории, разработки и внедрения эффективных процессов, направленных на снижение уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛГП.

Поддача СМ на поверхность валков в технологии производства ЛГП позволяет достичь снижения уровня потребляемых ресурсов, в частности, снижения энергосиловых и фрикционных параметров процесса прокатки и повышения эксплуатационной стойкости рабочих валков. Тем не менее, несмотря на достаточно большой опыт применения СМ, вопрос является не до конца изученным.

Производство ЛГП с заданными свойствами невозможно без строгого соблюдения заданных параметров процесса, в частности, теплового режима работы прокатных валков, для обеспечения которого прокатные станы оснащены системами охлаждения валков и полосы.

Современные требования к системам охлаждения валков и полосы диктуют ряд условий, направленных на обеспечение эффективного отвода выделяемой теплоты. Существующие требования по контролю температуры валков и полосы, в зависимости от технологических параметров процесса, не всегда выполняются с требуемой точностью, а вопросы управления тепловым состоянием прокатных валков, направленные на обеспечение их эксплуатационной стойкости, являются недостаточно изученными.

Диссертационные исследования направлены на решение поставленных проблем. Изложенные в работе результаты позволяют достичь снижения потребления ресурсов при производстве ЛГП за счет совершенствования оборудования, разработки и внедрения новых технологических режимов смазывания и охлаждения валков и полосы.

Диссертационные исследования проводились:

- при поддержке Правительства Челябинской области в виде стипендий и грантов для студентов, аспирантов и молодых ученых в 2009–2020 гг.;
- в рамках проекта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (56-я очередь – мероприятие 1.4);
- в рамках научно-исследовательских и хозяйственных работ между ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» и ПАО «ММК» (5 завершенных работ);
- при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, в рамках государственного задания по проекту № 11.2054.2017/ПЧ;
- при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, в рамках государственного задания по проекту № FZRU-2020-0011.

Объект исследования. Процессы функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса», направленные на снижение энергосиловых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также повышению эксплуатационной стойкости рабочих валков при производстве ЛГП.

Предмет исследования. Режимы смазывания и охлаждения рабочих валков и полосы листовых станов горячей прокатки.

Цель работы. Снижение энергосиловых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков за счет развития методологии комплексного совершенствования технологии и оборудования для смазывания и охлаждения валков листовых станов горячей прокатки, рисунок 1.

Поставленная цель может быть достигнута путём последовательного решения следующих **научно-технологических задач.**

1. Создание аналитических зависимостей, описывающих влияние смазочного материала на снижение энергосиловых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также повышение эксплуатационной стойкости при производстве ЛПП с использованием методов физического и математического моделирования в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса» для четырехвалковых клетей листовых станов горячей прокатки.
2. Разработка и реализация математической модели изнашивания бочек рабочих валков листовых станов горячей прокатки, учитывающей наличие смазочного материала на контакте «опорный валок – рабочий валок» и «рабочий валок – полоса», а также его объемно-расходные параметры.
3. Разработка математической модели процесса принудительного охлаждения для системы «рабочий валок – полоса» с учетом закономерностей формирования температурных условий процесса листовой горячей прокатки.
4. Разработка на основе созданных моделей научно-обоснованных методов, позволяющих формировать для четырехвалковых клетей станов горячей прокатки рекомендации по объемно-расходным параметрам подаваемого смазочного материала и охладителя.
5. Разработка методологии комплексного совершенствования оборудования и технологий эффективного смазывания и охлаждения рабочих валков и полосы с использованием разработанных математических моделей для снижения уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛПП.
6. Разработка комплекса научно обоснованных эффективных технических и технологических решений, направленных на снижение уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛПП, выраженное в сокращении энергетических затрат и повышении эксплуатационной стойкости рабочих валков.
7. Проведение промышленного апробирования предложенных новых технических и технологических решений по смазыванию и охлаждению рабочих валков и полосы в условиях действующего металлургического производства.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методология взаимодействия элементов системы «опорный валок – рабочий валок – полоса», как комплекс эффективных технических и технологических методов и средств, направленных на развитие технологии и совершенствование оборудования, что обеспечивает получение продукции заданного уровня свойств при одновременном снижении уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛПП.
2. Алгоритмы, позволяющие производить теоретический анализ полученных закономерностей, описывающих влияние смазочного материала на эксплуатационные показатели рабочих валков, которые учитывают режимы прокатки, а также теплофизические процессы в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса».

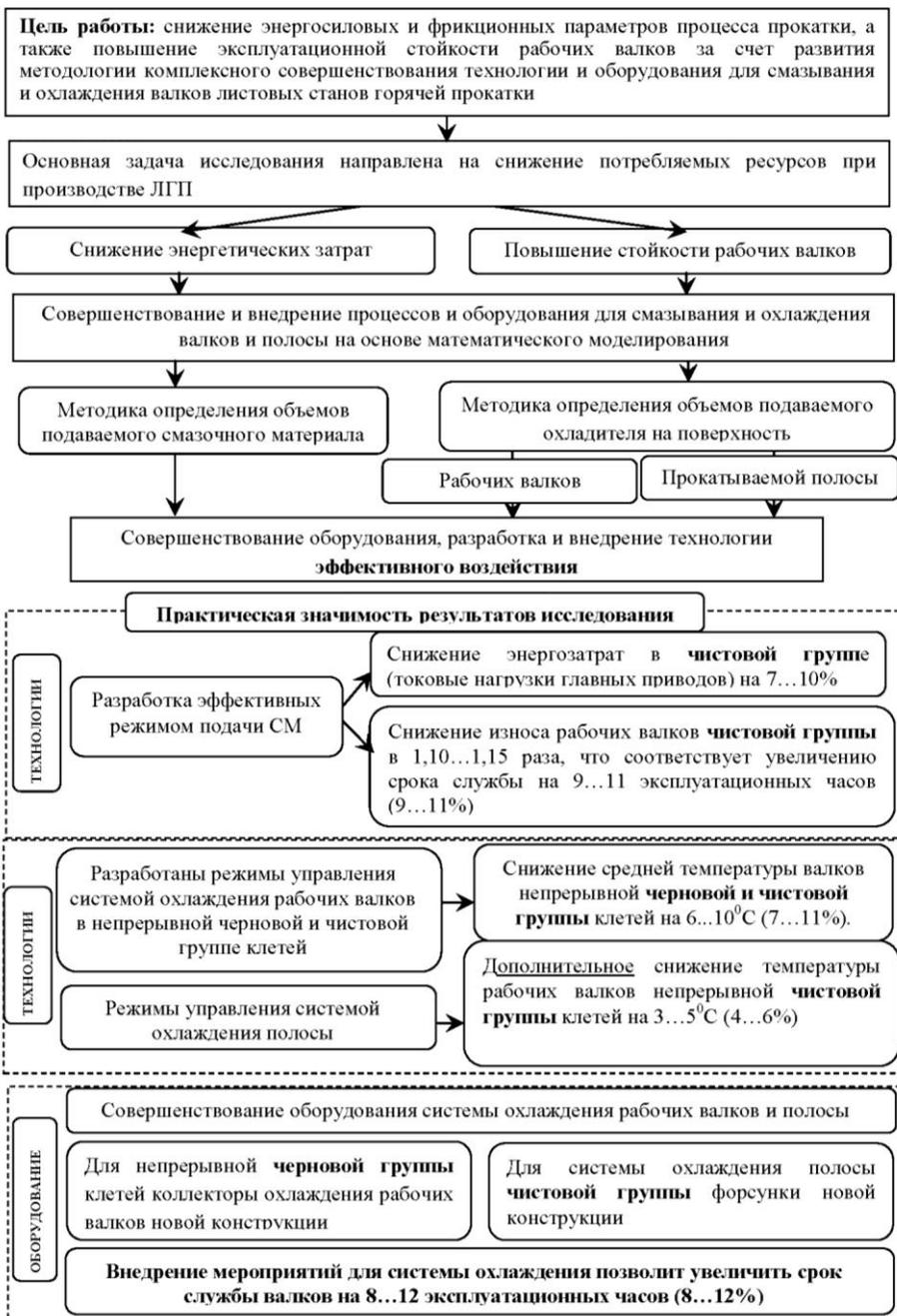


Рисунок 1. Цели, задачи и практическая значимость диссертационной работы

3. Методология комплексного совершенствования технологии и оборудования для смазывания и охлаждения рабочих валков и полосы, позволяющая на основе физического, математического и компьютерного моделирования выявлять границы её применения.

4. Обобщенные алгоритмы для выработки эффективных системных решений, позволяющие разрабатывать и внедрять инновационные ресурсосберегающие технологии производства ЛПП, направленные на повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков и снижение энергозатрат.

5. Результаты исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке и внедрению комплекса ресурсосберегающих и инновационных решений, направленных на развитие технологии и оборудования производства ЛПП.

Научная новизна и теоретическая значимость работы заключается в следующем.

1. Впервые разработан комплекс математических и физических моделей взаимодействия опорного и рабочего валков, на основании которых установлены и представлены методологические подходы, описывающие взаимосвязь элементов системы «опорный валок – рабочий валок – полоса», отличительной особенностью которых является наличие или отсутствие смазочного материала и его количество на их контакте.

2. Получена новая теоретическая зависимость толщины смазочного слоя и расхода смазочного материала на контакте «опорный валок – рабочий валок» от основных технологических параметров процесса прокатки, отличающаяся учетом изменения параметров шероховатости опорных и рабочих валков.

3. На основе комплекса экспериментальных исследований впервые получены зависимости, описывающие влияние режимов подачи смазочного материала и его объемно-расходных параметров на изменение энергосиловых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также на эксплуатационные показатели рабочих валков.

4. Для системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» разработана математическая модель процесса изнашивания рабочих валков в процессе прокатки с наличием смазочного материала и без него, учитывающая изменяющиеся режимы смазывания и охлаждения; экспериментально-аналитическим путем определены показатели интенсивности изнашивания рабочих валков при отсутствии смазочного материала и при его наличии.

5. Создана, научно и технически обоснована методология настройки и управления системой охлаждения рабочих валков и полосы, отличающаяся от известных применением последовательно реализованных и взаимосвязанных комплексных математических моделей, описывающих изменение теплового состояния валков и полосы, что позволяет определять расход и давление охладителя, расположение коллекторов и форсунок для достижения максимального теплосъема с охлаждаемых поверхностей.

6. Впервые предложена научно обоснованная классификация прокатываемых монтажных партий, отличающаяся введением коэффициента k_L , который учитывает отношение среднего веса прокатываемых монтажных партий к его суммарной длине; применение предложенной классификации позволяет корректировать используемые режимы охлаждения валков и полосы.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Разработаны новые устройства и способы, направленные на снижение энергосиловых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков при производстве ЛПП. Новизна технических решений подтверждена патентами РФ на изобретения (№ 2457913, №2666396), патентами

РФ на полезные модели (№ 110663, №152330), а также свидетельствами о регистрации государственных программ для ЭВМ (6 шт.), описывающими процессы функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса».

2. Разработан комплекс методик и алгоритмов, применение которых позволяет выдавать практические рекомендации для:

- определения режимов и объема подачи смазочного материала с учетом геометрических и прочностных характеристик прокатываемых полос;
- определения рационального местоположения коллекторов и объема подаваемого охладителя на поверхность рабочих валков;
- определения рационального местоположения коллекторов и объема подаваемого охладителя на поверхность прокатываемой полосы перед входом ее в очаг деформации.

3. На основе предложенных методик и алгоритмов разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее на этапе формирования монтажных партий (за 2...4 часа до начала процесса прокатки) в зависимости от технологических режимов прокатки рассчитывать и выдавать рекомендации по объему подаваемого смазочного материала и охладителя, в том числе в автоматическом режиме в АСУТП.

Реализация результатов работы. Разработаны новые технические и технологические решения, реализация которых позволила добиться снижения уровня потребляемых ресурсов производства ЛПП, выраженного в сокращении энергетических затрат и повышении эксплуатационной стойкости рабочих валков. Для листовых станов горячей прокатки, на примере НШСП 2000 и 2500 ПАО «ММК», внедрены практические результаты, что подтверждается соответствующими документами об испытаниях и внедрениях.

1. Разработаны режимы подачи СМ на поверхность опорных валков для четырехвалковых клетей, учитывающие геометрические и прочностные характеристики прокатываемых полос. Практическое применение предложенных режимов позволило добиться снижения энергосиловых (токовые нагрузки главных приводов) параметров на 7...10%, а также фрикционных параметров процесса (расчетное значение момента трения) на 8...13%, что позволило увеличить эксплуатационную стойкость рабочих валков в 1,10...1,15 раза, что составляет 9...11 эксплуатационных часов (9...11%).

2. Произведено совершенствование технологического оборудования системы охлаждения рабочих валков для непрерывной четырехвалковой черновой и чистовой групп клетей за счет применения нового алгоритма для определения рационального местоположения коллекторов и разработки рекомендаций по объему подаваемого охладителя. Фактический эффект от внедренных технических и технологических решений по настройке системы охлаждения рабочих валков выражается в дополнительном увеличении их срока службы на 8...12% (8...12 эксплуатационных часов), которые были достигнуты путем:

- **для черновой группы клетей:** произведены разработка и внедрение нового оборудования (коллектора охлаждения), что позволило достигнуть снижения средней температуры рабочих валков на 10...11⁰С, что составляет 13...16%;

- **для чистовой группы клетей:** произведена настройка системы охлаждения, определены рациональные параметры местоположения коллекторов и количество по-

даваемого охладителя. Внедрение результатов позволило добиться снижения средней температуры валков на $6...10^0\text{C}$, что составляет $7...11\%$;

– для **чистой группы клетей**: произведена настройка системы охлаждения поверхности полосы перед входом в очаг деформации; определены рациональные параметры геометрического местоположения коллекторов и количество подаваемого охладителя. Внедрение результатов позволило достигнуть **дополнительного** снижения температуры рабочих валков непрерывной чистой группы клетей на $3...5^0\text{C}$, что составляет $4...6\%$.

3. Предложены новые технические решения (патент РФ №110663) с целью исключения попадания охладителя в очаг деформации, а также снижения общего уровня запыленности. Внедрение новой системы обеспыливания позволило снизить абразивный износ опорных валков с $8,3 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $0,81 \cdot 10^{-5}$ кг/т и рабочих валков с $4,0 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $3,9 \cdot 10^{-5}$ кг/т соответственно.

4. Подтвержденный экономический эффект от внедрения комплекса технических и технологических решений по повышению стойкости рабочих валков на НШСП 2000 ПАО «ММК» в черновой непрерывной группе клетей составил 3,2 млн. рублей, а суммарный экономический эффект от внедренных решений составляет более 80 млн. рублей.

Методы исследований и достоверность результатов работы. Работа представляет комплексное исследование, основанное на использовании современных методов в области машин и технологий обработки давлением. Научные исследования базируются на фундаментальных законах сохранения массы, энергии, уравнениях теплопроводности, уравнениях математической физики, теории ОМД, методах корреляционного и регрессионного анализа данных и др. При решении поставленных задач использовано современное исследовательское и экспериментальное оборудование, в частности модернизированная машина трения СМЦ-2 с компьютерным управлением. Адекватность полученных экспериментальных данных оценивалась при помощи современной аттестованной аппаратуры: инфракрасные пирометры TI213EL и TI315EL, тепловизор SDS HotFind-DXT, универсальный твердомер EMCO TEST M4C/R G3, универсальная испытательная машина SHIMADZU AG-IC, комплекс физического моделирования GLEEBLE 3500, тензометрические датчики и др.

Достоверность работы основана на сопоставлении результатов теоретических исследований с лабораторными и промышленными экспериментами, а также результатами внедрения в условиях действующего производства с положительным экономическим эффектом.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на: Петербургской технической ярмарке «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции. Hi Tec» 2012-2014 гг. (с получением 1-ой золотой, 2-х серебряных медалей и Диплома за лучший исследовательский проект); Московском международном Салоне изобретений «Архимед» 2012-2014 гг. (с получением 1-ой золотой и 2-х серебряных медалей); VII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томский политехнический университет, Томск, 2013); Международном промышленном форуме «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении» (Челябинск, 2014-2016 г.); XIII Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (Старый Оскол, 2013, 2016); II Международной научно-технической конферен-

ции (Пром-Инжиниринг, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет, г. Челябинск, 2016 г.); Международном конгрессе прокатчиков (Липецк 2015 г., Магнитогорск, 2017 г.); Международных научно-технических конференциях ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» (2010-2020 гг.); Международных научно-технических конференциях «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (г. Севастополь, 2017-2020 г.); Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» (г. Санкт-Петербург, 2016); 2nd International Conference on industrial engineering, ICIE 2016 (Chelyabinsk, 2016 г.); International conference on industrial engineering, applications and manufacturing, ICIEAM (Chelyabinsk 2017 г); Mechanical science and technology update, MSTU (Omsk, 2018 г.); XII Международной научно-технической конференции «Трибология-машиностроение», ИМАШ РАН (Москва 2018); Открытой школе-конференции стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы» (г. Уфа. 2018 г., 2020г.), Научно-практической конференции PST2020 «Фазовые и структурные превращения в стали и сплавах» (Екатеринбург, 2020 г).

Победитель областного конкурса «Изобретатель Южного Урала-2012» в номинации «Информационные и телекоммуникационные технологии».

Материалы диссертационного исследования были доложены в: ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург), ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (г. Тула), ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (г. Москва), ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университета Петра Великого» (г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора состоит в организации, проведении и непосредственном участии в теоретических, лабораторных и экспериментальных исследованиях. Автором лично произведен анализ, обобщение результатов работы и проведено обоснование всех выносимых на защиту положений. Непосредственно под руководством и при личном участии автора выполнены все промышленные испытания и внедрены результаты работы в условиях действующего производства.

Публикации. Результаты исследований представлены в 39 публикациях, в числе которых 19 работ опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 7 статей в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science, 1 монография, 2 патента РФ на изобретения, 2 патента РФ на полезные модели, 6 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемых литературных источников из 280 наименований, 18 приложений; содержит 382 страницы машинописного текста, 105 иллюстраций, 54 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, рассматриваемой в диссертации, излагаются цели, задачи научного исследования, описываются подходы и методы исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ современного состояния и рассмотрены основные направления развития технологии производства ЛПП и оборудования непрерывных широкополосных станов горячей прокатки (НШСГП).

Производство широкополосной листовой стали на НШСГП является одной из самых сложных в технологии получения ЛГП и заключается в последовательной прокатке стальных полос (заготовок) определенными партиями (монтажами), после чего происходит замена пар рабочих валков (перевалка). Характеристика монтажных партий зависит от типоразмеров, прочностных свойств и количества прокатываемых полос и определяется состоянием поверхности рабочих валков, а также величиной их износа. Особенность технологии производства на НШСГП заключается в том, что в рамках одного монтажа последовательно прокатываются стальные полосы, различные как по химическому составу, так и по типоразмеру. При этом необходимо обязательное соблюдение индивидуальной технологии для получения заданных геометрических и прочностных параметров для каждой из прокатываемых полос. Прокатка на НШСГП в одной монтажной партии разных по химическому составу, толщине и ширине стальных полос приводит к ряду проблем: оборудование работает с повышенными нагрузками, увеличивается машинное время работы, наблюдается несоблюдение теплового режима. Это вызывает преждевременный износ и выход из строя оборудования, перегрев и термический износ рабочих валков.

Одним из современных направлений в технологии производства ЛГП, направленным на снижение энергозатрат и повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков, является применение систем дозированной подачи жидких СМ. В работе проведен анализ известных решений, посвященных развитию и применению СМ в технологии производства ЛГП. Большое количество исследований проведено в данной области такими известными учеными, как: В.Л. Мазур, В.И. Мелешко, А.П. Грудев, В.Т. Тилик, В.К. Белосевич, С.И. Платов и др.

В настоящее время при производстве ЛГП предъявляются достаточно жесткие требования к тепловому состоянию рабочих валков. Температура поверхности рабочих валков в черновых и чистовых клетях не должна превышать 65...70⁰С и 80...85⁰С соответственно. Вопросам управления тепловым состоянием рабочих валков посвящено большое количество исследований (Шичков А.Н., Гарбер Э.А., Мазур И.П. и др.).

Анализ известных работ показывает, что практически полностью отсутствует единый методологический подход, как комплекс эффективных технических и технологических методов и средств, направленных на развитие технологии и совершенствование оборудования, обеспечивающих получение продукции заданного уровня свойств требуемыми геометрическими и прочностными показателями качества, при одновременном снижении уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛГП.

Таким образом, для исследуемой системы «опорный валок – рабочий валок – полоса», на примере НШСГП, требуется разработка научного инструментария – методологического подхода, заключающегося в научном обосновании предлагаемой технологии эффективного воздействия на процессы смазывания и охлаждения валков и полосы.

С целью решения вышеуказанных научно-технических проблем необходимо исследовать вопросы, направленные на развитие теории функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» на основе совершенствования оборудования, разработки и применения технологии эффективного смазывания и охлаждения рабочих валков и полосы станов горячей прокатки.

В результате проведенного анализа известных технологий и оборудования, направленных на снижение уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛГП,

выраженное в сокращении энергетических затрат и повышении эксплуатационной стойкости рабочих валков, а также анализа опубликованных работ, сформулированы цель и определены задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованиям функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса», направленным на снижение уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛГП за счет применения технологии подачи жидких СМ в валковые узлы четырехвалковых клетей.

Исследования базируются на разработанных аналитических подходах, учитывающих характер нагружения в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса» и его изменение при условии подачи СМ. Разработанные математические модели определяют толщину смазочного слоя на контакте «опорный валок – рабочий валок» и расход СМ с учетом изменения параметров шероховатости опорных и рабочих валков.

Определение напряженно-деформированного состояния в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса» осуществлялось методом конечных элементов (МКЭ), в пакете программы «Deform – 3D».

В настоящей работе, на примере процесса листовой горячей прокатки в программном комплексе «Deform – 3D» реализовано математическое моделирование для широкого диапазона прокатываемого сортамента. В качестве исходных данных задавали: температуру заготовки – 1070...980 С, температуру инструмента – 100⁰ ...80⁰ С, характеристики материалов рабочих и опорных валков и полосы (модуль нормальной упругости (E, МПа), модуль упругости при сдвиге кручением (G, МПа), плотность ($\rho_n, \text{кг/м}^3$), коэффициент Пуассона (μ), линейное расширение ($\alpha, \times 10^6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$), теплопроводность ($\lambda, \text{Вт/м}\times\text{К}$), предел прочности ($\sigma_B, \text{МПа}$), относительное удлинение (%), относительное сужение (%)). С применением данных по кривым упрочнения для выбранных материалов (зависимость сопротивления деформации металла от температуры, степени и скорости деформации $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$) в программном продукте «Deform – 3D» определялись пластические свойства материалов. Для материала заготовки выбрана пластическая модель, для материала валка - упруго пластическая модель.

Оценка адекватности математической модели определялась путем сравнения теоретических и фактических (экспериментальных) данных по выбранному критерию «усилие прокатки». Анализ результатов моделирования (по 200 различным маркам стали и их типоразмеров) установил, что величина ошибки составляет не более 6%, что позволяет признать модель достоверной.

В ходе проведения исследований установлено, что в программном комплексе «Deform – 3D» невозможно задать условия подачи СМ на контакт «опорный валок – рабочий валок». Дальнейшее изучение контактного взаимодействия с наличием СМ было реализовано аналитическим путем на основе результатов физического моделирования контакта двух цилиндрических тел при больших нагрузках, вызывающих деформацию контактирующих поверхностей.

Большой вклад в развитие теории взаимодействия двух цилиндрических поверхностей с наличием тонкого слоя СМ внесли такие известные ученые, как: Грудев А.П., Мазур В.Л., Жильников Е.П. и др.

Для описываемого случая выдвигается гипотеза, что на контакте «опорный валок – рабочий валок» с наличием СМ реализуется эластогидродинамическое трение.

Расчетная схема приведена на рисунке 2. На рисунке 2 СМ условно не показан, деформация контактной поверхности валков представлена как усреднённая.

Основными уравнениями, описывающими взаимодействие в эластогидродинамическом контакте, являются: уравнение Рейнольдса, формула Баруса и выражение (1), описывающее форму зазора на контакте «опорный валок–рабочий валок» с учетом упругих радиальных деформаций поверхностей $\delta(p)$ тел качения.

$$h(x) = h_0 + \frac{x^2}{2 \times R_{np}} + \delta(p) \quad (1)$$

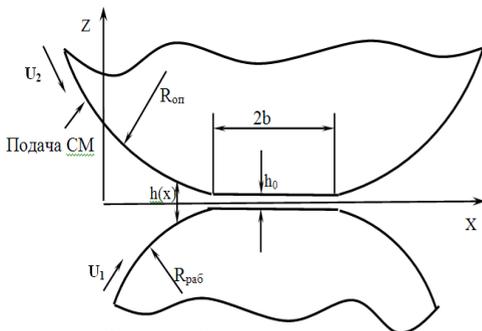


Рисунок 2. Геометрия контакта «опорный валок–рабочий валок»

При решении задачи принималось условие, что величина деформации контактирующих цилиндрических тел эквивалентна в условиях применения СМ и его отсутствия. Определение величины $\delta(p)$ входящей в уравнение (1), осуществлялось совместным решением задачи теории упругости и гипотезы Винклера.

Толщину смазочного слоя (h_0) на контакте «опорный валок–рабочий валок» при эластогидродинамическом режиме трения определяли по формуле Д.С. Коднира и В.Н. Васина (2):

$$\frac{h_0}{R_{np}} = \frac{1,864 \times p_S^{\alpha_1} \times p_U^{\alpha_2} \times p_N^{\alpha_3}}{K_1}, \quad (2)$$

где K_1 - безразмерный коэффициент, учитывающий уменьшение толщины смазочного слоя за счет незначительного разогрева смазки в зоне контакта:

$$K_1 = 1 + P_T^\beta \times \lg(0,9 \times p_S^{\alpha_1} \times p_U^{\alpha_2} \times p_N^{\alpha_3}). \quad (3)$$

Входящие в уравнения (2-3) параметры p_S , p_U , p_N , P_T – безразмерные критерии, которые определяются:

$$p_T = \frac{\mu_0 \beta U_\Sigma}{\lambda_m}, \quad p_S = \frac{\mu_0 U_\Sigma}{E_{np} R_{np}}, \quad p_U = \alpha \cdot E_{np}, \quad p_N = \frac{E_{np} R_{np}}{q_n},$$

где μ_0 - динамическая вязкость СМ при температуре масла на входе в контакт, Па·с; α - пьезокоэффициент вязкости СМ; λ_m - коэффициент теплопроводности СМ, Вт/м·К; q_n - нагрузка на единицу длины линии контакта, кН/мм; β - коэффициент экспоненциальной зависимости вязкости СМ от температуры; $R_{np} = (R_1 \times R_2) / (R_1 + R_2)$ - эквивалентный радиус кривизны упругости контактирующих тел, мм; $E_{np} = (E_1 \times E_2) / (E_2 + E_1)$, - эквивалентный модуль упругости контактирующих тел, МПа; $U_\Sigma = V_1 + V_2$ - суммарная скорость контактирующих поверхностей, м/с.

Согласно многочисленным исследованиям (Горячева И.Г., Елманов И.М., Терентьев Д.В. и др.) толщина смазочного слоя при эластогидродинамическом режиме трения находится в диапазоне $h_0 = 2 \dots 6$ мкм. Для условия взаимодействия в системе «опорный

валок – рабочий валок» произведена адаптация формул (2) и (3) и получены численные значения коэффициентов, для которых реализуется предложенный режим трения. Решения систематизированы в группы согласно расчетным характеристикам сопротивления деформации прокатываемых заготовок (σ_{0i} , МПа). Численные значения коэффициентов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Численное значение коэффициентов для определения толщины смазочного слоя на контакте «опорный валок – рабочий валок»

	Сопротивления деформации заготовки (σ_{0i}), МПа	Расчетные значения коэффициентов			
		$\beta \times 10^{-1}$	$\alpha_1 \times 10^{-1}$	$\alpha_2 \times 10^{-1}$	$\alpha_3 \times 10^{-2}$
1	69–85	4,3...4,9	1,0...1,10	2,14...2,31	7,8...7,9
2	86–96	5,3...5,7	1,1...1,27	2,31...2,43	7,9...8,1
3	97–115	6,5...6,7	1,3...1,47	2,52...2,59	8,2...8,3
4	116–124	6,9...7,3	1,5...1,75	2,61...2,76	8,5...8,7
5	125–130	7,3...7,5	1,8...1,87	2,76...2,88	8,8...8,9
6	131 и более	7,8...7,9	1,9...1,94	2,91...2,98	9,1...9,3

Модель формирования смазочного слоя на контакте «опорный валок – рабочий валок», которые начинают вращаться в среде СМ из состояния покоя, можно представить суммой двух слагаемых:

$$h_{см} = h_a + h(x), \quad (4)$$

где $h(x)$ – определяется по выражению (1);

h_a – толщина адгезировавшегося слоя СМ, мкм, которая определяется:

$$h_a = h_{\sigma_{аз}} + K_{Rz}, \quad (5)$$

где $h_{\sigma_{аз}}$ – толщина адгезировавшегося слоя СМ при базовой шероховатости поверхности, мкм, которая определялась согласно работам Терентьева Д.В., Огаркова Н.Н. с учетом маслосемкости контактирующих поверхностей; K_{Rz} – коэффициент, характеризующий интенсивность захвата СМ неровностями поверхности.

Для перехода в режим эластогидродинамического трения необходимо выполнения условия – наличие минимального количества СМ на поверхности опорного валка, мм²:

$$V_a = l_a \times h_a \quad (6)$$

где l_a – длина дуги опорного валка, на которой происходит адгезия СМ, мм; Объем подаваемого СМ за время равное одному обороту опорного валка, мм³:

$$Q_a = (V_a \times \pi \times D_{оп} \times n_{оп} \times L) / l_a \quad (7)$$

где L – длина бочки, мм; $n_{оп}$ – количество оборотов, об/мин; $D_{оп}$ – диаметр опорного валка, мм.

Таким образом, количество СМ на контакте «опорный валок – рабочий валок» можно определить по выражению, мм²:

$$V_{p/o} = h_{см} \times 2l_k \quad (8)$$

где $h_{см}$ – толщина смазочного слоя, определяемая по формуле (4), мкм; l_k – протяженность площадки упругого сжатия рабочего и опорного валков в зоне их соприкосновения, мм.

Для поддержания стабильного условия реализации режима трения в пределах каждой (i-ой) монтажной партии, необходимо учитывать изменения параметра K_{R_z} .

Коэффициент (K_{R_z}) был адаптирован, и предложен новый параметр, учитывающий изменение шероховатости опорного вала ($k_{ш}^{он}(t)$) и рабочего вала ($k_{ш}^{раб}(t)$) в пределах i-й монтажной партии для j-ой клетки листового стана горячей прокатки:

$$K_{R_z(i,j)}(t) = k_{ш(i,j)}^{он}(t) / k_{ш(i,j)}^{раб}(t) \quad (9)$$

Выражения для определения коэффициентов $k_{ш i,j}^{он}(t)$ и $k_{ш i,j}^{раб}(t)$ были получены по результатам статистической обработки массива экспериментальных данных, включающих наблюдение за 120 парами валков. Значения коэффициентов регрессионного уравнения были найдены с помощью обобщенного метода наименьших квадратов. Статистическую значимость коэффициентов регрессионных уравнений оценивали по критерию Стьюдента ($t_{\alpha=0,05}$). При проведении исследований применялись СМ: QUAKEROL N НВ1082 и РОСОЙТ-МГП.

Получены следующие выражения:

– для опорного вала:

$$k_{ш(i,j)}^{он}(t) = 1,91 - 1,458 \times R_{z-on}^0 - 0,77 \times t_i + 0,906 \times \sigma_i + 2,014 \times \omega_{он}, \quad (10)$$

$$(R^2 = 0,83; F_{0,95;5}^{расч} = 187,5 \geq F^{табл} = 3,75);$$

– для рабочего вала:

$$k_{ш(i,j)}^{раб}(t) = 2,79 - 3,678 \times R_{z-раб}^0 - 1,894 \times t_i + 3,96 \times \sigma + 0,0154 \times \frac{P}{B_s} + 0,4128 \times \beta + 3,35 \times \omega_{раб} \quad (11)$$

$$(R^2 = 0,85; F_{0,95;7}^{расч} = 175,3 \geq F^{табл} = 2,54),$$

где $R_{zон}^0$, $R_{zраб}^0$ – базовое значение параметра шероховатости опорного и рабочего валков (устанавливается при перешлифовке), мкм; t_i – время эксплуатации опорного и рабочего валков в j-ой клетки, мин; ω_p , $\omega_{он}$ – угловые скорости рабочего и опорного валков соответственно, рад/сек; $h_{баз}$ – толщина адгезировавшегося слоя СМ на поверхности опорного вала, мкм; P – усилие прокатки, кН; B_s – ширина прокатываемой заготовки; β – коэффициент использования длины бочки вала.

На примере НШСГП 2000 ПАО «ММК» получены следующие значения коэффициентов:

– для седьмой клетки стана: $k_{ш7}^{он}(t) = 0,07 \div 0,13$; $k_{ш7}^{раб}(t) = 0,08 \div 0,10$;

– для восьмой клетки стана: $k_{ш8}^{он}(t) = 0,075 \div 0,19$; $k_{ш8}^{раб}(t) = 0,09 \div 0,2$;

– для девятой клетки стана: $k_{ш9}^{он}(t) = 0,023 \div 0,83$; $k_{ш9}^{раб}(t) = 0,13 \div 0,37$.

Итоговое выражение для определения количества СМ в системе «опорный валок – рабочий валок» определяется, мм²:

$$V_{p/o}(t) = (h_{см} \times 2l_k) \times [1 - K_{R_z(i,j)}(t)] \quad (12)$$

где l_k – полуширина площадки контакта, мм;

Расход СМ, подаваемый на j-ую клетку прокатного стана, мм³/мин:

$$Q_{i,j}(t) = \frac{(h_{см} \times 2l_k) \times L}{t} \times [1 - K_{R_z(i,j)}(t)] \quad (13)$$

где L – длина бочки вала, мм; t – время, за которое валок совершает оборот, мин.

Таким образом, для j -ой клетки в пределах i -й монтажной партии (для установленной технологической инструкцией величины межперевалочных периодов) разработан алгоритм для определения расходов СМ. Разработанные режимы подачи СМ в чистой группе клеток НШСГП приведены в таблице 2.

Таблица 2. Режимы подачи СМ на валки НШСГП

Сопrotивление деформации заготовки (σ_{0i}), МПа	Расход СМ в чистой группе клеток (мм ³ /мин)		
	1-ая клетка	2-ая клетка	3-ая клетка
	$Q_{i,j}$	$Q_{i,j}$	$Q_{i,j}$
1 69–85	0,09...0,10	0,13...0,15	0,20...0,24
2 86–96	0,12...0,14	0,11...0,13	0,17...0,20
3 97–115	0,05...0,10	0,08...0,10	0,10...0,13
4 116–124	0,04...0,05	0,09...0,10	0,10...0,12
5 125–130	0,03...0,06	0,08...0,10	0,11...0,12
6 131 и более	0,05...0,09	0,09...0,12	0,15...0,21

На основе данных, описывающих параметр $K_{Rz\ i,j}(t)$, предложены рекомендации, заключающиеся в необходимости корректировки расхода СМ для поддержания параметра (h_0) в диапазоне 2...6 мкм. Разработаны требования, заключающиеся в необходимости увеличения расхода СМ на 3...7% после прокатки 80% горячекатаных полос в i -ой монтажной партии.

В программном комплексе «Deform-3D» были проведены исследования влияния рекомендованных режимов СМ на изменение напряженного состояния в системе «опорный валок – рабочий валок». На рисунке 3 приведены наиболее характерные результаты компьютерного эксперимента.

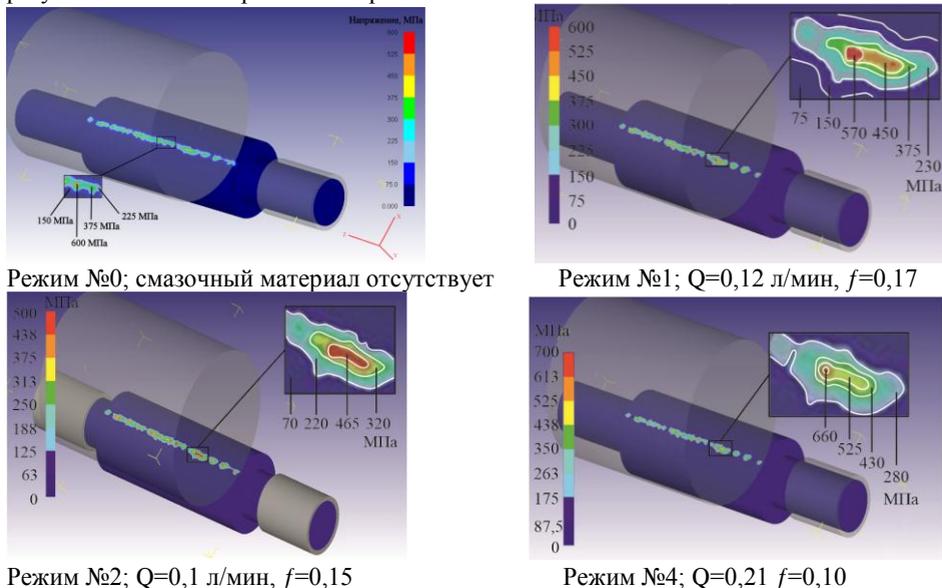


Рисунок 3. Распределение интенсивности напряжений (σ) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок» при различных режимах подачи СМ, МПа

Наличие СМ учитывали через коэффициент трения, который определяли по формуле Дроздова Ю.Н. На основе проведенных исследований сделаны выводы, что применение СМ в рекомендованных режимах позволяют уменьшить напряжения в зоне контакта (σ_i , МПа) на 15...18%.

Исследования влияния режимов СМ на изменение напряженно-деформированного состояния в системе «рабочий валок–полоса» проводились на основе упругопластической модели очага деформации, предложенной проф. Э.А Гарбером.

На основе работ Э.А Гарбера были произведены теоретические расчеты технологического параметра «Момент прокатки» ($M_{пр}$, кН*м). Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показали, что применение СМ приводит к снижению технологического параметра ($M_{пр}$, кН*м) на 4...6%.

Таким образом, на основе теоретических и экспериментальных исследований показано, что применение СМ в технологии листовой горячей прокатки позволяет достичь снижения контактных сил трения в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса». Для разработанных режимов подачи СМ необходимо проведение лабораторно-промышленных исследований, с последующей оценкой полученных результатов.

В третьей главе приведены результаты лабораторно-промышленных исследований влияния режимов подачи СМ на контакт «опорный валок–рабочий валок–полоса» и предложены методы оценки их эффективности.

Эффективность (\mathcal{E}_i) применения СМ в технологии полосовой горячей прокатки оценивалось по изменениям относительных показателей: $\mathcal{E}_i = \frac{\Pi_i^0}{\Pi_i^1}$,

где Π_i – предложенные показатели (14а-14г), 0 - без применения СМ; 1 - применение СМ.

Предложены следующие относительные показатели:

– расчетные значения фрикционных параметров процесса прокатки: момент трения на контакте «опорный валок-рабочий валок» ($M_{mp(i,j)}^{эф(оп-раб)}$) (14а);

– расчетные значения момент прокатки ($M_{np(i,j)}^{эф}$) (14а);

– износ образцов моделирующих взаимодействие рабочих ($J_{раб(i,j)}^{эф.лаб}$) и опорных ($J_{оп(i,j)}^{эф.лаб}$) валков, полученных при постановке лабораторных экспериментов (14б);

– расчетно-аналитическое значение показателя изнашивания рабочих валков ($J_{раб(i,j)}^{эф.пром}$), полученного при реализации промышленных экспериментов (14в);

– измеренное значение силы тока ($I_{(i,j)}^{эф.пром}$) для электродвигателей привода рабочих валков чистовой группы клетей при реализации промышленных экспериментов (14г).

Эффективность воздействия на процессы смазывания для системы «опорный валок–рабочий валок» считается наблюдение условий: $\mathcal{E}_i > 1$ и $\mathcal{E}_i \rightarrow \max$.

Критерии $M_{mp(i,j)}^{эф(оп-раб)}$, $J_{раб(i,j)}^{эф.лаб}$ и $J_{оп(i,j)}^{эф.лаб}$ были определены при проведении лабораторных исследований, критерии $J_{раб(i,j)}^{эф.пром}$ и $I_{(i,j)}^{эф.пром}$ – при проведении промышленных исследований.

$$\left. \begin{aligned}
 M_{mp(i,j)}^{эф(он-раб)} &= \frac{M_{тр(i,j)}^{0(он-раб)}}{M_{тр(i,j)}^{1(он-раб)}}, & M_{np(i,j)}^{эф} &= \frac{M_{np(i,j)}^0}{M_{np(i,j)}^1}, & 14a \\
 J_{раб(i)}^{эф.лаб} &= \frac{J_{раб(i,j)}^0}{J_{раб(i,j)}^1}, & J_{он(i)}^{эф.лаб} &= \frac{J_{он(i,j)}^0}{J_{он(i,j)}^1}, & 14б \\
 J_{раб(i,j)}^{эф.пром} &= \frac{J_{раб(i,j)}^0}{J_{раб(i,j)}^1}, & & & 14в \\
 I_{(i,j)}^{эф.пром} &= \frac{I_{раб(i,j)}^0}{I_{раб(i,j)}^1}. & & & 14г
 \end{aligned}
 \right\}$$

Для определения критериев $M_{mp(i,j)}^{эф(он-раб)}$, $J_{раб(i,j)}^{эф.лаб}$ и $J_{он(i,j)}^{эф.лаб}$ был использован лабораторный стенд «Машина трения СМЦ-2», который был подвергнут существенной модернизации: полная замена аппаратной части, частотного регулирования привода, разработка программного обеспечения, позволяющего выводить измеренные значения в режиме реального времени на ЭВМ с их последующей обработкой.

Исследования были проведены в несколько этапов. На первом этапе было воспроизведено взаимодействие в системе «опорный валок–рабочий валок» на примере 7-ой клетки НШСГП 2000 ПАО «ММК». Для достижения максимальной достоверности описываемого процесса была применена вторая теорема подобия. В качестве основной функции отклика был выбран параметр «Момент трения ($M_{тр}$, $kH \times m$)», который регистрировался испытательным стендом с точностью до 1,5%. Первоначально была реализована серия однофакторных экспериментов. Достоверность результатов исследования определялась путем сравнения экспериментальных и расчетных значений. В качестве экспериментальных значений из цеховой системы учета данных использовали значения силы тока (I , A) при установившемся режиме прокатки, которые в дальнейшем по методике Целикова А.И. и Третьякова А.В. пересчитывались в значения моментов на валу главного привода ($M_{дв}$), а затем в момент трения ($M_{тр}$). Расхождения между лабораторными и расчетными данными ($M_{тр}$) составили 15...22%, что позволяет признать результаты моделирования достоверными.

На втором этапе исследования была реализована многофакторная модель. Был поставлен и реализован полнофакторный эксперимент вида ОЦКП 2^3 , включающий в себя 15 опытов. Для опытов №9-15 были рассчитаны звездные точки и определены уровни влияния каждого из факторов. В качестве переменных факторов принимались следующие: внешняя нагрузка (P , H ; $X_1=29 \div 85$), частота вращения нижнего ролика (ω , об/мин; $X_2=500 \div 1000$), расход СМ (Q , мл/мин; $X_3=0,1 \div 0,25$). В качестве постоянных факторов были приняты: геометрические размеры и материал верхнего и нижнего ролика; свойства СМ (температура, вязкость, плотность и т.д.); температура окружающей среды. В качестве контролируемых (измеряемых) параметров были приняты: момент трения, ($M_{тр}$, $kH \times m$); величина износа (потеря массы) верхнего и нижнего роликов, которая определялась по результатам взвешивания (J , гр).

Значения коэффициентов регрессионного уравнения были найдены с помощью обобщенного метода наименьших квадратов. Статистическую значимость коэффициентов регрессионных уравнений оценивали по критерию Стьюдента ($t_{\alpha=0,05}$).

После обработки результатов эксперимента, отсева статистически незначимых коэффициентов и перевода исследуемых значений к натуральному виду, получили следующие выражения:

- момент трения (моделирующий взаимодействие «опорный валок-рабочий валок»):

$$M_{тр}^{(оп-раб)} = 25,420 + 1,17X_1 - 1,57X_2 - 1,18X_3 - 0,1X_1^2 + 1,04X_2^2 - 9,563X_3^2$$

$$(R^2 = 0,83; F_{0,95;7}^{расч} = 165,5 \geq F^{табл} = 12,15);$$
(15)

- износ верхнего ролика (моделирующий износ опорного вала):

$$J_{оп}^1 = 1,2471 - 0,12X_1 - 0,14X_2 - 0,19X_3 + 1,12X_1X_1 + 5,3X_1X_3 + 5,62X_2X_3 - 2,1X_1X_2X_3 - 2,1X_1^2 - 2,88X_2^2 - 1,19X_3^2;$$

$$(R^2 = 0,85; F_{0,95;9}^{расч} = 185,6 \geq F^{табл} = 19,16);$$
(16)

- износ нижнего ролика (моделирующий износ рабочего вала):

$$J_{раб}^1 = 5,353 + 1,20X_1 - 1,45X_2 - 1,3X_3 + 3,8X_1X_2 + 3,17X_1X_3 + 2,21X_2X_3 - 2,5X_1X_2X_3 - 1,01X_1^2 + 2,74X_2^2 - 3,35X_3^2;$$

$$(R^2 = 0,85; F_{0,95;11}^{расч} = 192,3 \geq F^{табл} = 19,3).$$
(17)

Для качественной оценки выбранных критериев эффективности (14а,14б) была реализована дополнительная серия экспериментов, при которых подача СМ не осуществлялась (Q=0 мл/мин).

Для оценки значимости переменных, входящих в уравнения (15)-(17), был произведен дисперсионный анализ, и определено, что наибольшее влияние на величину износа нижнего ролика оказывает фактор X₃ (наличие СМ), и фактор X₁ (внешняя нагрузка).

На рисунке 4 приведены наиболее характерные зависимости, описывающие влияние исследуемых технологических параметров системы «опорный валок-рабочий валок» при подаче и без подачи СМ (Q=0 мл/мин). Анализ результатов показывает, что момент трения (кН×М) при использовании СМ, значительно ниже, чем при Q=0 мл/мин.

На основе полученных данных была произведена количественная оценка исследованных критериев эффективности: $M_{тр(i,j)}^{эф(оп-раб)}$, $J_{раб(i,j)}^{эф}$ и $J_{оп(i,j)}^{эф}$. Результаты систематизированы и приведены в таблице 3.

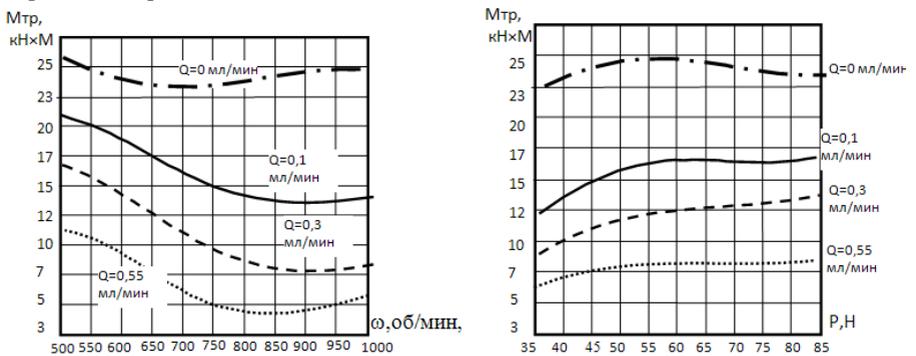


Рисунок 4. Зависимости, описывающие эксперимент: момент трения (M_{тр}, кН×М), угловая скорость (ω, об/мин), внешняя нагрузка (P, Н), при различных режимах подачи СМ (Q, мл/мин)

Для оценки эффективности выбранного критерия ($I_{(i,j)}^{эф}$) был реализован промышленный эксперимент. Режимы подачи СМ применялись согласно разработанным рекомендациям. Исследования проводились с применением методов статистического анализа. Объем выборки составлял более 600 стальных полос, различного размерного и марочного сортамента.

Разработана расчетная (прогнозная) модель определения параметра «Сила тока» электродвигателей чистой группы клеток ($I_{(i,j)}^{1,0}, A$). Значение параметра «Сила тока» определяется при установившемся режиме работы, после захвата прокатываемой полосы. Значения коэффициентов регрессионного уравнения были найдены с помощью обобщенного метода наименьших квадратов.

Получено уравнение регрессии, позволяющее определять значения силы тока для чистой групп клеток ($I_{(i,j)}^{1,0}, A$) листового стана горячей прокатки.

Модель (18) является прогнозной и позволяет на этапе составления монтажных партий (с вероятностью не менее $P(t)=85\%$) выдавать практические рекомендации по загрузке клеток стана, в том числе и определять эффективность процесса полосовой горячей прокатки по предложенному критерию. Количественная оценка исследованного критерия ($I_{(i,j)}^{эф}$) систематизирована и приведена в таблице 3.

$$I_i^{(1,0)} = 2 \times (-1264,5 + 3541,92 \times \frac{P_i^{(1,0)}}{L} - 968,76 \times Z_{23} - 2253,7 \times Z_{22} + 263,05 \times \frac{b}{L} - 726,47 \times Z_{25} + 43,4 \times h - 1465,14 \times Z_{24} + 1,12 \times U_i^{(1,0)} - 790,67 \times Z_{26} - 1803,51 \times Z_{21} - 63,16 \times \omega_i^{(1,0)} + 3654,09 \times \frac{D_{верхi}}{D_{нижнi}} - 67,32 \times Z_1 - 10,46 \times \delta); (R^2 = 0,85; F_{0,95,15}^{расч} = 1753 \geq F^{табл} = 2,54), \quad (18)$$

где $P_i^{(1,0)}$ – усилие прокатки в i -ой клетки, МН; Z_{ij} – фиктивные переменные, показывающие наличие/отсутствие СМ в i -ой клетки; $U_i^{(1,0)}$ – напряжение в i -ой клетки, В; $\omega_i^{(1,0)}$ – угловая скорость вращения валков в i -ой клетки, об/мин; $D_{верхi}$ – диаметр верхнего рабочего валка в i -ой клетки, мм; $D_{нижнi}$ – диаметр нижнего рабочего валка в i -ой клетки, мм.

В уравнении (18) верхнее значение индексов (1;0) характеризует: 1 - прокатка с применением СМ; 0 - прокатка без применения СМ.

Для оценки критериев $M_{тр(i,j)}^{эф(раб-пол)}$ и $J_{раб(i,j)}^{эф,пром}$ на основе экспериментально полученных данных для системы «опорный валок–рабочий валок–полоса» была разработана математическая модель процесса изнашивания.

Моделирование процесса изнашивания рабочего валка, в том числе и с учетом СМ, основано на базовой энергетической теории изнашивания твердых тел.

$$\Delta V(t)_{ij(0;1)} = J_{ij(0,1)}^{ЭН} \cdot A_{трij(0,1)}(t) = J_{ij(0,1)}^{ЭН} \cdot N_{трij(0,1)} \cdot t, \text{ мм}^3, \quad (19)$$

где $J^{ЭН}$ – энергетический показатель изнашивания рабочего валка, $\text{мм}^3/\text{Нм}$; $N_{тр}$ – мощность, затраченная на преодоления сил трения в контакте «рабочий валок–опорный валок» и «рабочий валок–полоса», Вт; t – время эксплуатации рабочего валка, мин; 0 – процесс прокатки происходит без применения СМ; 1 – с применением СМ; i – номер клетки; j – положение валка (верхний/нижний).

Поскольку на практике износ рабочих валков оценивают линейной величиной (ΔR – для прокатного валка), износ бочки валка определили из условия:

$$\Delta V_{ij} = V_{ij(0)} - V_{ij(1)}, \quad (20)$$

где $V_{ij(0)}$ - объем валка с исходным профилем, мм³; $V_{ij(1)}$ - объем валка с изношенным профилем, мм³.

Величину износа бочки рабочего валка определяли:

$$\Delta V = 2\pi \int_0^{L_i/2} [f(z)]^2 dz - 2\pi \int_0^{L_i/2} [f_k(z)]^2 dz \quad (21)$$

где ΔV - при прокатке полосы, мм³.

$f(z)$ – кривая, образующая боковую поверхность тела вращения валка (бочка) валка с исходным профилем, и $f_k(z)$ – с изношенным профилем соответственно.

Расчет объема валка ($V_{i(0,1)}$) производился путем замера линейных размеров бочки валка как минимум по двум точкам, и по пяти парам валков.

Получены следующие численные значения объема изношенного материала бочки рабочего валка: при отсутствии СМ $\Delta V_{(0)} = (1,3 \dots 2,7)$ кг, в случае применения СМ $V_{(1)} = (1,15 \dots 2,13)$ кг, что составляет уменьшение износа в среднем на 3,8...16,8%.

Расчетной величиной, описывающей износ рабочих валков, является показатель изнашивания:

$$J_{ij(0,1)}^{\text{зн}} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \frac{\Delta V_{i(0,1)}}{A_{\text{тр}ij(0,1)}}, \quad (22)$$

где $i=1-10$ – номер рабочего валка одного типоразмера; $A_{\text{тр}}$ – суммарная работа, затраченная на преодоление сил трения в контакте «рабочий валок-опорный валок» и «рабочий валок-полоса», Дж.

Для определения фрикционных параметров на контакте «рабочий валок-опорный валок» использовали методику В.П. Полухина.

При расчете фрикционных параметров на контакте «рабочий валок-полоса» необходимо определить неизвестный коэффициент плеча ψ . Для оценки коэффициента плеча ψ был выполнен множественный регрессионный анализ. Полученное уравнение (23) позволяет определять параметр ψ , как с отсутствием СМ, так и с применением СМ для каждой прокатной клетки чистовой группы листового стана горячей прокатки.

$$\begin{aligned} \Psi_{i,j} = & b_1 - a_1 \times P_i - a_2 \times Z_{\text{см}(0;1)} + a_3 \times p_{\text{ср}i} - a_3 \times h_{\text{н}i} + a_5 \times \Delta h_i - a_6 \times l_{\text{o}i} - a_7 \times R_{\text{раб}i} + \\ & + a_8 \times \sigma_i + a_9 \times v_i, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\left(R^2 = 0,86; F_{(0,95;10)}^{\text{расч}} = 1456 \geq F^{\text{табл}} = 3,94 \right),$$

где P – усилие прокатки, МН; $Z_{\text{см}}$ – коэффициент СМ (1 - наличие, 0 – отсутствие); $p_{\text{ср}}$ – среднее контактное напряжение, МПа; $h_{\text{н}}$ – толщина полосы в нейтральном сечении, мм; Δh – абсолютное обжатие, мм; l_{o} – длина дуги очага деформации, мм; $R_{\text{раб}}$ – радиус рабочего валка, мм; σ – сопротивление деформации МПа; v – скорость прокатки, м/с. Коэффициенты a_1 - a_9 , полученные по результатам статической обработки, зависят от режимов прокатки.

При определении работы, затраченной на преодоление сил трения в контакте «рабочий валок-полоса», считаем, что износ рабочих валков осуществляется только на участке зоны чистого скольжения. Протяженность зон чистого скольжения определяли по методике Э.А. Гарбера.

Таким образом, для системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» разработана и численно реализована математическая модель процесса изнашивания рабочих валков. Экспериментально-аналитическим путем определены показатели интенсивности изнашивания рабочих валков. Получены следующие численные значения: при отсутствии СМ $J_0^{эп} = (4,18 \dots 6,13 \times 10^{-9})$ мм³/Нм, в случае применения СМ $J_1^{эп} = (3,48 \dots 4,12 \times 10^{-9})$ мм³/Нм.

На основе полученных данных была произведена количественная оценка исследованных критериев эффективности: $M_{тр(i,j)}^{эф(раб-пол)}$ и $J_{раб(i,j)}^{эф.пром}$. Результаты систематизированы и приведены в таблице 3.

Таблица 3. Относительные показатели эффективности (Э) за счет применения технологии подачи СМ в четырехвалковых клетях НШСГП

Чистовая непрерывная группа клетей	Показатели (Э), полученные на основе исследований					
	лабораторных				промышленных	
	Моменты		Износ		Изнашивание	Сила тока
	трения	прокатки				
№.№клетей	$M_{тр(i,j)}^{эф(оп-раб)}$	$M_{пр(i,j)}$	$J_{раб(i)}^{эф.лаб}$	$J_{оп(i)}^{эф.лаб}$	$J_{раб(i,j)}^{эф.пром}$	$I_{(i,j)}^{эф}$
1-ая клеть	1,09...1,12	1,05...1,07	1,05...1,07	1,06...1,09	1,18...1,20	1,07...1,10
2-ая клеть	1,08...1,11	1,06...1,07	1,06...1,09	1,08...1,11	1,17...1,22	1,06...1,11
3-ая клеть	1,08...1,13	1,05...1,07	1,08...1,10	1,09...1,12	1,18...1,23	1,07...1,12

Теоретические, экспериментальные и промышленные исследования, а также лабораторное моделирование процессов контактного взаимодействия для системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» позволили создать методологию (рисунок 5), реализация которой направлена на разработку и внедрения эффективных режимов подачи СМ при листовой горячей прокатке.

Предложенная методика позволяет на различных этапах исследования, с учетом предложенных критериев (Э), назначать эффективные режимы подачи СМ для снижения уровня потребляемых ресурсов при производстве листового горячекатаного проката. Использование предложенной методики позволяет уменьшить энергозатраты (токовые нагрузки главных приводов) в 1,07...1,10 раз, а также повысить срок службы валков в 1,10...1,15 раз.

С целью повышения эксплуатационных характеристик рабочих валков листовых станов горячей прокатки требуется проведение блока научных и практических исследований, направленных на разработку технологии, совершенствование и внедрение нового оборудования для стабилизации теплового состояния валков, устранения их перегрева и термического износа.



Рисунок 5. Методология исследования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» при применении технологии подачи СМ в четырехвалковых клетях «кварто»

В четвертой главе приведены результаты математического моделирования процесса принудительного охлаждения для системы «рабочий валок – полоса», с учетом основных закономерностей формирования температурных условий процесса горячей прокатки.

Для системы «рабочий валок – полоса» предложена и научно обоснована методика, описывающая процесс принудительного охлаждения. На основе предложенной методики разработана двухмерная математическая модель, описывающая процесс теплообмена в системе «рабочий валок – полоса». Моделирование теплового состояния в системе «рабочий валок–полоса» было реализовано численным методом. В основу решения задачи положено базовое уравнение теплопроводности Фурье.

Для решения поставленной задачи были выбраны следующие граничные условия: граничное условие 1 рода – пузырьковое кипение охладителя; граничное условие 2 рода – контакт заготовки с валком, спрейерное охлаждение инструмента; граничное условие 3 рода – взаимодействие прокатываемой заготовки с воздушной средой, радиационное охлаждение заготовки и инструмента. В качестве дополнительных условий было учтено следующее: теплообмен при конвективном охлаждении на воздухе; теплообмен излучением; рассчитанные значения для коэффициента излучательной способности; плотности теплового потока на поверхности полуограниченного тела, а также изменение температуры за счет деформации прокатываемой заготовки.

Моделирование теплового состояния проходило в два этапа. На первом этапе в качестве объекта исследования была принята горячекатаная полоса. Для выбранного объекта исследования численно реализована математическая модель расчета теплового состояния. Численная реализация модели произведена в среде Delphi.

На рисунке 6 приведен пример расчета теплового состояния прокатываемой заготовки (материал сталь 10, размеры $2,5 \times 1120$ мм) НШСГП 2000 ПАО «ММК». Для конструктивных особенностей систем охлаждения в разрабатываемой модели было учтено следующее: система гидросбива, система межклетевого охлаждения, система дополнительного принудительного охлаждения полосы перед ее входом в клеть, а также учтены характеристики тепловыделения при пластической деформации заготовки. На рисунке 7 приведены результаты расчета теплового состояния полосы с учетом наложенных дополнительных условий: точка А – падение температуры на контактируемой поверхности прокатываемой заготовки от взаимодействия с чистовым гидросбивом; точка В – падение температуры на контактируемой поверхности прокатываемой заготовки от взаимодействия с системой дополнительного принудительного охлаждения полосы перед ее входом в клеть; точка С – падение температуры на контактируемой поверхности прокатываемой заготовки от взаимодействия с рабочими валками. Адекватность математической модели проверяли при помощи переносного инфракрасного пирометра модели TimeTi 213EL, обладающего точностью измерения $\pm 1^\circ\text{C}$, сравнением расчетного и измеренного значений температуры полосы, а также учитывали данные, полученные с цехового пирометра, установленного за последней 13-ой клетью. Результаты расчета показали сходимость результатов на 87%, что позволяет с высокой степенью достоверности признать модель адекватной.

На втором этапе в качестве объекта исследования был принят инструмент (рабочие валки). При этом на разрабатываемую математическую модель теплового состояния инструмента накладывали модель теплового состояния полосы. Исходное уравнение теплопроводности решалось в полярной системе координат. Численная реализация модели произведена в среде Delphi. Результаты моделирования теплового состояния верхнего рабочего валка, на примере клетки №7 стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК», представлены на рисунке 8. На рисунке 9 приведены результаты моделирования, описывающие изменения теплового состояния рабочего валка во времени.

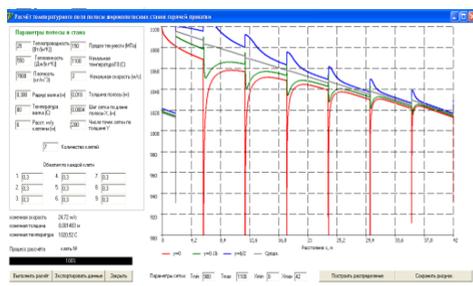


Рисунок 6. Результаты расчета теплового состояния марки Стали 10 с размерами $1120 \times 2,5$ мм

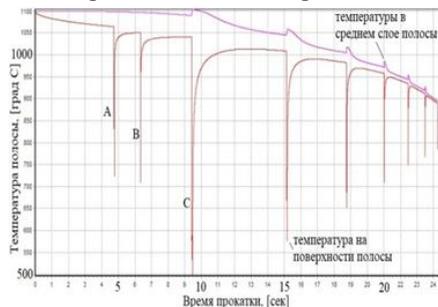


Рисунок 7. Результаты расчета теплового состояния прокатываемой марки Сталь 10 с размерами $1120 \times 2,5$ мм с учетом системы гидросбива (А), системы межклетевого охлаждения (С) и системы принудительного снижения температуры поверхности полосы (В)

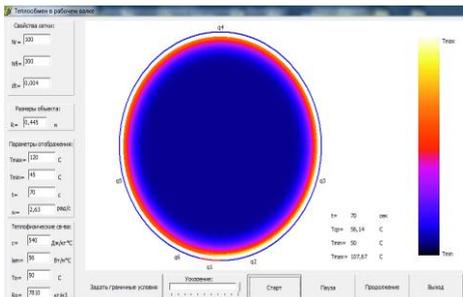


Рисунок 8. Расчет теплового состояния рабочего вала при производстве ЛПП

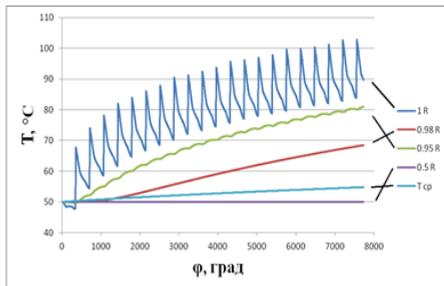


Рисунок 9. Расчет теплового состояния рабочего вала при производстве ЛПП

Адекватность разработанной математической модели проверяли путем сравнения расчетного и измеренного значений теплового состояния рабочих валков сразу после их вывалки из прокатной клетки. Измерения теплового состояния валков производили при помощи тепловизора модели SDS-Infrared HotFind-DXT. Результаты расчета показали сходимость результатов на 83%, что позволяет признать модель адекватной. Исследования теплового состояния рабочих валков были проведены для всей непрерывной черновой и чистовой групп клеток НШСГП 2000 ПАО «ММК».

Проведенные исследования позволили получить новые данные теплового состояния рабочих валков с учетом влияния внешних технологических систем: формирования температурных условий процесса листовой горячей прокатки; теплообмен полосы с валками; объемное тепловыделение при пластической деформации полосы; изменение теплового состояния полосы с учетом работы следующих технологических систем: гидроудаления окалины; межклетевого охлаждения, а также принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации.

С целью повышения эксплуатационных характеристик рабочих валков листовых станов горячей прокатки, предложены новые технические решения, направленные на стабилизацию теплового состояния рабочих валков, результаты которых приведены в следующей главе.

Теоретические, экспериментальные и промышленные исследования системы «рабочий валок – полоса» позволили разработать методологию (рисунок 10), реализация которой направлена на разработку и внедрения эффективных режимов подачи охладителя при листовой горячей прокатке.

Разработанная методика позволила достичь увеличения срока службы рабочих валков на 8...12 эксплуатационных часов (8...12%) за счет разработки и внедрения **эффективных** режимов подачи охладителя.

В пятой главе приведены результаты внедрения новых технических и технологических решений, направленных на получение ЛПП с заданным уровнем свойств и одновременным снижением потребления ресурсов.

Разработана и численно реализована комплексная математическая модель для определения, подаваемых на поверхность рабочих валков, объемов СМ и охладителя. Отличительной особенностью модели являются разработанные адаптивные режимы, позволяющие для каждой из прокатных клеток рассчитывать и выдавать рекомендации по объемам СМ и охладителя в зависимости от режимов прокатки.



Рисунок 10. Методология исследования системы «рабочий валок – полоса» для технологии принудительного охлаждения рабочих валков и полосы

На основе представленной блок-схемы был написан и численно реализован программный продукт (ПО), который был интегрирован в систему управления НШСГП 2000 ПАО «ММК». Разработанный программный продукт в автоматическом режиме из цеховых систем учета получает данные о сформированном монтаже (за 2...4 часа до начала процесса прокатки) и производит последовательный расчет процесса прокатки по всем чистовым клетям стана, на основании которого рассчитываются режимы смазывания и охлаждения рабочих валков. Модель позволяет на этапе формирования монтажных партий с учетом влияния внешних технологических факторов прогнозировать с вероятностью 85...87% следующие характеристики: тепловое состояние (распределение температуры) прокатываемой заготовки; тепловое состояние рабочих валков (распределение температуры и тепловой профиль).

Внедренное ПО позволяет рассчитать и выдать рекомендации по объемам СМ и охладителя в зависимости от режимов прокатки для каждой из прокатных клеток, в том числе и в автоматическом режиме в системе АСУТП. Результатом работы программы являются рекомендации по настройке системы смазывания и охлаждения, при которых температура рабочих валков должна находиться в заданном температурном диапазоне.

На следующем этапе произведено внедрение режимов подачи СМ в чистовой группе клеток стана. Разработан и численно реализован алгоритм управления расходами СМ, который позволяет выдавать рекомендации по назначению расходов СМ

пользованием математической модели теплового состояния рабочих валков. С этой целью в разработанном ПО был реализован численный эксперимент в виде многофакторной модели, в котором в качестве варьируемых факторов исследовались: координата X (мм), координата Y(мм), угол наклона коллектора φ (град), а также давление в системе (МПа). Расчетная схема приведена на рисунке 12в.

Практическим решением поставленной задачи является определение координат местоположения коллекторов всех исследуемых систем. Результаты внедрены в технологический процесс, оформлены технологические письма (3 шт.), по которым осуществляется технологический процесс. Практическое значение полученных результатов приведено в таблице 4.

Таблица 4. Снижение температуры и величины съема рабочих валков в непрерывной черновой и чистовой группах клетей НШСПП 2000 ПАО «ММК»

Номер клетки	Температура до внедрения, °С	Температура после внедрения, °С	Среднее значение падение температуры, °С (%)	Среднее значение уменьшение съема, %
Черновая группа клетей				
4	70	59	11(15)	10,21
5	67	56	10(16)	9,72
6	75	65	10(13)	11,2
Чистовая группа клетей				
7	85	79	6(7)	5,2
8	87	80	7(8)	6,3
9	87	79	8(9)	6,5
10	87	79	8(9)	4,5
11	88	79	9(10)	6,3
12	88	79	9(10)	5,8
13	89	79	10(11)	5,3

Экономический эффект от внедрения комплекса технических и технологических решений по повышению стойкости рабочих валков только в черновой непрерывной группе клетей составил 3,2 млн. рублей, что подтверждается соответствующими актами экономической эффективности.

Дальнейшие исследования направлены на разработку и внедрение рекомендаций по назначению расходов охладителя в системе охлаждения рабочих валков и системе принудительного снижения температуры поверхности полосы перед входом в очаг деформации.

С целью корректировки используемых режимов охлаждения валков и полосы, предложена новая классификация прокатываемых монтажных партий, учитывающая средний вес ($W_{срi}$, т), толщину (H_i , м) и суммарную длину прокатываемых полос (ΣL_i , м), отличающуюся учетом коэффициента ($k_L = W_{срi}/L_{сум}$), учитывающий суммарную длину прокатываемого монтажа ($L_{сум}$, м). Определены границы предложенного показателя $W_{срi}$, а также коэффициента k_L , данные приведены в таблице 5.

Практической реализацией внедрения результатов исследования является разработка рекомендаций по назначению расходов охладителя при прокатке различных монтажей. Разработанные рекомендации систематизированы и сведены в таблицу 5.

Полученные результаты внедрены в условиях действующего производства, что позволило добиться следующих результатов: снизить энергозатраты (токовые нагрузки главных приводов) на 7...10 %, а также повысить срок службы валков 9...11 %.

На основе математического моделирования определено оптимальное местоположение коллекторов системы принудительного снижения температуры полосы перед входом в очаг деформации и определен расход охладителя, при котором возможно достичь максимального эффекта, заключающегося в снижении температуры поверхности прокатываемой полосы на 22...55⁰С (15...17%). С учетом кинематических параметров процесса прокатки теоретически определено, что максимальная глубина падения температуры должна составлять не более 3...5% от поверхности, что позволяет реализовать условия для восстановления теплового состояния полосы непосредственно после выхода из контакта с валком за счет тепловыделения при пластической деформации в условиях теплового равновесия.

Таблица 5. Рекомендации по назначению расходов охладителя по клетям

Характеристики монтажа		Чистовая группа клеток стана 2000 г.п. ПАО «ММК»						
Значение $W_{cp,т}$	Значение коэффициента k_L	7	8	9	10	11	12	13
		Процент открытия гидрозатвора системы охлаждения рабочих валков (%)						
$W_{cp} < 2150$	$k_L \leq 0,025$	100	100	100	95	95	90	90
	$k_L > 0,025$	100	100	95	90	90	85	75
$2150 \leq W_{cp} \leq 2850$	$k_L \leq 0,025$	100	100	100	95	95	90	85
	$k_L > 0,025$	100	100	95	95	95	85	80
$W_{cp} > 2850$	$k_L \leq 0,025$	100	100	100	95	95	95	90
	$k_L > 0,025$	100	100	100	95	95	90	90

Для системы принудительного снижения температуры поверхности полосы в зависимости от характеристики прокатываемого монтажа (W_{cp} , т.) определено оптимальное местоположение коллекторов (рис.15 в) и объем подаваемого на поверхность полосы охладителя, составляющий 55...60 м³/ч.

С целью исключения попадания охладителя в очаг деформации разработана и внедрена система водовоздушной завесы, в конструкции которой применяются специально разработанные форсунки, защищенные патентом РФ №110663. Схема расположения исследуемых систем представлена на рисунке 13.



Рисунок 13. а – системы принудительного снижения температуры поверхности полосы и водовоздушной завесы; б – форсунки системы водовоздушной завесы (патент РФ №110663); в – форсунки системы водовоздушной завесы, внедренные в условиях действующего производства

Внедрение предложенных технических решений на НШСГП 2000 ПАО «ММК» позволило достигнуть дополнительного снижения температуры рабочих валков на 3...5⁰С (4...6%). Результаты наблюдений показали, что существенного отклонения

контролируемых параметров качества полос на участке прокатки (механические повреждения в виде рисок, царапин, отклонение от заданных размеров и т.д.) при внедрении результатов не наблюдалось.

Предложенные новые технические решения системы водовоздушной завесы (система обеспыливания) прошли промышленную апробацию на НШСП 2500 ПАО «ММК». Система водовоздушной завесы, в конструкции которой также применяются специально разработанные форсунки, (патент РФ №110663) была установлена за последней чистой клетью стана. Внедрение новой системы позволило снизить абразивный износ: опорных валков с $8,3 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $0,81 \cdot 10^{-5}$ кг/т и рабочих валков с $4,0 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $3,9 \cdot 10^{-5}$ кг/т соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации на основе выполненных исследований изложены комплексные научно-технические и технологические решения, направленные на снижение энерго-силовых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков, заключающиеся в развитии методологии комплексного совершенствования технологии и оборудования для смазывания и охлаждения валков листовых станов горячей прокатки, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие металлургической промышленности.

В процессе проведенных теоретических и практических исследований получены следующие результаты и выводы.

1. Проведены теоретические, экспериментальные и промышленные исследования влияния режимов подачи смазочного материала на снижение энерго-силовых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков в четырехвалковых узлах («кварто»). Для системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» на основе проведенных исследований предложена и разработана методология совершенствования технологии и оборудования для смазывания рабочих валков листовых станов горячей прокатки. Для технологии листовой горячей прокатки с учетом разработанной методологии, предложены показатели эффективности (Ξ_i), на основе которых разработаны и внедрены **эффективные** режимы подачи смазочного материала.
2. Разработан комплекс физических и математических моделей, описывающих подачу смазочного материала в четырехвалковые узлы листовых станов горячей прокатки. На основе численного моделирования процесса формирования смазочного слоя на контакте «опорный валок - рабочий валок» предложена научно обоснованная новая теоретическая зависимость толщины смазочного слоя и расхода смазочного материала на контакте «опорный валок – рабочий валок», отличающаяся учетом коэффициентов, описывающих изменение параметров шероховатости опорных ($k_{ш}^{оп}(t)=0,07...0,83$) и рабочих ($k_{ш}^{раб}(t)=0,08...0,37$) валков. Для технологии производства ЛПП разработаны режимы подачи смазочного материала, учитывающие изменение параметров шероховатости рабочих и опорных валков.
3. С помощью метода физического моделирования и теории планирования эксперимента исследовано влияние режимов подачи смазочного материала на эксплуатационные показатели рабочих валков. Получены регрессионные зависимости, описывающие влияние режимов подачи смазочного материала и его количества на изменение энерго-силовых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также на эксплуатацион-

ные показатели рабочих валков. С целью снижения энергосиловых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также повышения эксплуатационной стойкости рабочих валков определены рациональные режимы подачи смазочного материала.

4. С учетом предложенных режимов смазывания для системы «опорный валок – рабочий валок» и «рабочий валок – полоса» разработана и численно реализована математическая модель процесса изнашивания рабочих валков в процессе прокатки с наличием смазочного материала и без него, учитывающая изменяющиеся режимы их смазывания и охлаждения. В условиях действующего производства, экспериментально-аналитическим путем определены показатели интенсивности изнашивания рабочих валков ($J_{0,1}$, мм³/Нм). При отсутствии СМ: $J_0=(4,18...6,13 \times 10^{-9})$ мм³/Нм; в случае применения СМ: $J_1=(3,48...4,12 \times 10^{-9})$ мм³/Нм.

5. Создана, научно и технически обоснована методология настройки и управления системой охлаждения рабочих валков и полосы, отличающаяся от известных применением последовательно реализованных и взаимосвязанных комплексных математических моделей, описывающих изменение теплового состояния валков и полосы. На основе предложенной методики разработана двухмерная математическая модель, описывающая процесс теплообмена в системе «рабочий валок – полоса». Модель учитывает основные закономерности формирования температурных условий процесса листовой горячей прокатки: теплообмен полосы с валками; объемное тепловыделение при пластической деформации полосы; изменение теплового состояния полосы с учетом работы следующих технологических систем: гидроудаления окалина; межклетевого охлаждения, а также принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации. Разработанная модель адекватно описывает изменение теплового состояния горячекатаной полосы и рабочих валков, что позволяет определять расход и давление охладителя, расположение коллекторов и форсунок для достижения максимального теплосъема с охлаждаемых поверхностей.

6. На основе предложенных методик и алгоритмов разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее на этапе формирования монтажных партий (за 2...4 часа до начала процесса прокатки) в зависимости от технологических режимов прокатки: скорости прокатки, обжатия, температуры валков и полосы, свойств прокатываемой заготовки ($\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$) рассчитывать и выдавать рекомендации по объему подаваемого смазочного материала и охладителя, в том числе в автоматическом режиме для АСУТП. Разработанное ПО внедрено в условиях действующего производства.

7. Создана, научно и технически обоснована методология комплексного совершенствования технологии и оборудования охлаждения валков листовых станов горячей прокатки. Разработанная методология отличается от известных применением и последовательно реализованных и взаимосвязанных комплексных математических моделей, описывающих изменение теплового состояния валков и полосы, что позволяет определять расход и давление охладителя, расположение коллекторов и форсунок для достижения максимального теплосъема с охлаждаемых поверхностей. Практическая реализация предложенной методологии позволяет настраивать и управлять системой охлаждения рабочих валков и полосы листовых станов горячей прокатки с целью повышения эксплуатационной стойкости рабочих валков в четырехвалковых узлах («кварто»).

8. Разработаны новые технические и технологические решения, направленные на снижение энергосиловых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков при производстве ЛГП. Новизна технических решений подтверждена патентами РФ на изобретения (№ 2457913, №2666396), патентами РФ на полезные модели (№ 110663, №152330), а также свидетельствами о регистрации государственных программ для ЭВМ (6 шт.), описывающими

ми процессы функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса». Для листовых станов горячей прокатки, на примере НШСГП 2000 и 2500 ПАО «ММК», внедрены практические результаты исследований, что подтверждается соответствующими документами об испытаниях и внедрениях.

9. Разработана технология и режимы подачи СМ на поверхность опорных валков для четырехвалковых клетей, учитывающие геометрические и прочностные характеристики прокатываемых полос. Практическое применение предложенных режимов позволило добиться снижения энергосиловых (токовые нагрузки главных приводов) параметров на 7...10%, а также фрикционных параметров процесса (расчетное значение момента трения) на 8...13%, что позволило увеличить эксплуатационную стойкость рабочих валков в 1,10...1,15 раза, что составляет 9...11 эксплуатационных часов (9...11%).

10. Произведено совершенствование технологического оборудования системы охлаждения рабочих валков для непрерывной четырехвалковой черновой и чистовой групп клетей за счет применения нового алгоритма для определения рационального местоположения коллекторов и разработки рекомендаций по объему подаваемого охладителя. Фактический эффект от внедренных технических и технологических решений по настройке системы охлаждения рабочих валков выражается в дополнительном увеличении их срока службы на 8...12% (8...12 эксплуатационных часов), которые были достигнуты:

- для **черновой группы клетей**: произведены разработка и внедрение нового оборудования (коллектора охлаждения), что позволило достигнуть снижения средней температуры рабочих валков на 10...11⁰С, что составляет 13...16%;

- для **чистовой группы клетей**: произведена настройка системы охлаждения, определены рациональные параметры местоположения коллекторов и количество подаваемого охладителя. Внедрение результатов позволило добиться снижения средней температуры валков на 6...10⁰С, что составляет 7...11%;

- для **чистовой группы клетей**: произведена настройка системы охлаждения поверхности полосы перед входом в очаг деформации; определены рациональные параметры геометрического местоположения коллекторов и количество подаваемого охладителя. Внедрение результатов позволило достигнуть **дополнительного** снижения температуры рабочих валков непрерывной чистовой группы клетей на 3...5⁰С, что составляет 4...6%.

11. Предложена новая классификация прокатываемых монтажных партий, учитывающая средний вес ($W_{ср}$, т), толщину (H_i , м) и суммарную длину прокатываемых полос ($\sum L_i$, м), а также коэффициент ($k_L = W_{ср}/L_{сум}$), учитывающий суммарную длину монтажа ($L_{сум}$, м). Определены границы предложенного показателя $W_{ср}$, а также коэффициента k_L . Предложенная классификация позволяет корректировать используемые режимы охлаждения валков и полосы, определять количество подаваемого СМ и охладителя на поверхность рабочих валков и полосы.

12. Предложены новые технические решения (патент РФ №110663) с целью исключения попадания охладителя в очаг деформации, а также снижения общего уровня запыленности. Внедрение новой системы обеспыливания позволило снизить абразивный износ опорных валков с $8,3 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $0,81 \cdot 10^{-5}$ кг/т и рабочих валков с $4,0 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $3,9 \cdot 10^{-5}$ кг/т соответственно.

13. Подтвержденный экономический эффект от внедрения комплекса технических и технологических решений по повышению стойкости рабочих валков на НШСГП 2000 ПАО «ММК» в черновой непрерывной группе клетей составил 3,2 млн. рублей, а суммарный экономический эффект от внедренных решений составляет более 80 млн. рублей.

Достижение заявленного уровня снижения потребляемых ресурсов выражается в снижении себестоимости выпускаемой продукции, что позволяет использовать результаты работы на металлургических предприятиях РФ и расширить рынки сбыта металлопроката, а также усилить их экспортный потенциал.

Результаты диссертационных исследований используются в преподавании ряда учебных дисциплин при подготовке магистров направления 15.04.01 – «Машиностроение» по профилю «Машины и технология обработки металлов давлением».

ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

– в рецензируемых научных журналах и изданиях (из перечня ВАК):

1. Дёма, Р.Р. Исследование энергоэффективности горячей прокатки методами статистического моделирования на примере НШСГП 2000 ПАО ММК / Р.Р. Дёма // Сталь. – 2018. – № 12. – С. 31-34.
2. Дёма, Р.Р. Совершенствование системы охлаждения прокатных валков черновой группы клетей на листовом стане горячей прокатки/ Р.Р. Дёма // Производство проката.– 2018.– № 12. – С. 15-21.
3. Платов, С.И. Совершенствование технологии горячей прокатки с целью снижения дефекта «вкатанная окалина» / С.И. Платов, Р.Р. Дёма, О.Р. Латыпов и др. // Технология металлов. – 2020.– № 11. – С. 38-45.
4. Платов, С.И. Разработка модели прогнозирования энергосиловых параметров горячей прокатки при подаче смазочного материала на валки / С.И. Платов, Р.Р. Дёма, М.В. Харченко и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019.– № 12. – С. 93-99.
5. Дёма, Р.Р. Компьютерное и математическое моделирование процесса горячей прокатки с применением смазочных материалов в программном комплексе Deform-3D. Сообщение 1. Физическое и компьютерное моделирование процесса горячей прокатки со смазочными материалами на машине трения СМЦ-1 / Р.Р. Дёма, О.Р. Латыпов, О.Б. Калугина и др. // Производство проката. – 2019.– № 8. – С. 21-28.
6. Дёма, Р.Р. Компьютерное и математическое моделирование процесса горячей прокатки с применением смазочных материалов в программном комплексе Deform-3D. Сообщение 2. Компьютерное моделирование процесса контактного взаимодействия «опорный валок-рабочий валок» при листовой горячей прокатке с применением технологической смазки / Р.Р. Дёма, С.И. Платов, М.В. Харченко и др. // Производство проката. – 2019.– № 9. – С. 8-12.
7. Харченко, М.В. Компьютерное и математическое моделирование процесса горячей прокатки с применением смазочных материалов в программном комплексе Deform-3D. Сообщение 3. Исследование напряженного состояния в системе «опорный валок-рабочий валок» при листовой горячей прокатке с применением технологической смазки / М.В. Харченко, С.И. Платов, Р.Р. Дёма и др. // Производство проката. – 2019. – № 11. – С. 13-18.
8. Дёма, Р.Р. Опыт применения отечественного смазочного материала "Росойл-МГП" в технологии производства полосы на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки / Р.Р. Дёма, М.В. Харченко, В.Ю. Шолом и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2018. – №11. – С. 27-32.

9. Дёма, Р.Р. Компьютерное моделирование и исследование процесса горячей прокатки на базе программного комплекса Deform-3D / Р.Р. Дёма, С.И. Платов, А.В. Козлов и др. // Производство проката. – 2018. – № 11. – С. 36-40.
10. Харченко, М.В. Универсальный испытательный комплекс по определению триботехнических характеристик смазочных материалов на базе серийной машины трения СМЦ-1 / М.В. Харченко, Р.Р. Дёма, С.П. Нефедьев и др. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 10 (691). – С. 60-68.
11. Абрамов А.Н. Исследование условий формирования адсорбционного монослоя в линейном фрикционном контакте на поверхностях трения с использованием безабразивного смазочного материала / А.Н. Абрамов, М.В. Харченко, Р.Р. Дёма // Известия высших учебных заведений. Машиностроение.– 2017. – № 2 (683). – С. 70-78.
12. Абрамов, А.Н. Исследование влияния различных режимов смазывания валков стана горячей прокатки на межвалковый момент трения с помощью физического моделирования процесса на лабораторной установке / А.Н. Абрамов, М.В. Харченко, Р.Р. Дёма и др. // Производство проката. –2016. – № 12. – С. 8-12.
13. Дёма, Р.Р. Статистическая оценка влияния смазочного материала на энергосиловые параметры горячей прокатки / Р.Р. Дёма, Р.Н. Амиров, У.Д. Мартынова, и др. // Сталь. – 2015. – № 8. – С. 40-42.
14. Дёма, Р.Р. Теоретическое исследование влияния режимов подачи смазочного материала на изменение энергозатрат при горячей прокатке на стане 2000 ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" / Р.Р. Дёма, М.В. Харченко, А.А. Горбунова // Производство проката. – 2013. – № 2. – С. 11-13.
15. Дёма, Р.Р. Расчет усилий при горячей прокатке на стане 2000 ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" с применением системы подачи технологической смазки на основе учета напряженно-деформированного состояния в очаге деформации / Р.Р. Дёма, М.В. Харченко, А.А. Горбунова // Производство проката. – 2013. – № 3. – С. 14-16.
16. Платов, С.И. Влияние смазочного материала на изменение энергосиловых параметров прокатки в непрерывной группе клетей стана 2000 горячей прокатки ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / С.И. Платов, Р.Н. Амиров, Р.Р. Дёма, и др.// Производство проката. – 2013. – № 11. – С. 09-14.
17. Платов, С.И. Разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности эксплуатации системы подачи технологической смазки при прокатке на НШСГП 2000 ОАО «ММК» / С.И. Платов, Р.Р. Дёма, М.В. Харченко и др. // Сталь. –2012. – № 2. – С. 52-55.
18. Платов, С.И. Разработка и внедрение технологии охлаждения прокатных валков с целью повышения их эксплуатационных характеристик на широкополосном стане 2000 ОАО «ММК» / С.И. Платов, Р.Р. Дёма, С.И. Лукьянов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2012.– № 2 (38). – С. 100-101.
19. Платов, С.И. Эффективность процесса горячей прокатки с подачей смазочного материала между опорным и рабочим валками на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 2000 ОАО «ММК» / С.И. Платов, М.И. Румянцев, Р.Р. Дёма, М.В. Харченко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 4 (36). – С. 19-21.

– в научных изданиях, входящих в международные наукометрические базы (WOS и Scopus):

20. Levantsevich, M.A. Study of the conditions for the formation of an adsorption lubrication mode of heavily loaded friction couples with modeling in a laboratory setup / M.A. Levantsevich, M.V. Kharchenko, R.R. Dema // *Journal of Friction and Wear*. – 2019. – Vol. 40. – № 4. – P. 277-283 (WOS, Scopus Q2).
21. Platov, S.I. Experience of application of liquid lubricating materials during wide strip hot rolling / S.I. Platov, R.R. Dema, M.V. Kharchenko and et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering "3rd International Scientific and Technical Conference on Scientific and Technical Progress in Ferrous Metallurgy, SATPIFM 2017"*. – 2017. – Vol. 287. – P. 012011. (WOS, Scopus)
22. Kharchenko, M.V. Energy reduction technologies based on the lubricant supply in the roll contact system "quarto" during the hot strip rolling // M.V. Kharchenko, R.R. Dema, V.I. Biliichenko // *Materials Science Forum*. – 2016. – Vol. 870. – P. 446-453. (Scopus Q3)
23. Dema, R.R. Dependents of energy consumption at the wide-strip hot rolling on a mode option of rolls lubrication modeling // R.R. Dema, O.B. Kalugina, N.Sh. Tyuteryakov // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017*. – 2017. – P. 8076435. (Scopus)
24. Tyuteryakov, N.S. Simulation and calculation of temperature distribution in roll fittings' guides in contact with the rolled strip / N.S. Tyuteryakov, R.R. Dema, S.P. Nefed'Ev // *Procedia Engineering "2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016"*. – 2016. – Vol. 150. – P. 667-673. (Scopus)
25. Vorozhishchev, A.N. Modeling of a thermal massive body depending on the cooling liquid volume, as exemplified by rolls for a hot-rolling mill / A.N. Vorozhishchev, R.R. Dema, T.V. Kazakova // *Procedia Engineering "2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016"* – 2016. – Vol. 150. – P. 1007-1012. (Scopus)
26. Dema, R.R. Determining the parameters effecting the work of the lubricants supplying system at wide-strip hot rolling / R.R. Dema, R.N. Amirov, O.B. Kalugina // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2019. – P. 929-937. (Scopus Q3)

– в монографиях:

27. Дёма, Р.Р. Подача смазочного материала на валки и повышение энергоэффективности процесса прокатки путем выбора рациональных режимов смазывания: монография / Р.Р. Дёма, А.В. Ярославцев, К.К. Ахметова и др. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – 113 с.

– в полученных патентах на изобретения и полезную модель:

28. Пат. 2457913 РФ, МПК В21В 27/10 (2006.01). Способ охлаждения рабочих валков станов горячей прокатки / С.В. Дубовский, С.И. Платов, Д.В. Терентьев, Р.Р. Дёма и др. Заявл. 10.02.2011; опубл. 10.08.2012. Бюл. № 22.
29. Пат. 2666396 РФ, МПК В24В 39/04 (2006.01). Способ отделочно-упрочняющей обработки выглаживанием цилиндрических поверхностей / А.В. Горбунов, С.П. Нефедьев, М.В. Харченко, Р.Р. Дёма, и др. Заявл. 21.12.2016; опубл. 25.06.2018. Бюл. № 18.
30. Пат. 152330 РФ, МПК В21В27/06 (2006.01). Устройство для охлаждения прокатных валков / Р.Р. Дёма, Р.Н. Амиров, С.П. Нефедьев, и др. Заявл. 12.01.2015; опубл. 20.05.2015. Бюл. № 14.
31. Пат. 110663 РФ, МПК В05В 1/34 (2006.01). Устройство для распыления жидкости / С.И. Платов, Р.Р. Дёма, Д.А. Кувшинов. Заявл. 14.06.2011; опубл. 27.11.2011. Бюл. № 33.

– в полученных программах для ЭВМ, защищенных правоустанавливающими документами Российской Федерации:

32. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018618671. Расчет температурного поля полосы широкополосных станов горячей прокатки / Р.Р. Дёма, А.В. Колдин, Р.Н. Амиров. Заявл.13.06.2018, опубл. 11.07.2018, Бюл. №10.

33. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018615492 .Расчет температурного поля твердого тела в полярной системе координат/ Дёма Р.Р., Колдин А.В., Амиров Р.Н.// Заявл.31.05.2018, опубл. 11.05.2018, Бюл. №4.

34. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016610433. Расчет оптимального положения коллектора охлаждения рабочего валка стана для максимального соответствия заданному диапазону температур / А.Н. Ворожищев, А.В. Ярославцев, Р.Р. Дёма. Заявл.25.11.2015, опубл. 12.01.2016, Бюл.№5.

35. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016610434. Автоматизированный расчет теплового состояния поверхностного слоя рабочего валка стана с учетом положения охлаждающих коллекторов / А.Н. Ворожищев, А.В. Ярославцев, Р.Р. Дёма. Заявл. 25.11.2015, опубл. 12.01.2016, Бюл. №5.

36. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015616747. Расчет энергозатрат на широкополосных станах горячей прокатки / Р.Р. Дёма, С.И. Платов, А.В. Ярославцев и др. Заявл.22.06.2015, опубл. 20.07.2015, Бюл. №6.

37. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013612829. Разработка технологии прокатки горячекатаной полосы при подаче смазочного материала в межвалковый зазор / А.В. Ярославцев, С.И. Платов, Р.Р. Дёма и др. Заявл.14.03.2013, опубл. 20.06.2013, Бюл. №4.

– в других изданиях:

38. Дёма, Р.Р. Определение воздействующих параметров на эффективность работы системы подачи технологической смазки непрерывных широкополосных станов горячей прокатки / Р.Р. Дёма, Р.Н. Амиров, М.В. Харченко и др. // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2016. – № 4 (4). – С. 27-31.

39. Дёма, Р.Р. Результаты опытной эксплуатации и сравнительная оценка эффективности отечественного смазочного материала "РОСОЙЛ-МГП" в технологии производства горячего проката / Р.Р. Дёма, М.В. Харченко // В сборнике: Трибология - машиностроению Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. –2018. – С. 168-171.