

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»



На правах рукописи

ДЁМА РОМАН РАФАЭЛЕВИЧ

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора технических наук

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Научный консультант
Платов Сергей Иосифович,
доктор технических наук, профессор.

Магнитогорск – 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	6
1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО ГОРЯЧЕКАТАНОГО ПРОКАТА.....	21
1.1 Современные тенденции развития технологии и оборудования производства листового горячекатаного проката.....	24
1.2 Технология и оборудование производства листового горячекатаного проката.	27
1.3 Анализ известных решений, направленных на снижение потребляемых ресурсов при производстве листового горячекатаного проката	33
1.4 Анализ известных методов математического описания технологических процессов при производстве горячекатаного проката.....	36
1.4.1 Алгоритмическая структура управления тепловым режимом в непрерывных черновых и чистовых клетях листовых станов горячей прокатки	44
1.4.2 Анализ известных методов математического описания тепловых процессов функционирования системы «рабочий валок – полоса»	46
1.5 Цель и постановка задач исследования	56
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ОПОРНЫЙ ВАЛОК – РАБОЧИЙ ВАЛОК – ПОЛОСА» С ПОДАЧЕЙ ЖИДКИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КЛЕТЕЙ ЛИСТОВЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ	61
2.1 Моделирование процесса листовой горячей прокатки. Численная реализация модели.....	63
2.2 Исследование функционирования системы «опорный валок – рабочий валок» и «рабочий валок – полоса» для условия подачи жидких смазочных материалов.....	76

2.2.1 Моделирование контактного взаимодействия в системе «опорный валок-рабочий валок» с наличием смазочного материала	78
2.3 Моделирования процесса контактного взаимодействия в системе «опорный валок – рабочий валок» с наличием смазочного материала.....	91
Выводы по второй главе.....	107
3. ЛАБОРАТОРНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПОДАЧИ ЖИДКИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ОПОРНЫЙ ВАЛОК – РАБОЧИЙ ВАЛОК – ПОЛОСА»	109
3.1 Лабораторное исследование влияния режимов подачи смазочных материалов.	111
3.2 Разработка расчетной (прогнозной) модели параметра «Сила тока» электродвигателей чистовой группы клетей листового стана горячей прокатки	134
3.3 Моделирование процесса изнашивания рабочих валков листовых станов горячей прокатки. Определение показателей эффективности.	140
3.4 Методология комплексного функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» и совершенствование технологии для смазывания валков листовых станов горячей прокатки	167
Выводы по третьей главе	170
4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ «РАБОЧИЙ ВАЛОК – ПОЛОСА»	172
4.1 Математическое моделирование теплового состояния прокатываемой полосы.....	174
4.1.1 Численная реализация математической модели и исследование теплового состояния прокатываемой полосы.....	177
4.1.2 Математическое моделирование теплового состояния прокатываемой полосы с учетом дополнительных технологических систем.....	181

4.1.3 Численная реализация модели теплового состояния полосы с учетом дополнительных технологических систем	189
4.1.4 Оценка достоверности разработанной математической модели теплового состояния прокатываемой полосы.....	197
4.1.5 Выводы по результатам моделирования теплового состояния прокатываемой полосы	199
4.2 Моделирование теплового состояния рабочих валков листовых станов горячей прокатки.....	201
4.2.1 Численная реализация математической модели и исследование теплового состояния рабочих валков	207
4.2.2 Оценка достоверности разработанной математической модели теплового состояния рабочих валков	214
4.2.3 Выводы по результатам моделирования теплового состояния рабочих валков.....	217
4.3 Разработка принципов совершенствования оборудования и применения технологии эффективного охлаждения для системы «рабочий валок – полоса».....	218
4.4 Методология комплексного функционирования системы «рабочий валок – полоса», совершенствование технологии и оборудования охлаждения валков листовых станов горячей прокатки.	229
Выводы по четвертой главе	231
5. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИСТОВОГО ГОРЯЧКАТАНОГО ПРОКАТА	234
5.1 Разработка комплексной математической модели для определения режимов смазывания и охлаждения рабочих валков при производстве листового горячекатаного проката.....	234
5.2 Практическая реализация математической модели	238
5.3 Определение расходов охладителя в непрерывной чистовой группе клетей листовых станов горячей прокатки.....	243

5.3.1 Разработка режимов подачи смазочного материала	248
5.3.2 Выводы по результатам реализации математической модели управления процессами подачи смазочного материала и охлаждения рабочих валков	251
5.4 Совершенствование оборудования системы охлаждения рабочих валков	254
5.4.1 Разработка мероприятий по совершенствованию оборудования системы охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей.....	255
5.4.2 Разработка мероприятий по совершенствованию системы охлаждения рабочих валков в непрерывной чистовой группе клетей.....	263
5.4.3 Оценка эффективности предложенных технических решений	273
5.5 Численное определение режимов охлаждения в непрерывной чистовой группе клетей.....	280
5.6 Разработка мероприятий по совершенствованию технологии и оборудования системы принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации	286
Выводы по пятой главе.....	295
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	304
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	335

ВВЕДЕНИЕ

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 НШСП.

Для снижения уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛПП 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 ЛПП 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., Горбатюк 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.

Подача 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. Структурное представление цели, задач и практической значимости диссертационной работы представлено на рисунке 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 ЛГП с использованием методов физического и математического моделирования в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса» для четырехвалковых клеток 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 клеток 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 ЛГП.
6. Разработка комплекса научно обоснованных эффективных технических и технологических решений, направленных на снижение уровня потребляемых

ресурсов при производстве ЛГП, 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 ЛГП.

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».

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 ЛГП, направленные на повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков и снижение энергозатрат.

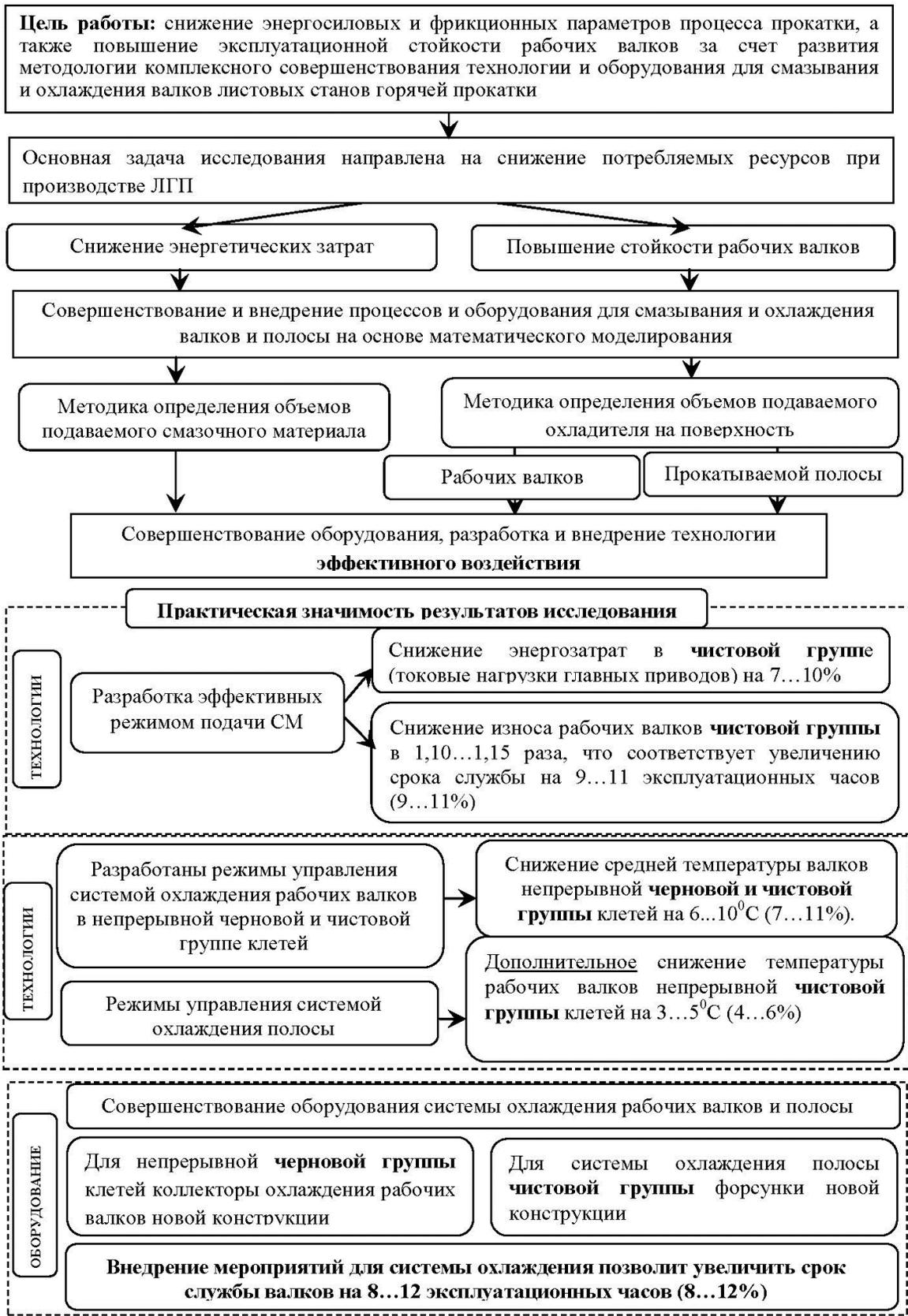


Рисунок 1 - Цели, задачи и практическая значимость диссертационной работы

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 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 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 НШСГП 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 клеток, 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 клеток 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 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%.

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.

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.

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» 2012-2017 гг. (с получением 2-ой золотой и 3-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 конференции (Пром-Инжиниринг, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет, г. Челябинск, 2016 г.);
- Международном конгрессе прокатчиков (Липецк 2015 г., Магнитогорск, 2017г.);
- 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».

Апробация результатов диссертационного исследования была проведена 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).

Личный вклад автора состоит в организации, проведении и непосредственном участии в теоретических, лабораторных и экспериментальных исследованиях. Автором лично произведен анализ и 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, из 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.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации и полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 05.02.09 - «Технологии и машины обработки давлением», а именно в части формулы специальности «Область науки и техники, изучающая и

формулирующая закономерности пластического деформирования различных материалов с целью создания технологий изготовления заготовок и изделий высокого качества, а также современных экономичных кузнечных, прессовых, штамповочных и прокатных машин, способных реализовать разработанные технологии. Изучение связей в системе заготовка – инструмент – машина и рациональный выбор способа приложения к заготовке деформирующих сил и технических характеристик машины позволяют снизить энергозатраты при работе машин, технологические отходы, улучшить условия труда, автоматизировать проектные работы и производство продукции».

В части области исследования:

- п.1. «Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки»;
- п.5. «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости штампового инструмента»;
- п.6. «Оптимизация конструкций разрабатываемых кузнечных, прессовых, штамповочных и прокатных машин, их взаимосвязь со средствами автоматизации и механизации»;
- п.7. «Технологии продольной и поперечно-винтовой прокатки заготовок деталей, методы конструирования деталей прокатных станков».

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.

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО ГОРЯЧЕКАТАНОГО ПРОКАТА

Черная металлургия является одной из крупнейших отраслей мировой промышленности. Согласно статистическим данным Всемирной стальной ассоциации World Steel Association (WSA) объём мирового производства стали составил: в 2018 г. – 1 730 млн. тонн, в 2019 г. – 1 840 млн. тонн. При этом, мировые мощности по выплавке стали за последние 10 лет выросли почти на 1 млрд. тонн, из которых примерно 88% приходится на азиатский регион [1].

Согласно аналитическим исследованиям [1], объём мирового экспорта плоского металлопроката превышает 230 млн. тонн в год. Ключевыми экспортерами являются азиатские страны: Китай (до 30%), Япония (15%), Южная Корея (14%). Крупными импортерами стали на рынке Европейского Союза являются страны: США (6%), Вьетнам, Ю. Корея и КНР (по 5%), Индия и Таиланд (по 4%). Последнее время наблюдаются изменения в структуре мировой торговли, например, заметно увеличение доли металлопроката из таких стран как Иран, Бразилия, Турция, а также снижение доли в мировой торговле, некоторых стран, например, Украины [1].

Российская Федерация (РФ) является достаточно заметным игроком на ранке мирового экспорта плоского металлопроката: доля мирового экспорта РФ составляет до 10%.

Металлургическая отрасль РФ является одной из ведущих в экономике страны. Суммарные инвестиции предприятий РФ металлургического комплекса в 2015 г. составили порядка 204 млрд. руб., за период 2015-2019 год – более 900 млрд. руб. Объемы производства стали в РФ за период с 1991 по 2018 год приведены на рисунке 1.1 [1].



Рисунок 1.1 - Производство стали в РФ, млн. тонн

Российский рынок горячекатаного проката ориентирован в первую очередь на внутренних покупателей. В 2014-2019 гг. на долю внутренних продаж продукции приходилось в среднем 80% от суммарного объёма производства. Основные показатели российского рынка горячекатаного проката представлены в таблице 1.1. При этом экспорт горячекатаного проката из России на мировой рынок также занимает существенную долю в объёме спроса. Необходимо отметить, что в экспорте черных металлов из РФ на мировой рынок большую долю занимают готовые изделия: нефтегазовые трубы, сортовой прокат, холоднокатаный прокат и прокат с покрытиями [1].

Таблица 1.1 - Основные показатели российского рынка горячекатаного проката (млн. тонн) [1,2] без учета толстолистового проката толщиной более 25 мм

Показатель, млн. тонн	Годы					
	2014 г	2015 г	2016 г	2017г	2018г	2019г
Производство	19,01	19,43	19,95	20,01	20,32	20,30
Потребление на внутреннем рынке	14,64	14,53	14,19	14,54	14,53	15,21
Экспорт	5,32	5,72	5,21	5,312	5,52	5,26
Доля экспорта в производстве	6%	8%	9%	8,5%	8%	10%

На рисунке 1.2 представлены основные потребители горячекатаного проката на внутреннем рынке РФ (по данным компании ПАО «Северсталь» [3]). По оценкам ПАО «Северсталь» в 2018 году вырос спрос на горячекатаную сталь в следующих секторах: автомобильная промышленность (+9%), машиностроение (+7%) и трубы большого диаметра (+15%) [3]. Детальный анализ рынка горячекатаного проката РФ показывает достаточно схожую картину и динамику продаж у всех крупных производителей металлопроката [3].



Рисунок 1.2 - Основные потребители горячекатаного проката на внутреннем рынке РФ, по данным ПАО «Северсталь» [3]

Ключевые игроки на отечественном рынке производителей металлопроката, а также структура отгрузки металлопроката на рынки РФ, по данным предприятия ПАО «ММК» за 2018 г [4] представлены на рисунке 1.3.

Особенностью рынка плоского металлопроката в РФ является высокая концентрация основных производителей, из которых можно выделить ведущие крупные предприятия, обеспечивающие более 70% внутреннего производства: ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат (ПАО «ММК»)), ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК») и ПАО «Северсталь».

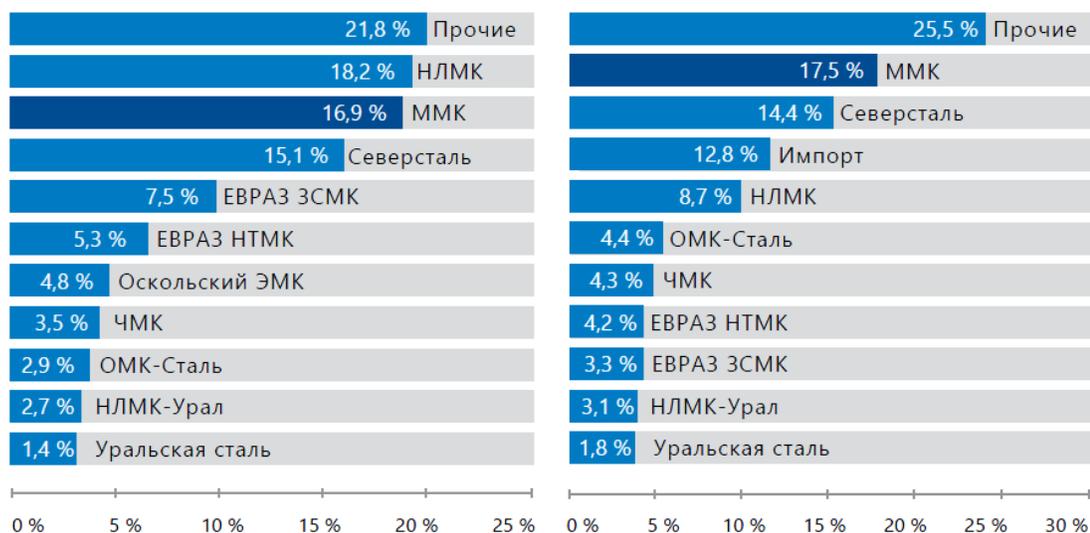


Рисунок 1.3 - Ключевые игроки на отечественном рынке производителей металлопроката и структура отгрузки металлопроката на рынки РФ, по данным ПАО «ММК» за 2018 г [4].

1.1 Современные тенденции развития технологии и оборудования производства листового горячекатаного проката

России на протяжении многих десятилетий удавалось удерживаться в списке лидеров данной отрасли благодаря наличию собственной сырьевой базы. Однако в первое десятилетие XXI века ситуация начала меняться: значительно укрепили свои позиции страны-экспортеры металлопродукции, такие как Китай, Индия и др., за счет запуска более высокоэффективного и высокотехнологичного производства [2].

Широкополосный листовой горячекатаный прокат (ЛГП) является одним из основных видов продукции черной металлургии. ЛГП выпускается в объеме десятков миллионов тонн ежегодно и около 60% продукции используется как подкат для станов холодной прокатки. Остальная часть продукции в виде горячекатаных полос и рулонов предназначена для выпуска сварных труб большого диаметра, изделий автомобилестроения, судостроения и других производств.

Анализ мирового уровня развития науки и техники в области производства ЛПП показывает, что требования к механическим и геометрическим характеристикам горячекатаного листа постоянно изменяются.

За последние 10 лет в России и за рубежом отмечается существенное изменение прокатываемого сортамента продукции на станах горячей прокатки. Достаточно существенно (на 15...20%) увеличилась доля проката из высокопрочных марок сталей [5]. К высокопрочным маркам стали предъявляются достаточно жесткие требования по механическим свойствам: прокат должен иметь высокую прочность (временное сопротивление разрыву), обладать высоким сопротивлением хрупкому и вязкому разрушению, иметь необходимое значение вязкости при температурах строительства и эксплуатации, обладать хорошей пластичностью и свариваемостью [6,7,8,9]. Для достижения указанных свойств разрабатываются и внедряются новые технологии и режимы прокатки, для которых необходимо обеспечивать эксплуатационные режимы работы основного и вспомогательного оборудования прокатных станов.

Металлургическим предприятиям для получения проката с новыми требованиями зачастую необходимо заниматься освоением новой технологии прокатки, что, в свою очередь, влечет за собой полную или частичную модернизацию действующего оборудования.

Так, например, на металлургических предприятиях РФ (ПАО «ММК», ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь» и др.) за последние десять лет наблюдается несколько тенденций в данном направлении:

– освоение проката из конструкционных марок сталей с содержанием углерода до 0,2 % и микролегированных ниобием, ванадием, титаном и другими элементами. При этом данные марки стали для получения требуемых механических свойств производятся по технологии контролируемой прокатки,

включающей в себя ускоренное охлаждение с получением полосы толщиной от 6 мм до 20 мм [10,11];

– освоение технологии прокатки на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки (НШСГП) тонких (меньшей, чем предусмотрено первоначальными проектами) горячекатаных полос, толщиной менее 1,5 мм. Особенностью данной технологии являются значительные обжатия, преимущественно в чистовых клетях, что приводит к увеличению скорости прокатки и увеличению машинного времени работы [12,13] стана.

Одновременное решение двух практически взаимоисключающих задач на современных станах приводит к ряду проблем: оборудование работает с завышенными технологическими параметрами, увеличено машинное время работы, что в свою очередь приводит к преждевременному износу основного и вспомогательного оборудования и выходу его из строя. Наблюдается несоблюдение теплового режима работы основного и вспомогательного оборудования, что приводит к локальному перегреву рабочих валков, и, в свою очередь, сказывается на качестве готового ЛГП.

С целью снижения производственных затрат листовые станы горячей прокатки оснащаются современными исполнительными механизмами и технологическими системами подачи смазочного материала (СМ), системами противоизгиба и осевой сдвижки рабочих валков. В связи с возрастающими темпами прокатки для стабилизации теплового профиля рабочих валов прокатные станы оснащаются современными системами охлаждения рабочих валков (СОВ). В зависимости от поставленных задач системы охлаждения позволяют регулировать и распределять объем поступающего охладителя по клетям. Устанавливаются коллекторы охлаждения секционного типа, позволяющие распределять объемы подаваемой воды по длине бочки валка. Необходимо также отметить внедрение новых систем, предназначенных для подачи охладителя на поверхность прокатываемой заготовки непосредственно

перед ее входом в очаг деформации. В литературе данную систему можно встретить под названием «система «антишелушения» или сокращенно «САШ». САШ установлена на двух крупных предприятиях РФ: ПАО «ММК», г. Магнитогорск и ПАО «НЛМК», г. Липецк [14].

Таким образом, предприятиям, выпускающим горячекатаный прокат, необходимо разрабатывать и внедрять передовые технические решения, ориентированные на ресурсо- и энергоэффективность процессов производства, поскольку данное направление производственной деятельности является стержневым механизмом достижения конкурентоспособности как для отдельных предприятий, регионов и отраслей, так и для национальной экономики в целом.

Внедрение новых технологий и модернизация действующего оборудования диктуют необходимость разработки новых математических моделей и подходов, направленных на снижение потребляемых ресурсов при производстве ЛГП.

Под **снижением потребляемых ресурсов** в работе принимается следующее: разработка и внедрение мероприятий, направленных на снижение энергозатрат при производстве ЛГП, а также повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков, заключающееся в снижении износа и уменьшении съема рабочего слоя при перешлифовке.

1.2 Технология и оборудование производства листового горячекатаного проката.

В настоящее время основное количество ЛГП производится на непрерывно широкополосовых станах горячей прокатки (далее по тексту НШСП) [15,16,17,18].

Небольшие объемы ЛГП производят на станах Стеккеля, на реверсивных универсальных станах [19,20], а также на полунепрерывных станах [17,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35].

Необходимо отметить современную тенденцию последних десятилетий: внедрение технологий совмещенного процесса «литье – прокатка» [33,34,35]. Внедряются технологии на принципиально новых агрегатах – тонкослябовых литейно-прокатных комплексах [36].

В состав оборудования широкополосных станов горячей прокатки обычно входят [17,21]: методические печи для нагрева, прокатные клетки (количество которых может достигать до 14 шт.), линия ускоренного (ламинарного) охлаждения, устройства для смотки прокатанного металла в рулоны.

Клетки, как правило, делят на две группы: черновую и чистовую. Между собой непрерывные группы черновых и чистовых клеток соединяют промежуточным рольгангом, который оснащен системой тепловой защиты (преимущественно системами типа «энкопанель»). Окалина с поверхности полос удаляется гидравлическими системами, струями высокого давления, которые иногда объединяется с роликовым окалиноломателем. Управление температурой полосы осуществляется системой межклетевого охлаждения [18]. Принципиальная схема процесса листовой горячей прокатки приведена на рисунке 1.4.

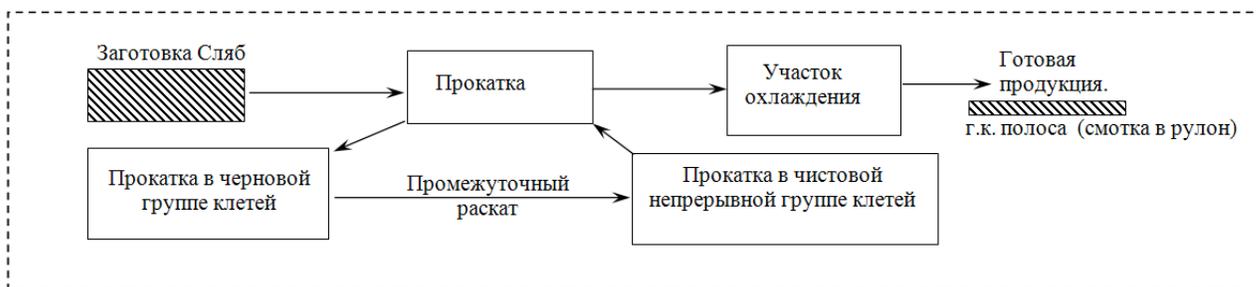


Рисунок 1.4 - Принципиальная схема процесса листовой горячей прокатки

Листовые станы горячей прокатки можно условно разделить по типу расположения оборудования:

- непрерывные, рисунок 1.5;
- полунепрерывные, рисунок 1.6;
- комбинированные, рисунок 1.7;

– 3/4-непрерывные, рисунок 1.8.

На рисунке 1.5 показана схема расположения оборудования непрерывного стана 2000 ПАО «НЛМК» [37]. Особенность данного стана заключается в том, что в черновой группе отсутствует возможность реверсивной прокатки. Полунепрерывные станы горячей прокатки (рисунок 1.6.) отличаются тем, что черновая группа дополнительно оснащена клетью (или несколькими клетями), в которых осуществляется реверсивная прокатка [37], что позволяет существенно уменьшить технологическую линию.

На рисунке 1.7. приведена схема расположения оборудования комбинированного стана горячей прокатки 2800/1700 ПАО «Северсталь». Преимущество данной схемы расположения оборудования заключается в возможности одновременно производить как толстый лист (толщиной до 50 мм), так и тонкие полосы (толщиной до 1,5 мм). Черновая группа преимущественно состоит из нескольких (чаще всего двух) реверсивных клеток. Чистовая группа клеток объединена в непрерывную группу. Количество клеток в чистовой группе обычно варьируется от шести до семи или восьми [37].

В состав оборудования 3/4-непрерывных станов горячей прокатки входит: черновая группа клеток, из которой одна или две реверсивные клетки, две нереверсивные клетки, объединяющиеся в одну непрерывную подгруппу [37]. На рисунке 1.8. приведена схема расположения основного оборудования 3/4-непрерывного стана 2050 компании «Baosteel».

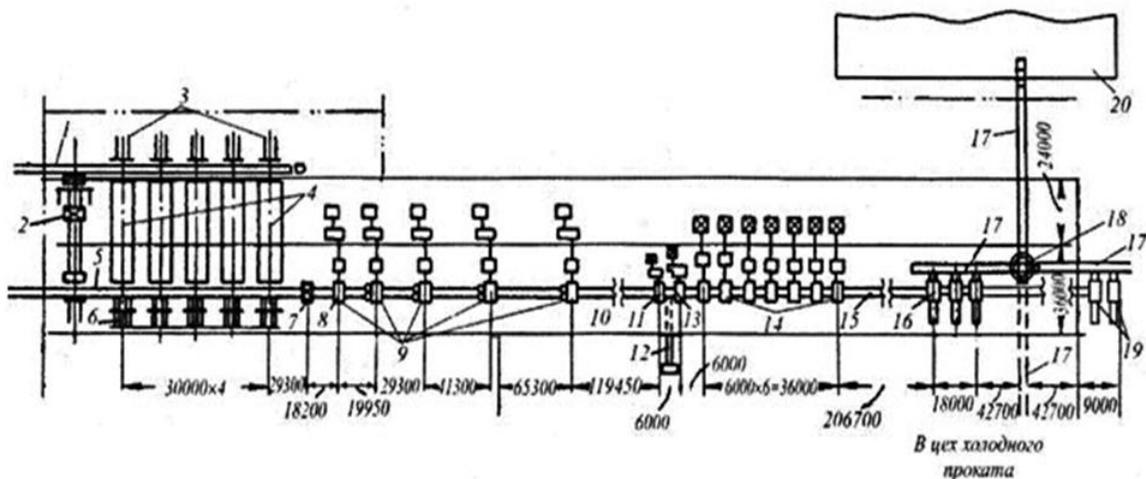


Рисунок 1.5 - Схема расположения основного оборудования непрерывного листового стана горячей прокатки [37]:

- 1 – печной рольганг; 2 – тележка для передачи слябов; 3 – толкатели слябов;
- 4 – нагревательные методические печи; 5 – приемный рольганг; 6 – приемник нагретых слябов; 7 – вертикальный окалиноломатель (ВОК); 8 – двухвалковая клеть; 9 – универсальные четырехвалковые клетки, 10 – промежуточный рольганг; 11 – летучие ножницы; 12 – конвейер для головной и донной обреза;
- 13 – чистовой двухвалковой окалиноломатель; 14 – чистовые четырехвалковые клетки; 15 – отводящий рольганг; 16 – моталки для смотки тонких полос;
- 17 – конвейеры; 18 – подъемно-переворотный стол; 19 – моталки для смотки толстых полос;
- 20 – склад рулонов и отделение листоотделки.

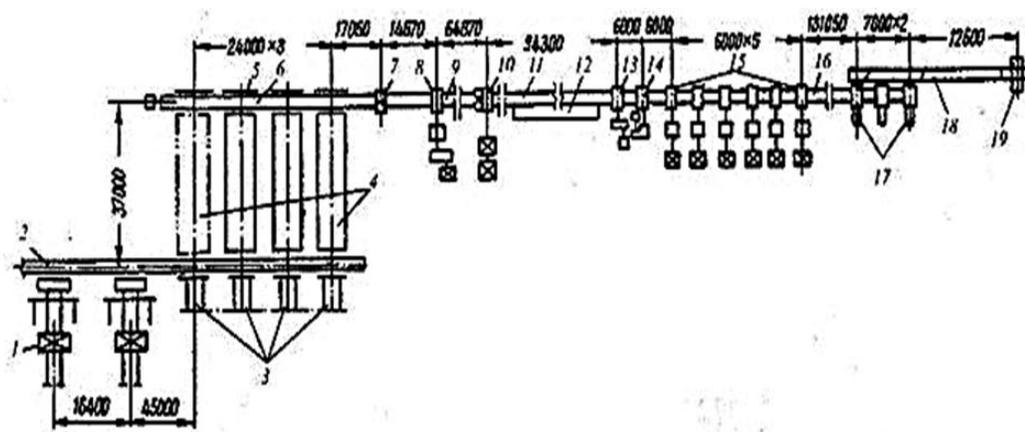


Рисунок 1.6 - Схема расположения основного оборудования полунепрерывного листового стана горячей прокатки [37]:

- 1 – передаточная тележка; 2 – печной рольганг; 3 – толкатели слябов; 4 – нагревательные методические печи; 5 – буферы (амортизаторы); 6 – приемный рольганг; 7 – клеть с вертикальными валками; 8 – двухвалковая клеть с горизонтальными валками; 9 – рольганг черновой группы клетей; 10 – реверсивная универсальная клеть; 11 – промежуточный рольганг; 12 – стеллаж для недокатов; 13 – летучие ножницы; 14 – чистовой двухвалковый окалиноломатель; 15 – чистовые четырехвалковые клетки; 16 – отводящий рольганг; 17 – моталки; 18 – конвейер рулонов; 19 – подъемно-переворотный стол.

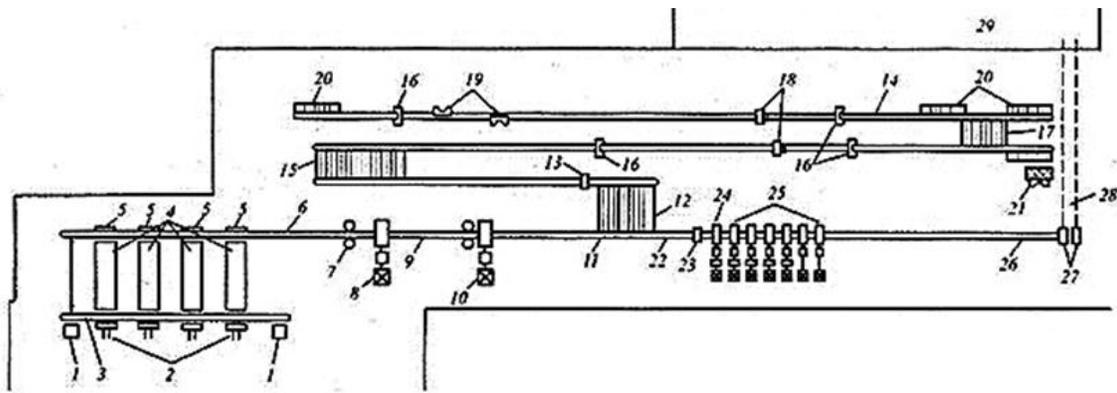


Рисунок 1.7 - Схема расположения основного оборудования комбинированного листового стана горячей прокатки [37]:

1 – загрузочные устройства; 2 – толкатели слябов; 3 – печной рольганг; 4 – нагревательные методические печи; 5 – буферы (амортизаторы); 6 – приемный рольганг; 7 – клеть с вертикальными валками; 8 – черновая двухвалковая клеть; 9 – рольганг черновой группы клетей; 10 – четырехвалковая универсальная клеть; 11 – отводящий рольганг; 12 – передаточный шлеппер толстых листов; 13 – роlikо-правильные машины; 14 – транспортные рольганги; 15 – холодильник; 16 – гильотинные ножницы поперечной резки; 17 – передаточный шлеппер; 18 – дисковые ножницы; 19 – гильотинные ножницы для обрезки кромок листов; 20 – карманы; 21 – гильотинные ножницы; 22 – промежуточный рольганг; 23 – летучие ножницы; 24 – окалиноломатель; 25 – чистовые четырехвалковые клетки; 26 – отводящий рольганг; 27 – моталки; 28 – подземный конвейер транспортировки рулонов; 29 – склад готовой продукции.

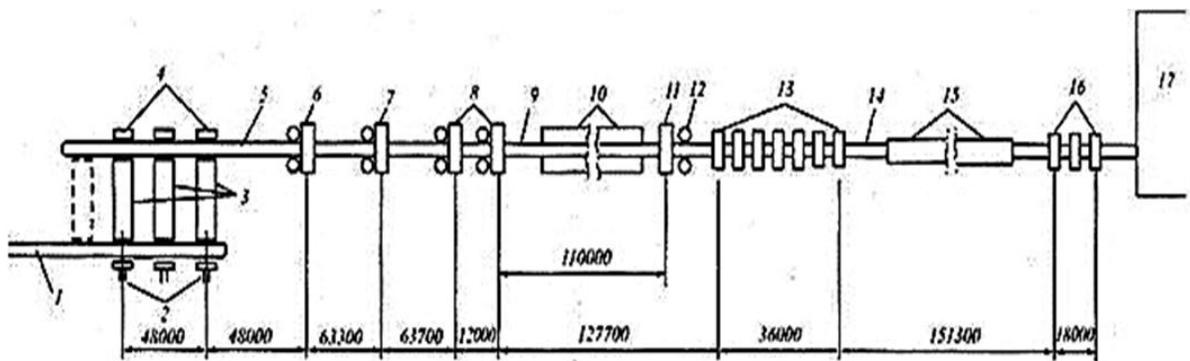


Рисунок 1.8 - Схема расположения основного оборудования $\frac{3}{4}$ - непрерывного листового стана горячей прокатки [37]:

1 – печной рольганг; 2 – толкатели слябов; 3 – нагревательные методические печи с шагающими балками; 4 – устройство для выдачи слябов; 5 – приемный рольганг; 6 – двухвалковая универсальная реверсивная клеть; 7 – четырехвалковая универсальная реверсивная клеть; 8 – промежуточный рольганг; 9 – теплоизолирующий подъемный кран; 10 – кривошипные ножницы; 11 – роlikовая направляющая проводка; 12 – чистовая непрерывная группа четырехвалковых клетей; 13 – отводящий рольганг; 14 – душирующая установка; 15 – моталки; 16 – моталки; 17 – адьюстаж.

Современные листовые станы горячей прокатки преимущественно оснащены непрерывными черновыми и чистовыми группами клетей, что позволяет существенно увеличить выпуск горячекатаного проката и обеспечить его высокие потребительские свойства [37,38,39].

Устройство современных станов можно понять по введенным в эксплуатацию в последнее десятилетие станам горячей прокатки известной компанией SMS group GmbH, Германия [40]:

- стан горячей прокатки в г. Чилегон, о. Ява в компании PT Krakatau Steel (PTKS) (основные компоненты: печь с шагающими балками, 4-х ступенчатая реверсивная черновая клеть; 6 чистовых клетей с гидравлической регулировкой зазора, установка ламинарного охлаждения и т.д.);

- компактный стан горячей прокатки в Турции в компании Çolakoğlu Metalurji (основные компоненты: 4-х ступенчатая реверсивная черновая клеть; койлбокс без оправки; 7 чистовых клетей с гидравлической регулировкой зазора, установка ламинарного охлаждения и т.д.);

- стан горячей прокатки в китайской компании HBIS Laoting Iron & Steel (основные компоненты: пресс для изменения размерности слябов, две реверсивные клетки, семиклетьева чистовая группа, установка ламинарного охлаждения).

Такие листовые станы горячей прокатки обладают следующими достоинствами [18,37]: высокая производительность, широкий сортамент проката по маркам стали и размерам, высокая точность прокатываемых полос, соответствие заданным механическим свойствам полос непосредственно после прокатки. При этом, имеются и недостатки, к которым можно отнести:

- рабочие клетки не рассчитаны на прокатку полос из труднодеформируемой стали (предел прочности $\sigma \geq 500$ МПа), поэтому при обработке данных марок сталей исполнительные механизмы работают со значительными перегрузками;

– при прокатке заготовок толщиной менее 1,5 мм, резко увеличивается машинное время работы стана, что приводит к существенному перегреву и преждевременному износу рабочих валков.

Развитие и совершенствование отечественных широкополосных станов горячей прокатки направлено на обеспечение запросов экономики России, и, в частности, на обеспечение потребностей ее высокотехнологичных секторов: производство коррозионностойких трубных, мостовых, судостроительных, сверхпрочных сталей, автомобильных и др. марок сталей [41,42].

Внедрение современных ресурсо- и энергоэффективных технологий позволит листопрокатному производству, при относительно малых затратах, удовлетворить как внутренний, так и внешний спрос на металлопрокат, а также успешно реализовать программу импортозамещения.

1.3 Анализ известных решений, направленных на снижение потребляемых ресурсов при производстве листового горячекатаного проката

Снижение потребляемых ресурсов в технологии листовой горячей прокатки может быть достигнуто внедрением комплексных научно-технических решений. Одним из таких направлений является технология подачи жидких смазочных материалов (СМ) на поверхность валков [43,44,45,46].

Технология подачи СМ достаточно известна и широко применяется в различных технологиях прокатного производства [47,48,49]. Наиболее значительных успехов данная технология достигла в листовой холодной прокатке [50,51,52,53,54,55].

Необходимость применения СМ в технологии горячей прокатки обоснована в работах авторов [44,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65]: Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев, Тубольцев, А.Ф. Килиевич, С.Д. Адамский, М.М. Горенштейн, Е.П. Жильников, Ю.И. Байбородов, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик, О.П. Максименко, В.И. Мелешко, В.Л. Мазур и др.

Авторами работ [57,58,60,61,63] были сформулированы основные требования, предъявляемые к СМ при горячей прокатке. Применяемый СМ должен обладать высокими адгезионными свойствами, обеспечивающими его минимальный смыв с поверхности валков при прокатке и подаваться в таком количестве, при котором не нарушаются условия захвата. На основании результатов исследований [60,61,62,63] авторы утверждают, что закономерности и механизм смазочного действия при горячей прокатке в основном имеют такой же характер, как и при холодной.

Однако, несмотря на успехи в области применения технологии подачи СМ, листовые станы горячей прокатки, которые эксплуатируются в РФ, до 2008 года не были оснащены системами смазывания валков.

В 2008 году на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки «2000» ПАО «ММК» впервые в России была установлена и испытана система подачи водно-масляной дисперсии на опорные валки, на первых трех клетях чистовой группы [45]. На сегодняшний день система технологической смазки (далее по тексту, СТС) работает в постоянном режиме. Исследования позволили оценить эффективность влияния технологической смазки на снижение энергосиловых параметров чистовой группы клеток стана, которое в среднем составляет 1,5...4,5%. Экспериментальные данные показывают, что применение СМ снижает интенсивность износа рабочих валков на 1,5...2,5% [66]. Необходимо отметить весомый вклад в развитие теории и практики применения СМ в технологии листовой горячей прокатки научного коллектива ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И Носова», возглавляемого проф. С.И. Платовым: Харченко М.В., Ярославцева А.В., Амирова Р.Н. [67,68,69].

С опорой на результаты исследований в диссертационной работе ставится научно-практическая задача, направленная на значительное повышение эффективности от работы СТС. Под термином «**энергоэффективность**» в

данной работе понимается изменение удельного расхода электроэнергии при прокатке одного и того же объема металла на листовом стане горячей прокатки.

Следующим направлением в снижении потребляемых ресурсов в технологии листовой горячей прокатки является повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков, заключающееся в снижении износа и уменьшении съема рабочего слоя при перешлифовке, которое можно достичь за счет управления тепловым состоянием рабочих валков.

Повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков является важной народнохозяйственной проблемой. Валки это основной прокатный инструмент, который является важной сменяемой частью прокатного стана. Согласно литературным данным, при листовой горячей прокатке расход валков составляет приблизительно 0,3...0,5% от массы проката.

Технологией листовой горячей прокатки закладываются жесткие требования к эксплуатационным характеристикам прокатных валков [70,71,72,73,74].

Эксплуатация рабочих валков сопровождается следующими видами их изнашивания: изнашивание схватыванием; окислительный; тепловой; абразивный; осповидный, а также износ, характерный для трения качения, в том числе усталостный. Помимо вышеперечисленного, на рабочих валках, эксплуатирующихся на листовых станах горячей прокатки, наблюдается термический износ, а также износ, вызванный коррозионной усталостью, который может проявляться в виде деформационного старения [70,74].

На наш взгляд, наиболее сильное влияние на эксплуатационные характеристики рабочих валков в технологии листовой горячей прокатки оказывает его тепловое состояние. Температура поверхности рабочих валков в черновых и чистовых клетях не должна превышать 65...70⁰С и 80...85⁰С, соответственно. Поддержание температуры рабочих валков в установленном температурном интервале возможно реализовать несколькими путями:

– определением оптимального теплового режима валка, например, за счет изменения объема подаваемого охладителя и площади облива поверхности валка, а также перераспределением объема поступающего охладителя, как между прокатными клетями, так и по длине бочки валка.

– изменением технологического процесса прокатки, например уменьшением времени контакта прокатываемого металла с поверхностью валка (данное решение не нашло применения, поскольку приводит к потере производительности прокатных станков).

В связи с этим, особенно актуальными в настоящее время являются вопросы исследования и моделирования теплового состояния рабочих валков с учетом процесса охлаждения с последующей оптимизацией температурных режимов эксплуатации.

1.4 Анализ известных методов математического описания технологических процессов при производстве горячекатаного проката

Известен ряд исследований, посвященных тематике диссертации. Большой вклад в развитие теории и технологии производства ЛГП внесли ученые [10,14,21,22,23,26,27,48,49,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85]: 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., Горбатюк С.М., Колесников А.Г., Артюх В.Г., а также другие российские и зарубежные ученые.. Имеющийся теоретический и практический опыт является хорошей базой для

развития теории, разработки и внедрения эффективных процессов, направленных на снижение ресурсоёмкости производства ЛГП.

В известных подходах, описывающих процессы листовой горячей прокатки показал, при определении технологических параметров процесса прокатки влияние режимов подачи СМ практически не отражено.

Для моделирования процесса листовой горячей прокатки необходимо знать числовые характеристики прокатываемой заготовки. В диссертационной работе для определения параметра сопротивления деформации металла использовали подход Л.В. Андреюка [86].

Для расчета коэффициента приложения равнодействующей плеча (ψ), многие авторы используют формулу Я.Д. Василева – В.Г. Шувякова [87], однако данный подход не позволяет учесть влияние СМ при различных режимах его подачи, что обуславливает необходимость его уточнения и развития.

Основная задача, на которую направлено применение СМ в технологии листовой горячей прокатки – снижение величины контактного трения и износа валков при прокатке.

Вопросам, связанным со снижением износа валков в технологии прокатки посвящено достаточное количество работ следующих авторов: С.Д. Адамский, А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, А.П. Грудев, П.И. Грудев, Е.П. Жильников, В.Н. Заверюха, Ю.В. Зильберг, А.Ф. Килиевич, В.М. Клименко, И.В. Воробей, С.А. Чекмарев, А.П. Коновалов и др. [23,57,59,60,87,88,89,90,91,92,93].

Основная формула для расчета коэффициента трения, предложенная А.И. Целиковым, была получена путем аппроксимации экспериментальной кривой Н.Н. Гета, и содержит в качестве аргумента только температуру прокатки t :

$$\mu = 0,55 - 0,00024t. \quad (1.1)$$

Известны формулы, в которых учитываются другие факторы трения: формула Ш. Гелей [80], учитывающая окружную скорость валков ($v, м/сек$);

формула А.П. Грудева, учитывающая состояние поверхности материала валков и химический состав прокатываемого металла [88], а также ряд известных формул следующих авторов: Т.М. Голубева и М.А. Зайкова [94,95], Л.Ф. Молоткова [96], Б.П. Бахтинова и М.М. Штернова [97], А.Я. Семенюта [98], В.И. Акулина и В.П. Северденко [72,99] и других ученых [100,101,102]. Анализ известных формул расчета контактных сил трения показывает, что влияние технологических факторов в них учтено при помощи поправочных коэффициентов. Однако использование поправочных коэффициентов не позволяет учесть влияние СМ на процесс контактного трения при горячей прокатке, что требует дополнительных исследований.

Момент, необходимый для обеспечения требуемой деформации металла ($M_{пр}$), рекомендовано определять по методике А.И. Целикова [75,103]. Авторы [47,48,49,104,105,106], занимающиеся изучением процесса листовой горячей прокатки с применением СМ, производили свои расчеты по данной методике. Результаты работ показывают высокую сходимость, что позволяет рекомендовать данный подход для проведения дальнейших исследований.

Влияние СМ на снижение энергозатрат процесса листовой горячей прокатки оценивается по изменению токовой загрузки двигателя главного привода ($M_{дв}$). Среди известных подходов для оценки энергозатрат наиболее распространена методика А.В. Третьякова [107], в которой для определения ($M_{дв}$) необходимо использовать экспериментально полученные значения.

В настоящее время известно достаточно много теоретических работ, в которых авторы описывают взаимодействие валковых узлов при подаче СМ [49,104,105,108,109].

Задача по определению расхода СМ в валковом узле «кварто» зачастую сводится к аналитическому определению толщины слоя СМ на контакте **«рабочий валок – опорный валок»** или **«рабочий валок – полоса»**.

Существует ряд работ, посвященных определению данных параметров [48,50,110,111,112,113].

Для расчета толщины СМ на контакте **«опорный валок – рабочий валок»**, многие исследователи предлагают использовать зависимость, обоснованную в работах Д.С. Коднира и В.Н. Васина [59,114]:

$$h = 3,17 \cdot \eta_0^{0,75} \cdot \alpha^{0,6} \cdot (v_1 + v_2)^{0,75} \cdot \rho_{np}^{-0,4} \cdot q_m(x)^{-0,15}, \quad (1.2)$$

где ρ_{np} – приведенный радиус кривизны контактирующих поверхностей, м;

q_n – расчетная нагрузка, Н/м; U_{Σ}^* - суммарная скорость качения, м/с;

T – мгновенная температура поверхностей, $^{\circ}\text{C}$;

η_0 – вязкость СМ при атмосферном давлении, $\text{Па} \times \text{с}$;

α – пьезокоэффициент вязкости СМ, Па^{-1} .

На основании схожести модели двух контактирующих роликов, на примере контакта подшипников качения, было сделано заключение о возможности использования метода расчета толщины СМ по выражению (1.2) для условия межвалкового взаимодействия с наличием СМ. Основной недостаток определения толщины смазочной пленки по выражению (1.2) заключается в достаточно узком диапазоне его применения. С целью получения адекватного результата, необходимо провести аналитическое исследование для определения диапазона изменения степенных коэффициентов, входящих в уравнение (1.2).

Анализ литературных данных показывает, что практически не исследовано напряженно деформированное состояние в системах **«рабочий валок – опорный валок»** и **«рабочий валок – полоса»** при подаче СМ.

Для оценки влияния СМ на изменение напряженно деформированного состояния в системе **«рабочий валок – полоса»** наиболее целесообразно использовать методику расчета, предложенную сотрудниками Череповецкого государственного университета (ФГБОУ ВО «ЧГУ») [115,116,117,118], в которой

используются следующие положения. Очаг деформации рабочей клетки стана делится на три участка (рис.1.9): участок упругого сжатия полосы на входе; участок пластической деформации, состоящий из зон отставания и опережения; участок упругого восстановления полосы на выходе из очага деформации. Напряжения определяются отдельно на каждом из трех участков очага деформации рабочей клетки листовых станов горячей прокатки, для которых определены формулы переменных нормальных контактных напряжений по длине очага деформации.

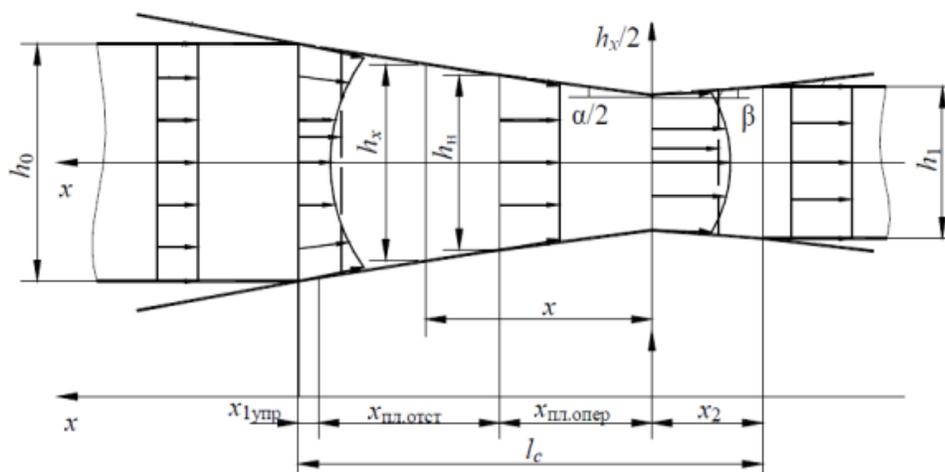


Рисунок 1.9 - Схема упруго-пластического очага деформации клетки листового стана горячей прокатки [115,116,117,118]

Применение вышеуказанной методики позволяет производить энергосиловые расчеты процесса листовой горячей прокатки, в том числе и с применением СМ, а также оценивать изменения напряженно деформированного состояния в системе «рабочий валок – полоса», используя экспериментальные данные, фиксирующие изменение технологического параметра «усилие прокатки».

Несмотря на большой объем исследований, в настоящее время в технологии листовой прокатки отсутствуют четкие рекомендации по назначению расхода СМ в зависимости от сортамента выпускаемой продукции, что приводит к неполному использованию технологических возможностей

применяемых систем подачи СМ.

Анализ литературных данных показывает, что в настоящее время отсутствует единый методологический подход, основанный на теоретических, экспериментальных и промышленных исследованиях, а также лабораторном моделировании процессов контактного взаимодействия для системы **«опорный валок – рабочий валок – полоса»**. Реализация методологического подхода позволит разработать и внедрить эффективные режимы подачи СМ при листовой горячей прокатке.

Охлаждение рабочих валков в технологии листовой горячей прокатки

На сегодняшний день известно большое количество способов охлаждения рабочих и опорных валков с помощью струй жидкости под давлением, а также конструкций и устройств для их осуществления [119,120,121,122,123,124,125]. Также известны решения по снижению температуры поверхности полосы перед входом в очаг деформации, позволяющие уменьшить температуру в месте контакта валка с прокатываемой полосой. В литературе данные решения носят название – «система «антишелушения» (САШ) [126].

Для технологии листовой горячей прокатки характерны условия, когда температура рабочих валков непосредственно в контакте с полосой может достигать 400-500 °С [127,128]. При эксплуатации рабочих валков наблюдается значительный перепад температур рабочего слоя (термический цикл), что способствует образованию термических трещин и преждевременному выходу валков из строя. Кроме того, при больших температурах снижается прочность рабочего слоя валка, происходит значительное падение твердости (до 25%) и, следовательно, значительное снижение износостойкости, возникает интенсивный разгар поверхности валков, способствующий появлению на поверхности проката дефекта «вкатанной» или «разгарной» окалины.

Снижение уровня термических напряжений, а, следовательно, и повышение его эксплуатационных характеристик, может быть достигнуто в результате организации рационального теплового режима работы валков, в частности режима охлаждения.

Требования к системам охлаждения листовых станов горячей прокатки

До 80-х годов прошлого века конструирование систем охлаждения листовых станов осуществляли без учета ряда важнейших требований технологии прокатки, определяющих качество и производительность [129]. Так, например, основной параметр – расход охлаждающей жидкости – рассчитывали только исходя из условия теплового баланса при установившемся режиме, а также исходя из требования отвода определенного количества теплоты [130]. При этом в расчете не учитывались требования, которые в настоящее время являются обязательными: изменение и управление тепловым профилем рабочих валков в процессе прокатки. Кроме того, при расчете не учитывались технологические ограничения, которые накладывают современные НШСП. Например, расчет температуры прокатываемой полосы по проходам, осуществлялся без учета ряда технологических систем: гидроудаления окалины, межклетевого охлаждения, а также принудительного снижения температуры поверхности полосы перед входом в очаг деформации (САШ), что подтверждает актуальность исследований.

В настоящее время можно сформулировать следующие требования, которым должна соответствовать современная методика расчета теплового режима работы стана горячей прокатки, в части настройки и работы системы охлаждения рабочих валков.

1. Обеспечение эффективного отвода необходимого количества выделяемой теплоты, в зависимости от расчетной функции, которая учитывает: состав и

характеристики прокатываемых заготовок в рамках каждой монтажной партии, режим обжатий, натяжение, скорости прокатки и т.д.

2. Обеспечение индивидуального дифференцированного регулирования расхода охладителя по прокатным клетям, как для каждой прокатываемой полосы, так и для всей монтажной партии в целом.
3. Обеспечение индивидуального регулирования расхода охладителя по длине бочки валка с целью управления тепловым профилем валка и прокатываемой полосы.
4. Расчет режима охлаждения и способа подачи охладителя должен выполняться с учетом:
 - теплового состояния поверхности полосы в очаге деформации, определяемого с учетом влияния внешних факторов и систем: гидроудаление окалины, межклетевое охлаждение, принудительное снижение температуры поверхности полосы перед входом в очаг деформации, а также тепловыделение в процессе пластической деформации заготовки;
 - допустимого температурного диапазона эксплуатации валков, а также требований по распределению охладителя по длине бочки валка;
 - суммарного расхода охладителя, который подается на стан, с учетом возможности его перераспределения по клетям непосредственно в процессе прокатки.

Способы подачи охлаждающей жидкости на валки

В настоящее время все способы подачи охладителя на поверхность рабочих и опорных валков условно можно разделить на несколько типов охлаждения: спрейерное (струйное) охлаждение, охлаждение через щелевые коллекторы, комбинированное охлаждение, водовоздушное и эмульсионно-воздушное охлаждение [123,130].

Многие действующие станы, введенные в эксплуатацию до 80–х годов XX века, преимущественно оснащались системой спрейерного охлаждения: коллекторами с круглыми или прямоугольными отверстиями, расположенными в определённом порядке, с определённым шагом по длине [130]. Для достижения эффективности процесса охлаждения коллекторы стали оснащать плоскоструйными форсунками с целью стабилизации теплового состояния и управления тепловым профилем рабочих валков. Однако в литературе практически отсутствуют рекомендации, позволяющие определять оптимальное местоположение коллекторов охлаждения, обеспечивающее максимальный теплосъем с поверхности валков.

1.4.1 Алгоритмическая структура управления тепловым режимом в непрерывных черновых и чистовых клетях листовых станов горячей прокатки

Контроль параметров листового проката (в том числе и по критерию «температура»), прогнозирование теплового состояния рабочих валков, а также управление и поддержание заданного теплового режима эксплуатации валков являются функциями управления станом. Тепловой режим стана зависит от комплекса параметров, которые можно разделить на три группы:

- 1) постоянные величины, определяемые конструкцией стана и его системой охлаждения (коллекторов, форсунок, регулирующих органов);
- 2) управляющие воздействия (изменение расходов и давлений в системе подачи и распределения охладителя по длине валков и по поверхности полосы);
- 3) выходные параметры, включающие в себя температуру прокатываемой полосы и рабочих валков.

В литературе и на практике наибольшее внимание уделяется изучению влияния на тепловой режим работы прокатного стана возмущающих факторов, зависящих от состояния и свойств подката и режимов прокатки (обжатий,

скоростей, натяжений, условий контактного трения и износа валков). Факторы, зависящие от состояния и свойств подката, подразделяют на три подгруппы: механические свойства подката, его разнотолщинность, температура и качество поверхности, механических свойства проката (зависят от работы пластической деформации и тепловыделения при прокатке).

Температура подката относится к числу факторов, возмущающее воздействие которых на тепловой режим стана наиболее значительно. При горячей прокатке на широкополосных станах было установлено, что тепловые деформации являются существенным фактором, снижающим качество регулирования толщины полосы.

Необходимость точного прогнозирования для настройки и управления тепловым режимом работы листового прокатного стана потребовала развития методов расчета процессов теплообмена в системе **«рабочий валок-полоса»**.

В основу предлагаемых алгоритмов расчета теплового состояния системы **«рабочий валок-полоса»** закладываются условия получения горячекатаной полосы с заданными параметрами качества и выполнения ограничений по температуре поверхности валков с учетом характеристик изнашивания.

При построении и реализации алгоритмической структуры необходимо построить и численно реализовать математическую модель теплового состояния в системе **«рабочий валок-полоса»**, позволяющую решить следующие задачи.

1. Расчет текущего теплового состояния рабочих валков и полосы.

Задача решается на основе численно реализованной математической модели нестационарного теплового режима валков и полосы. Численные решения позволяют рассчитать температуру поверхности бочки валка в любом выбранном месте, а также распределение температуры по глубине.

2. Определение расходов охладителя для стабилизации заданного теплового профиля сводится к выбору такого распределения охлаждающей жидкости с помощью описанной выше математической модели, чтобы

расхождения между расчетным (текущим) и заданным тепловым профилем постоянно уменьшался. При этом выбор расходов охлаждающей жидкости осуществляют также с учетом ограничений по температуре валков и полосы.

3. Адаптация математической модели к условиям действующего производства решается с помощью определения соответствия модели реальному тепловому режиму валков. Для этого осуществляют запись температуры валков по показаниям датчиков температуры, установленных на валках в шестой клетки. По сигналу, определяющему начало процесса адаптации модели, сравнивают расчетные и замеренные в процессе прокатки температуры поверхности бочки валков, подбирают значения параметров адаптации модели таким образом, чтобы средние отклонения расчетной и замеренной температур были минимальными.

1.4.2 Анализ известных методов математического описания тепловых процессов функционирования системы «рабочий валок – полоса»

Моделирование теплового состояния для элемента системы - **полоса** описаны в известных работах Целикова А.И., Хлопонина В.Н., Полухина П.И., В.И., В.П. Полухина, Коновалова Ю.В., Шичкова А.Н., Салганика В.М., Бемянского А.Д., Мухина Ю.А., Мазура В.Л., Приходько И.Ю., Мухина Ю.А., Е.Ю., Колдина А.В., Румянцева М.И., Денисова С.В., Зиновьев А.В., Шаталов Р.Л., Генкин А.Л., Колбасников Н.Г., Горбатюк С.М., Колесников А.Г. и других ученых [16,37,84,130,131,132,133,134,135,136,137].

Отличительной особенностью при исследовании теплового состояния полосы является выбор подходов для решения поставленной задачи. Условно подходы можно разделить на две группы: эмпирические зависимости и решение задачи теплопроводности с применением различных математических методов. Полученные авторами эмпирические зависимости построены на основе сбора и обработки большого количества экспериментальных данных и позволяют получать достаточно точные решения. Однако данный подход не обладает

единым (обобщающим) алгоритмом, при этом полученные решения требуют верификации к условиям действующего производства.

Обобщающим алгоритмом, направленным на исследование теплового состояния элемента системы – «полоса», является решение задачи теплопроводности. Использование данного подхода позволяет повысить точность расчетов, а также позволяет учесть влияние внешних и внутренних факторов.

Общим при решении задач является учет внешних факторов: конвективный теплообмен, теплообмен излучением, выделение тепла при пластической деформации полосы.

Конвективный тепловой поток при охлаждении движущейся полосы в воздухе описывается уравнением [136,137]:

$$Nu = 0,036Re^{0,5}Pr^{1/3}, \quad (1.3)$$

где Nu – число Нуссельта для рассматриваемой зоны; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля.

Для учета теплообмена при излучении полосы используется закон Стефана-Больцмана:

$$q = \sigma \varepsilon(T_p)(T_{полосы}^4 - T_{окр.сп}^4) \quad (1.4)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; $\varepsilon(T_p)$ – степень черноты поверхности.

Анализ известных работ показывает, что приведенные формулы позволяют с достаточной точностью описать тепловые потери для условий листовой прокатки на НСГП и ШСГП [138].

Учет теплового взаимодействия между полосой и рабочими валками многие авторы описывают эмпирическими зависимостями. Автором работ [37,56] предложена следующая зависимость:

$$\Delta t_{кг} = C_2 \frac{t_0}{h_0 + h_1} \sqrt{\tau}, \quad ^\circ C, \quad (1.5)$$

где C_2 – коэффициент теплопередачи, для стальной полосы ($C_2 = 11,8 \text{ мм/с}^{1/2}$);
 τ – время прохождения сечения полосы через зону деформации.

Для описания влияния внутренних факторов (деформационный разогрев), также используются аналитические зависимости. Так, автором работы [56] предложена зависимость:

$$\Delta t_{nd} = C_3 p_{cp} \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.6)$$

где p_{cp} – среднее давление прокатки, МПа; коэффициент C_3 , учитывающий влияние стальной полосы, равный = 0,86 град/МПа; Δt_{nd} – изменение температуры за счет деформационного разогрева.

Существенным недостатком предложенных формул (1.5) и (1.6) является отсутствие учета начальной и текущей температуры полосы, а также химического состава и технологических режимов (скорости, обжатия и т.д.) прокатки.

Моделирование теплового состояния элемента системы «**рабочий валок**» позволяет анализировать тепловые процессы в поверхностном слое валков и полосы, а также температурное поле валка, и выдавать конкретные рекомендации по настройке теплового режима работы валков.

Температура валков при горячей прокатке изменяется в результате чередования циклов «нагрев – охлаждение». Нагрев валков происходит главным образом от энергии, отдаваемой нагретой полосой и лишь в незначительной степени от теплоты, выделяемой при пластической деформации. Валки охлаждаются водой. Условия нагрева и охлаждения валков в процессе прокатки неодинаковы по длине бочки и, соответственно, неодинаковы величины термического расширения диаметра бочки.

Неправильная организация теплового режима прокатки может привести к весьма нежелательным последствиям, вплоть до поломки валка. Недостаточное

количество охладителя или неправильная его подача вызывает перегрев валков, искажение теплового профиля, образование трещин разгара.

Для описания процессов переноса теплоты в вещественной среде в общем случае используют дифференциальное уравнение теплопроводности. Для описания конкретного процесса переноса теплоты к данному уравнению необходимо использовать «краевые условия». В некоторых случаях система из дифференциального уравнения и краевых условий может быть решена аналитически, однако в большинстве теплофизических процессах аналитическое решение отсутствует.

Для анализа сложных явлений, к которым следует отнести и процессы теплопроводности, основное уравнение теплопроводности обычно записывается в следующем виде:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q_z}{\partial z^2} \right). \quad (1.7)$$

В науке сложился общий подход, связанный с использованием методов математической физики. Суть этого подхода состоит в том, что на основании известных физических законов устанавливаются искомые связи в пределах бесконечно малого объема внутри тела и за бесконечно малый промежуток времени. В результате получают дифференциальное уравнение (или систему таких уравнений), описывающее весь класс исследуемых явлений. Для решения конкретных задач это дифференциальное уравнение интегрируют в пределах изучаемого пространства и для заданного интервала времени, получая таким путем аналитическое решение задачи. Общие решения перечисленных уравнений в частных производных не представляют физического решения. Для получения конечного решения необходимо поставить краевые условия решения задачи.

Краевые условия модели теплопроводности

Для решения конкретных гидродинамических и тепловых задач следует сформулировать краевую задачу или условия однозначности. Задание краевых условий заключается в формулировке, во-первых, начальных условий, то есть задании искомых функций в указанных уравнениях в начальный момент времени, который обычно применяется за $\tau=0$, и, во-вторых, граничных условий, которые задаются на поверхности, ограничивающих движущуюся жидкость. Для скорости вязкой жидкости такими условиями будет, как известно, равенство нулю скорости жидкости на неподвижных поверхностях твердых тел, с которыми соприкасается движущаяся жидкость, то есть $\omega=0$. В случае движущегося твердого тела скорость жидкости у этой поверхности должна быть, очевидно, равна скорости поверхности [134,135,136,137].

Для поиска искомой функции – температуры, могут быть заданы следующие граничные условия.

1. Граничные условия первого рода, когда задают значения температуры на ограничивающих жидкость поверхностях. В общем случае температура на границе может зависеть от координат точек на границах рассматриваемого объема (поверхности) и времени контакта.

2. Граничные условия второго рода, когда на поверхности задана плотность теплового потока, то есть производная от температуры по нормали к поверхности (в виде функции времени и координат точек поверхности).

3. Граничные условия третьего рода, когда тепловой поток предполагается пропорциональным разности температур стенки и жидкости:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{гр}} = \alpha(T_{\text{гр}} - T_1). \quad (1.8)$$

В этом условии должен быть задан коэффициент теплопередачи (α), а также температура среды (T_1), °С.

4. Граничные условия четвертого рода, которые сводятся к одновременному заданию равенства температур и тепловых потоков на границе раздела, когда решается задача о теплообмене двух сред (твердое тело – жидкость, тело – тело, жидкость – жидкость), в каждой из которых перенос теплоты описывается своим уравнением энергии:

$$T_1|_{zp} = T_2|_{zp}; -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial n}|_{zp} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}|_{zp}. \quad (1.9)$$

Эти условия допускают различные модификации в зависимости от физических условий на границе раздела сред.

При математическом моделировании считается, что граничные условия течения жидкости зависят от формы и размеров твердого тела, которое взаимодействует с потоком.

Гидродинамика и теплообмен между поверхностью рабочего вала и свободной струей

Гидродинамика и теплообмен между поверхностью и свободной струей в условиях кипения зависят от множества факторов, которые сложно объединить в аналитическое уравнение, поэтому большинство работ связывают изучение этого процесса с экспериментальными методами [136,139,140,141,142,143].

В работе [139] проведены эксперименты по охлаждению плиты из нержавеющей стали струей круглого сечения и получены экспериментальные кривые кипения в точке столкновения струи при различных значениях недогрева воды. Было замечено, что на интенсивность теплообмена влияет скорость натекания струи, но при этом она слабо влияет на температурный напор начала пленочного кипения по сравнению с недогревом [139].

Для режима пленочного кипения струи авторами работы [139] получено теоретическое соотношение для плотности теплового потока с поверхности

плиты в интервале расстояний от $r=0$ до $D/2$ при значительном недогреве жидкости до температуры насыщения.

Теоретические и экспериментальные значения тепловых потоков, полученные авторами работы [139], существенно отличаются. Авторы работы [139] объясняют это возникающими колебаниями толщины паровой пленки, что не учтено в теоретическом анализе, и предлагают изменить константу в полученном уравнении в соответствии с экспериментом.

При очень большом недогреве кривая теплообмена соответствует характеристикам переходного кипения вплоть до перегрева стенки в $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом формируется очень тонкий и нестабильный слой пара так, что свежая натекающая жидкость частично соприкасается с горячей поверхностью. Численные расчеты [139] показывают, что толщина слоя пара в этом случае может составлять 3-5 мкм.

В работе [141] представлены результаты экспериментов по охлаждению стальной плиты круглой струей с недогревом $5\text{-}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростью натекания струи $2\text{-}7\text{ м/с}$. Температура плиты измерялась пятью термопарами, расположенными на равных расстояниях от точки столкновения. В ходе эксперимента было выявлено, что сразу после начала охлаждения на всей поверхности плиты поддерживается стабильное пленочное кипение. В процессе пленочного кипения температура плиты линейно уменьшается с течением времени. К концу процесса пленочного кипения происходит контакт жидкости и твердого тела в зоне столкновения, сопровождаемый характерным шумом кипения. После этого тепловой поток в зоне столкновения увеличивается и кипение соответствует переходному режиму. Как только охлаждаемая поверхность в зоне столкновения начинает полностью смачиваться, что сопровождается другим шумом кипения, зона смачивания начинает расширяться, разбрызгивая пленку жидкости. Теплообмен в смачиваемой зоне обусловлен пузырьковым кипением и конвекцией.

При диаметре сопла 20 мм разница между опытными кривыми кипения мала. Это обусловлено тем, что пять измеряемых точек находятся в зоне столкновения. Разница в кривых кипения становится явной при малом диаметре сопла. Тепловой поток максимален в точке полного торможения и уменьшается с увеличением дистанции от точки торможения, так как толщина пленки воды уменьшается, а ее температура повышается. Как показано в эксперименте [141], на теплоперенос при кипении сильно влияет недогрев воды до температуры насыщения. Увеличение недогрева воды сдвигает кривые кипения к большему тепловому потоку и большему перегреву стенки. В этом случае пленочное кипение заканчивается при более высокой температуре стенки. В результате интервал температуры, в котором происходит переходное кипение, становится шире, а пик кривой кипения более сглаженным. В случае значительного недогрева ($\Delta T_{sub} \geq 65^\circ\text{C}$) температура минимума теплового потока выше, чем начальная температура плиты, и никакого проявления пленочного кипения в данных экспериментальных рамках не происходит.

На основе экспериментальных данных авторами работы [141] получено эмпирическое уравнение для минимума теплового потока с учетом влияния недогрева воды, скорости и диаметра сопла. При этом было принято, что скорость струи оказывает такое же влияние на q_{min} , как и обратная величина диаметра сопла.

Подобные эксперименты были проведены авторами работы [140] на медном цилиндре диаметром 1,5 мм с тонким платиновым покрытием при охлаждении плоской струей шириной 10 мм. На основе экспериментальных данных авторами [140] получено выражение для нахождения плотности теплового потока на оси струи с учетом влияния скорости ее натекания.

В работе [141] получено распределение давления и скорости воды на поверхности горизонтальной плиты при натекании на нее струи круглого сечения. Установлено, что радиальная скорость течения воды $u_{r\infty}$

пропорциональна расстоянию от критической точки струи при значениях $r/D \leq 1,28$.

Распределение давления на поверхности плиты для случая плоской струи получено в работе [143]. Из эксперимента видно, что безразмерное давление практически не зависит от скорости струи. Подобные эксперименты проведены в работе [136] при различных значениях ширины струи. Результаты данной работы удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов [143].

Анализ научных работ [136,139,140,141,142,143] по теплообмену при использовании систем струйного охлаждения и по взаимодействию струи жидкости с высокотемпературной металлической поверхностью позволяет сделать ряд важных выводов:

- при струйном охлаждении высокотемпературной поверхности существуют зоны с резко отличающимися механизмами теплообмена;
- в зоне столкновения струи интенсивность теплообмена сложным образом зависит от параметров струи;
- существенное влияние на характеристики теплообмена оказывает недогрев воды до температуры насыщения;
- пленочное кипение возможно лишь при небольшом недогреве воды, при большом недогреве теплообмен в зоне столкновения происходит в условиях переходного кипения;
- недогрев также оказывает значительное влияние на критическую точку начала пленочного кипения, в то время как скорость столкновения струи влияет слабо;
- скорость натекания струи и недогрев жидкости существенно влияют на величину теплового потока во всех режимах кипения;
- интенсивность теплообмена убывает по мере удаления от критической точки струи.

В научной литературе на данный момент отсутствуют надежные физико-математические модели, позволяющие рассчитать локальную теплоотдачу при охлаждении высокотемпературной поверхности струей ламинарной жидкости с учетом всех факторов, влияющих на этот процесс. Колдин А.В. в своей кандидатской диссертации [136] обобщил данные экспериментов работ [136,139,140,141,142,143] и предложил свою эмпирическую формулу для расчета локальной плотности теплового потока в зоне столкновения струи с высокотемпературной стальной поверхностью с учетом гидродинамических параметров струи. Однако о точности данного уравнения можно судить лишь косвенно при моделировании струйного охлаждения движущегося листа в прокатном производстве. Непосредственного опытного подтверждения эффективности этого уравнения на данный момент нет.

Таким образом, анализ литературных данных позволил сделать заключение, что в научной литературе отсутствуют комплексные решения, позволяющие исследовать процессы функционирования системы **«опорный валок – рабочий валок – полоса»** путем разработки и применения технологии эффективного смазывания и охлаждения рабочих валков и полосы в широком диапазоне условий при листовой горячей прокатке.

1.5 Цель и постановка задач исследования

На основе проведенного литературного анализа, определено, что основное направление диссертационного исследования заключается в развитие методологии комплексного совершенствования технологии и оборудования для смазывания и охлаждения валков листовых станов горячей прокатки.

При проведении диссертационных исследований решается комплексная научно-техническая проблема – повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков непрерывной группы клетей листовых станов горячей прокатки. Решение поставленной проблемы возможно несколькими путями: технологическим (совершенствованием технологии) и конструкционным (совершенствованием оборудования).

Под технологическим воздействием подразумевается изменение режимов обжатия и скоростей прокатки. Данные вопросы достаточно глубоко изучены, поскольку напрямую влияют на качество готовой полосы, и широко применяются, например, в технологии контролируемой прокатки, поэтому не являются предметом исследования в данной диссертационной работе.

Конструкционные воздействия включают в себя решения, направленные на стабилизацию и улучшение теплового состояния рабочих валков, и связаны с настройкой системы охлаждения. В результате неправильного охлаждения на рабочих поверхностях возникают усталостные термические напряжения. Высокая температура прокатываемой заготовки в черновых клетях приводит к неравномерному изнашиванию и образованию на поверхности валков «сетки разгара».

Конструкционным воздействиям посвящено достаточно большое количество исследований. Однако комплексных исследований, направленных на разработку единой методологии и построения алгоритмов для настройки системы охлаждения рабочих валков непрерывной группы клетей, в литературе

не достаточно полно отражено и поэтому, проблема является недостаточно изученной.

Технология прокатки в непрерывной группе клетей связана с высокими степенями обжатий прокатываемой заготовки, большими скоростями прокатки, а также минимальными паузами (до 3 сек) между проходами. Вопрос повышения стойкости рабочих валков необходимо рассматривать комплексно. С целью снижения износа рабочих валков на первых клетях установлена система подачи жидких СМ. Для стабилизации теплового состояния рабочих валков применяют системы, позволяющие регулировать подачу охладителя на каждую из прокатных клетей в зависимости от технологических режимов прокатки.

Помимо этого, на первые клетки устанавливаются новые дополнительные системы охлаждения, позволяющие подавать охладитель непосредственно на полосу перед входом ее в очаг деформации (САШ).

Развитием технологии горячей прокатки с применением жидких СМ активно занимались ученые МГТУ им. Г.И. Носова. Однако все исследования были проведены при постоянном режиме подачи СМ вне зависимости от типоразмера и реологических свойств прокатываемой заготовки, что на наш взгляд является недостаточным, а вопрос применения жидких СМ в технологии листовой горячей прокатки не до конца исследованным.

Вопросам настройки и управления системами охлаждения рабочих валков непрерывной группы клетей листовых станов горячей прокатки посвящено большое количество исследований. Однако вопросы, связанные с распределением охладителя по клетям в зависимости характеристик прокатываемых заготовок, объединенных в монтажные партии, согласно литературным данным также являются не достаточно изученными. Настройка и применение в технологии листовой горячей прокатки систем САШ также

являются малоизученными, что подтверждает актуальность выбранной темы исследования.

Решение нескольких взаимосвязанных задач, которые объединены вокруг одной цели – в развитие методологии комплексного совершенствования технологии и оборудования для смазывания и охлаждения валков листовых станов горячей прокатки.

В результате проведенных исследований сформирована цель и задачи диссертационной работы.

Цель работы (рисунок 1.10). 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.

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 клеток 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 клеток 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 ЛГП.
6. Разработка комплекса научно обоснованных эффективных технических и технологических решений, направленных на снижение уровня потребляемых ресурсов при производстве ЛГП, 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.

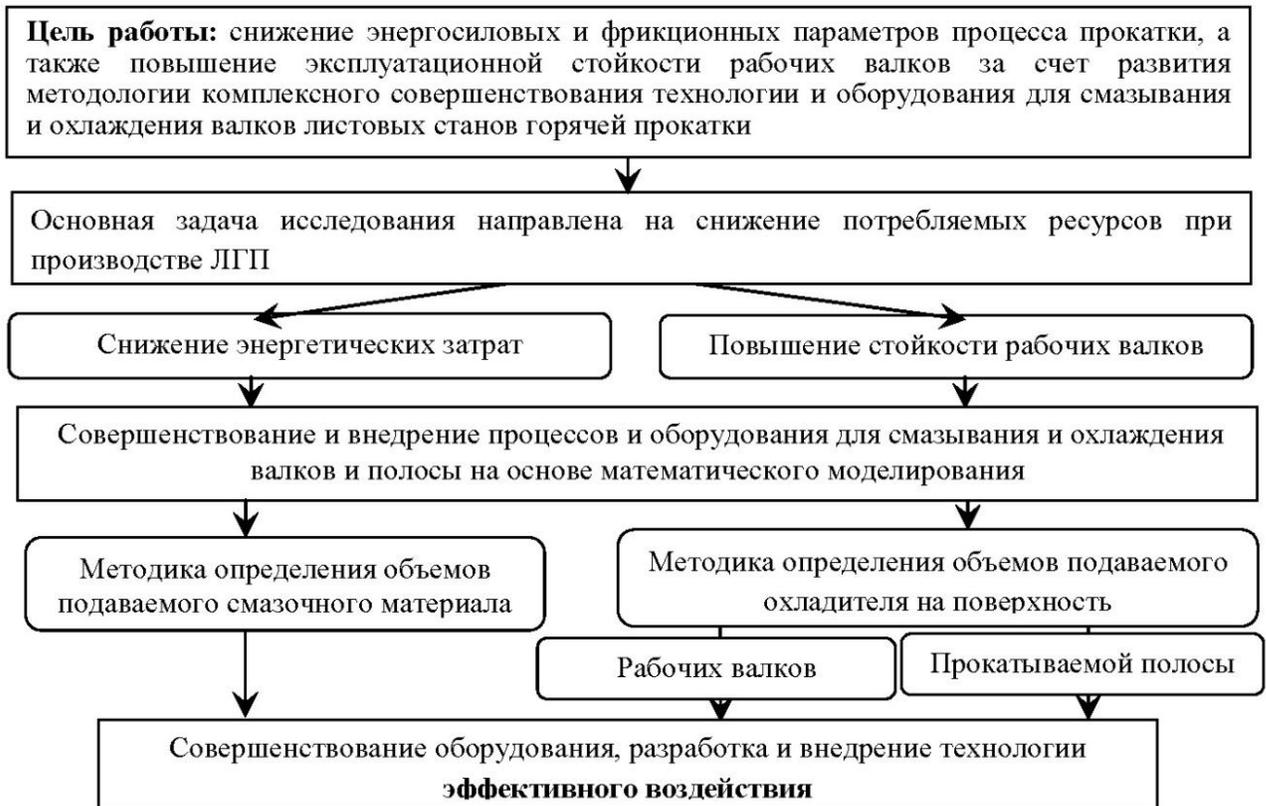


Рисунок 1.10 - Цели и задачи диссертационной работы.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ОПОРНЫЙ ВАЛОК – РАБОЧИЙ ВАЛОК – ПОЛОСА» С ПОДАЧЕЙ ЖИДКИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КЛЕТЕЙ ЛИСТОВЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Технология листовой горячей прокатки предусматривает использование смазочных материалов (СМ) в качестве технологической смазки контактирующих поверхностей в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса». В качестве СМ широкое применение нашли эмульсии, водомасляные смеси, однородные и неоднородные смазочные смеси и т.д.

Математическое моделирование процесса листовой горячей прокатки позволяет решить теоретические вопросы функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» путем разработки и применения технологии эффективного смазывания, а также выявить возможные направления развития и совершенствования оборудования станов горячей прокатки с целью снижения ресурсоёмкости при производстве ЛГП.

В настоящее время достаточное количество работ посвящено классификации СМ, их свойствам и составам для различных видов материалообработки. Однако в последнее время представляет интерес вопрос исследования влияния СМ на процесс листовой горячей прокатки [144]. На наш взгляд, это связано прежде всего с тем, что производители СМ конкурируют между собой, создавая новые виды продукции, направленные на повышение эффективности технологических процессов и на снижение ресурсоёмкости производства изделий, в том числе получаемых методами ОМД.

На листовом стане горячей прокатки 2000 ПАО «ММК» СМ подается в виде дисперсии масла. Принципиальное отличие от известных технологических решений заключается в том, что СМ подается на поверхность верхнего

опорного валка со стороны выхода прокатываемой заготовки из клетки. Исследователями на основании анализа и расчета экспериментальных данных в ходе промышленных экспериментов был подтвержден эффект применения СМ. Зафиксированный эффект применения СМ заключается в снижении энергозатрат (токовые нагрузки главных приводов), которое составило в среднем от 3...5% [45,145,146,147]. Объяснение данного эффекта заключалось в снижении фрикционных параметров исключительно на контакте «опорный валок - рабочий валок» при установленных режимах подачи СМ [45,148,149,150,151,152,153].

Оценка эффективности применения СМ в условиях действующего производства показала, что энергоэффективность процесса листовой горячей прокатки может быть повышена в среднем до 10%. Повышение энергоэффективности процесса возможно при условии определения новых режимов подачи, при которых СМ оказывает комплексное воздействие на функционирование системы «опорный валок – рабочий валок – полоса».

В связи с вышесказанным, необходимо проведение дополнительных теоретических исследований процесса листовой горячей прокатки с применением СМ, включающих в себя:

- моделирование процесса листовой горячей прокатки: взаимодействие в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса» с наличием/отсутствием СМ;
- научное обоснование и объяснение механизма работы СМ в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса» в валковых узлах «кварто»;
- исследование и выявление параметров контактного взаимодействия, и разработка рекомендаций по расходу СМ в технологии листовой горячей прокатки.

Таким образом, настоящие исследования посвящены теоретическим и экспериментальным исследованиям функционирования системы «опорный

валок – рабочий валок – полоса» и направлены на снижение ресурсоёмкости при производстве ЛПП за счет применения технологии подачи жидких СМ в валковые узлы «кварто».

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

2.1 Моделирование процесса листовой горячей прокатки. Численная реализация модели

При моделировании процесса листовой горячей прокатки использовался специализированный программный комплекс «Deform–3D», в основу которого положен метод конечных элементов (далее по тексту, МКЭ).

МКЭ – один из наиболее эффективных численных методов решения задач механики сплошной среды и обработки металлов давлением. Широкое использование этого метода в значительной мере объясняется простой физической интерпретацией основных его вычислительных операций, большой геометрической гибкостью и применимостью к широкому классу уравнений в частных производных. Он позволяет достаточно точно описать криволинейные границы области определения решения и краевые условия. В то время как другие известные методы исследования процессов ОМД, например, метод характеристик или метод совместного решения уравнений равновесия и уравнений течения пластической среды отличаются либо недостаточной точностью результатов, либо большим количеством необходимых вычислений.

Применяемый МКЭ на базе программного комплекса «Deform–3D» позволяет проконтролировать результаты на всех этапах исследования, а также проверить и отработать технологические процессы на ЭВМ без проведения дорогостоящих лабораторных или промышленных испытаний.

Численная реализация математической модели листовой горячей прокатки.

Теоретические исследования функционирования системы **«опорный валок – рабочий валок – полоса»** в технологии листовой горячей прокатки, проводились с использованием трёхмерного численного моделирования на базе программного комплекса «Deform-3D», в котором использовались встроенные препроцессор, постпроцессор и механизм решения задач методом МКЭ.

При моделировании процесса горячей прокатки были приняты следующие допущения:

- 1) схема напряжённо-деформированного состояния – трёхмерная;
- 2) тепловые эффекты при прокатке – учтены;
- 3) эволюция микроструктуры и фазовые превращения в стали – не учитываются;
- 4) модель материала инструмента – упругопластическая;
- 5) деформируемый материал – однородный и изотропный во всём объёме;
- 6) модель материала заготовки – идеальная пластическая модель;
- 7) модель прокатной клетки «кварто» – осесимметричная.

Для исследования контактного взаимодействия в системе **«опорный валок – рабочий валок – полоса»** были приняты следующие граничные условия:

- геометрические характеристики прокатываемой заготовки: ширина 700...1850 мм, толщина 1,2...65 мм (что соответствует условиям листовой горячей прокатки в чистовой непрерывной группе клетей «кварто» стана 2000 г.п. ПАО «ММК»);

- скругление на краях входного участка полосы равно радиусу кривизны бочки рабочего вала (процесс захвата заготовки упрощен в модельном представлении);

- геометрические параметры валков (соответствуют условиям листовой горячей прокатки в чистовой непрерывной группе клетей «кварто» стана 2000 г.п. ПАО «ММК»):

- опорный валок:

- длина 2000 мм;
- диаметр 1600 мм;

- рабочий валок:

- длина 2000 мм;
- диаметр от 810 до 850 мм;
- длина шейки вала 1035 мм;
- диаметр шейки вала 540 мм;

- подшипниковые опоры смоделированы упрощенно и представлены в модели в виде абсолютно жестких длинных втулок, коэффициент трения в опорах принимается $f_{оп} = 0,05$ (внешний диаметр подшипниковых опор 650 мм, ширина 735 мм).

На первом этапе исследования посредством трехмерной системы твердотельного моделирования «КОМПАС-3D» построена геометрическая модель процесса листовой горячей прокатки. Окончательное модельное представление процесса горячей прокатки приведено на рисунке 2.1, которое соответствует реальным условиям листового стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК».

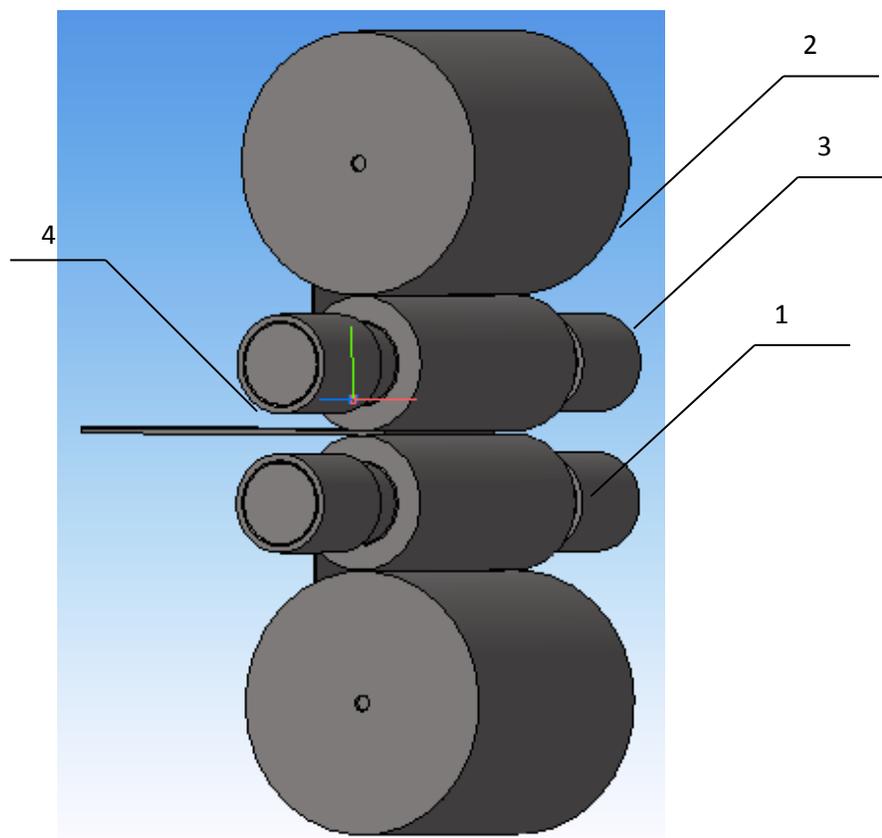


Рисунок 2.1 - Трехмерная модель клетки «кварто» листового стана горячей прокатки: 1-рабочие валки; 2- опорные валки; 3 – шейки рабочего валка; 4 - заготовка

В качестве объекта моделирования на рисунке 2.2. представлена твердотельная модель процесса листовой горячей прокатки в программном комплексе «Deform-3D», на примере 7-ой клетки листового стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК». Созданные в графическом редакторе «КОМПАС-3D» m3d (3D-модель) файлы объемной модели заготовки и инструмента конвертировались в двоичные STL файлы (стереолитография) – общий тип файлов для импорта геометрии в «Deform-3D». Полученные данные передавались в препроцессор «Deform-3D», где создавалась конечно-элементная (КЭ) модель.

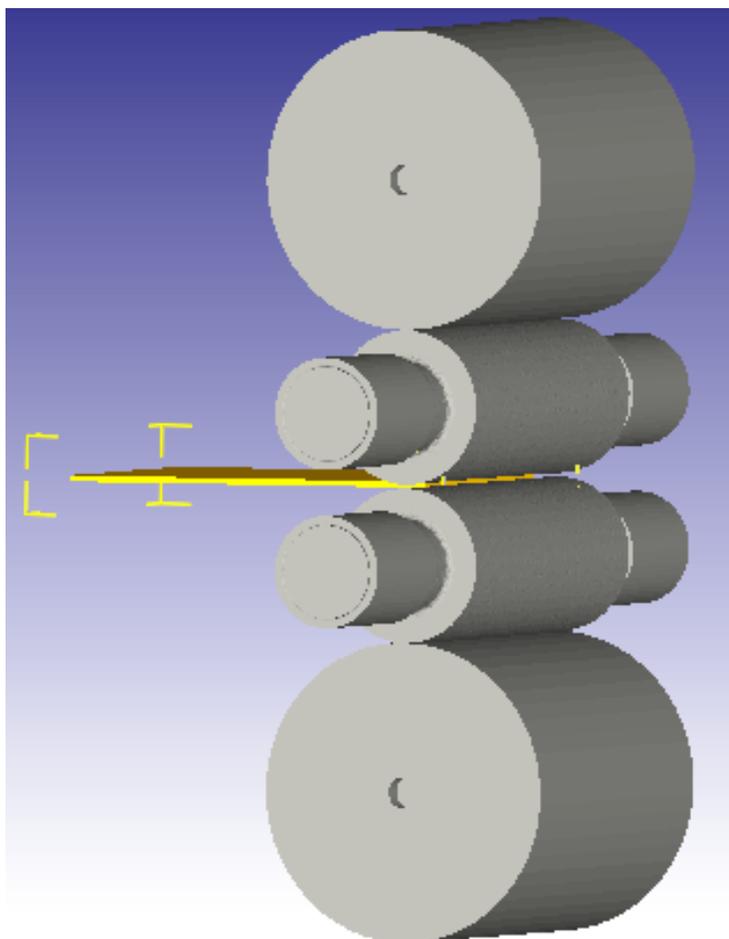


Рисунок 2.2 - Твёрдотельная модель процесса листовой горячей прокатки в программном комплексе «Deform-3D»

После проверки импортированной геометрии КЭ сетка заготовки была сгенерирована и включала около 200 000 объемных элементов типа тетраэдр. Число и тип элементов определяли исходя из геометрических особенностей заготовки и точности расчета.

Вращение рабочим валкам задавали через угловую скорость, равную $1,5...3,5 \text{ с}^{-1}$. Заготовке задавалась температура $1150...1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$, рабочему валку $80...90 \text{ }^{\circ}\text{C}$, опорному валку $40...60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует реальным условиям процесса прокатки.

Для расчетов необходимо задать свойства прокатываемой заготовки. Программный комплекс «Deform-3D» позволяет использовать и формировать

базу данных для различных марок прокатываемых сталей, формируемую по теоретическим или по экспериментальным данным. Так, например, для теоретических значений используются кривые упрочнения материала, полученные с разной температурой и скоростью деформации, а для новых материалов (или материалов, которых нет в базе) используются экспериментальные данные, значения которых задаются на основе испытаний на одноосное растяжение. При проведении исследований использовали теоретический подход.

Для материала заготовки была выбрана идеальная пластическая модель. Используя данные кривых упрочнения (зависимость сопротивления деформации металла от температуры, степени и скорости деформации $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T)$), задавались пластические свойства материалов.

Для проведения расчетов использовали различные марки сталей. В качестве примера на последующих рисунках приведен расчет для известной марки стали - СтЗкп ГОСТ 380-94. Физические свойства материала прокатываемой заготовки (СтЗкп) приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Физические свойства стали марки СтЗкп [154]

Сталь марки СтЗкп ГОСТ 380-94 при 20 °С		
Характеристика	Размерность	Данные
Модуль нормальной упругости, E	ГПа	200
Модуль упругости при сдвиге кручением G	ГПа	78
Плотность, ρ	кг/м ³	7850
Коэффициент Пуассона, μ	-	0,26
Физические и механические свойства стали СтЗкп при повышенных температурах		
Линейное расширение, α, 10 ⁶	1/Град	15,2
Теплопроводность, λ	Вт/(м×К)	32
Предел прочности, σ _B	МПа	21
Относительное удлинение, δ _B	%	64
Относительное сужение, ψ	%	100

Процесс листовой горячей прокатки происходит при высоких температурах прокатываемой заготовки (до 1250 °С) и рабочих валков (до 100 °С). В расчетной модели на контакте «рабочий валок-заготовка» коэффициент трения первоначально был определен по известным формулам А.П. Грудева и принят равным $f = 0,43$.

Установлены следующие параметры расчета. Учитывая литературные данные и практический опыт определено, что необходимо установить приблизительно 1/3 от минимальной длины грани типичного элемента задачи. Число шагов расчета принято равным 2000, шаг расчета – 1 мм.

Расчеты производились с использованием механизма решения МКЭ в программном комплексе «Deform-3D». После окончания расчетов для получения и обработки результатов использовался постпроцессор «Deform-3D».

Реализуемая в данной работе математическая модель процесса листовой горячей прокатки является универсальной и позволяет производить расчет, как для одной клетки «кварто», так и для клеток, объединенных в непрерывную группу.

В результате расчета процесса прокатки в комплексе «Deform-3D» для каждой из исследуемых клеток «кварто» были определены:

- 1) поле интенсивности напряжений (σ_i) для исследуемой системы «рабочий валок – полоса», МПа;
- 2) усилие прокатки (N), т;
- 3) температура прокатываемой заготовки, ее изменение в процессе прокатки (Т, °С), а также ее распределение по ширине и длине очага деформации;
- 4) обжатие прокатываемой заготовки (ϵ , %);
- 5) скорость прокатываемой заготовки (V_p , м/с).

Поскольку основной целью исследований в данном разделе диссертации является теоретические и экспериментальные исследования функционирования

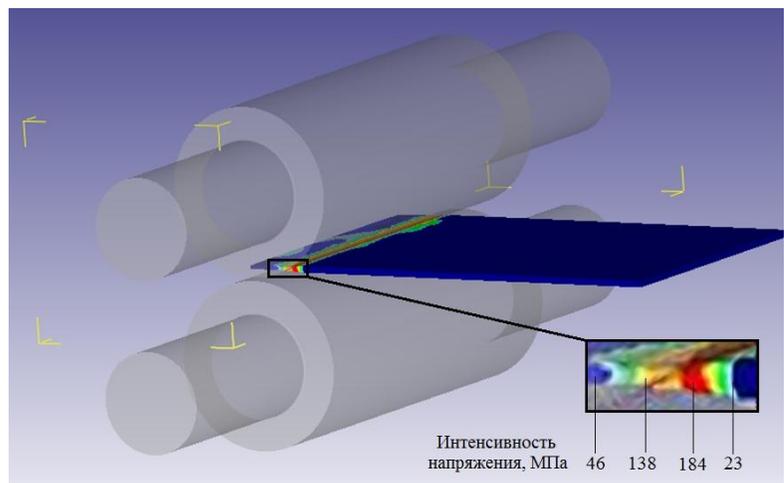
системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» с подачей жидких СМ в валковые узлы «кварто», в дальнейшем исследовании приняты следующие допущения:

– СМ не оказывает влияние на изменение следующих технологических параметров: обжатие (ϵ , %) и скорость (V_p , м/с), поэтому при построении и изучении математической модели процесса листовой горячей прокатки данные параметры не изучались;

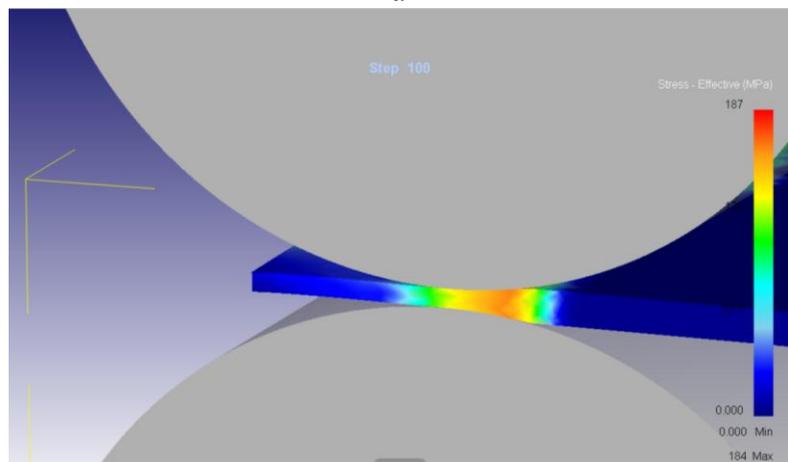
– поскольку жидкие СМ в технологии производства ЛПП преимущественно используются в первых клетях непрерывной чистовой группы, в дальнейшем исследовании рассматривались только первые три клетки непрерывной чистовой группы стана 2000 г.п. ПАО «ММК», на которых установлены системы подачи жидких СМ.

По результатам расчетов математической модели (с применением метода Ньютона-Рафсона, при решателе – «sparse») было получено достаточно большое количество результатов: интенсивность напряжений (σ_i , МПа) в системе «рабочий валок – полоса», усилие прокатки (N , т), температура прокатываемой заготовки (T , °С).

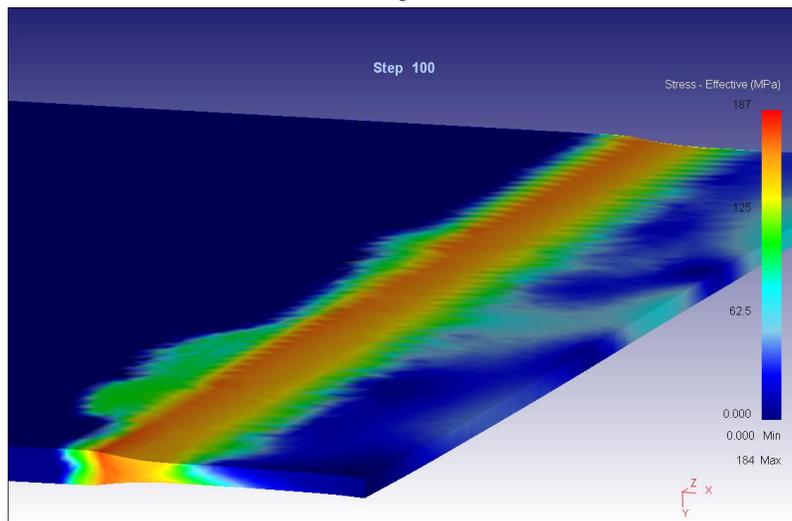
Часть из полученных результатов представлена на рисунках 2.3 – 2.5.



а

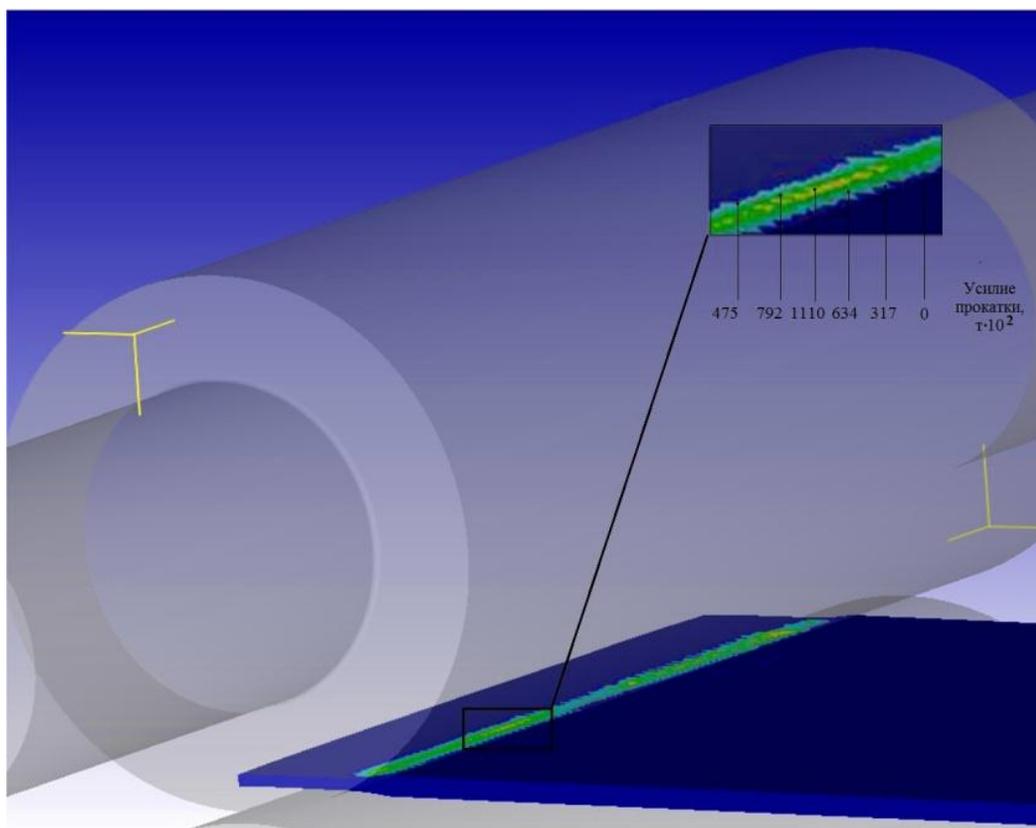


б

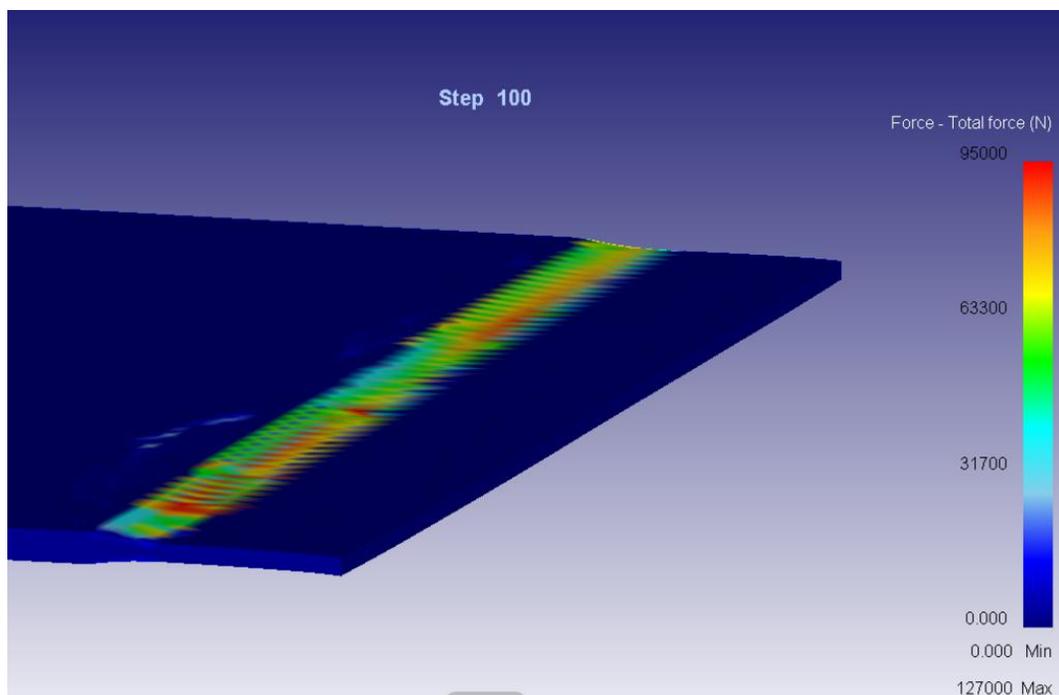


в

Рисунок 2.3 - Поля интенсивности напряжений (σ_i) в системе «рабочий валок – полоса» при горячей прокатке, МПа

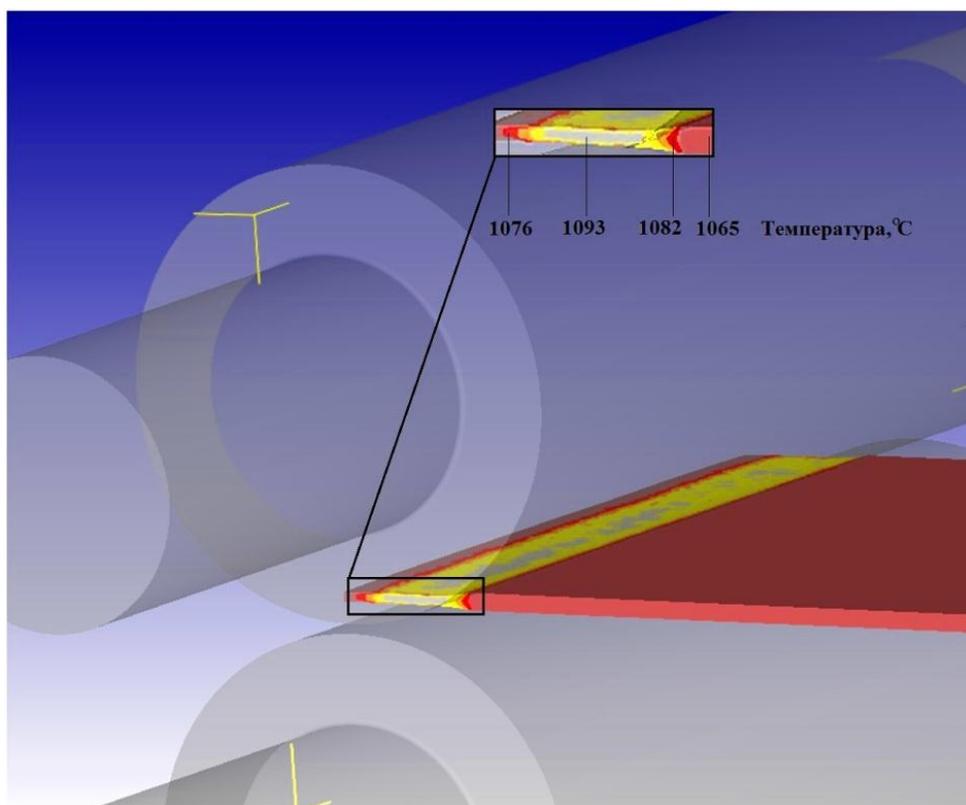


а

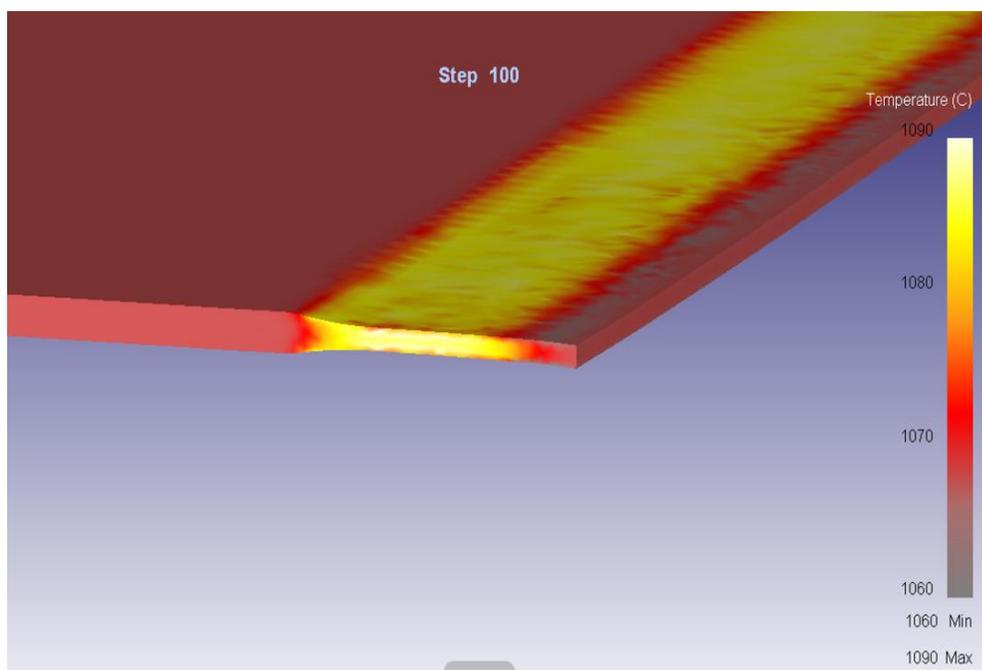


б

Рисунок 2.4 - Усилия прокатки при взаимодействии в системе «рабочий валок-полоса», кН.



а



б

Рисунок 2.5 - Температура прокатываемой заготовки и ее распределение по ширине и длине очага деформации ($T, ^\circ\text{C}$)

Выводы по результатам моделирования

1. В специализированном программном комплексе «Deform-3D» реализована конечно-элементная модель процесса листовой горячей прокатки. Получены численные значения технологических параметров процесса листовой горячей прокатки для исследуемой системы «рабочий валок – полоса»: интенсивность напряжений (σ_i , МПа), усилие прокатки (N в тоннах и МН), температура прокатываемой заготовки и ее распределение по длине и ширине очага деформации, (T), °C, обжатие (ε , %), скорость прокатки (V, м/с).
2. Достоверность математической модели определялась путем сравнения теоретических и фактических (экспериментальных) данных по нескольким критериям: усилие прокатки (N, МН), обжатие заготовки (ε , %), скорость прокатки (V, м/с). Сравнительный анализ проводился с применением пакета программ «STATISTICA». Выборочные результаты по критерию «усилие прокатки» (N, МН) представлены на рисунке 2.6. Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 2.2. Анализ результатов процесса моделирования более чем 200 различных марок сталей и их типоразмеров установил, что средняя величина ошибки составляет 1,6%, максимальная величина ошибки не превышает 9,1%, среднее квадратичное отклонение составляет 0,283 МН, что позволяет признать модель достоверной.
3. Анализ полученных результатов, а также условия постановки и проведения теоретического эксперимента позволили сделать заключение, что для исследования функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» в программном комплексе «Deform-3D» невозможно задать условия подачи СМ в валковые узлы «кварто».
4. Необходимо проведение дополнительных теоретических исследований процесса листовой горячей прокатки: взаимодействие в системах «опорный валок – рабочий валок» и «рабочий валок – полоса» для условия подачи жидких смазочных материалов в валковые узлы «кварто».

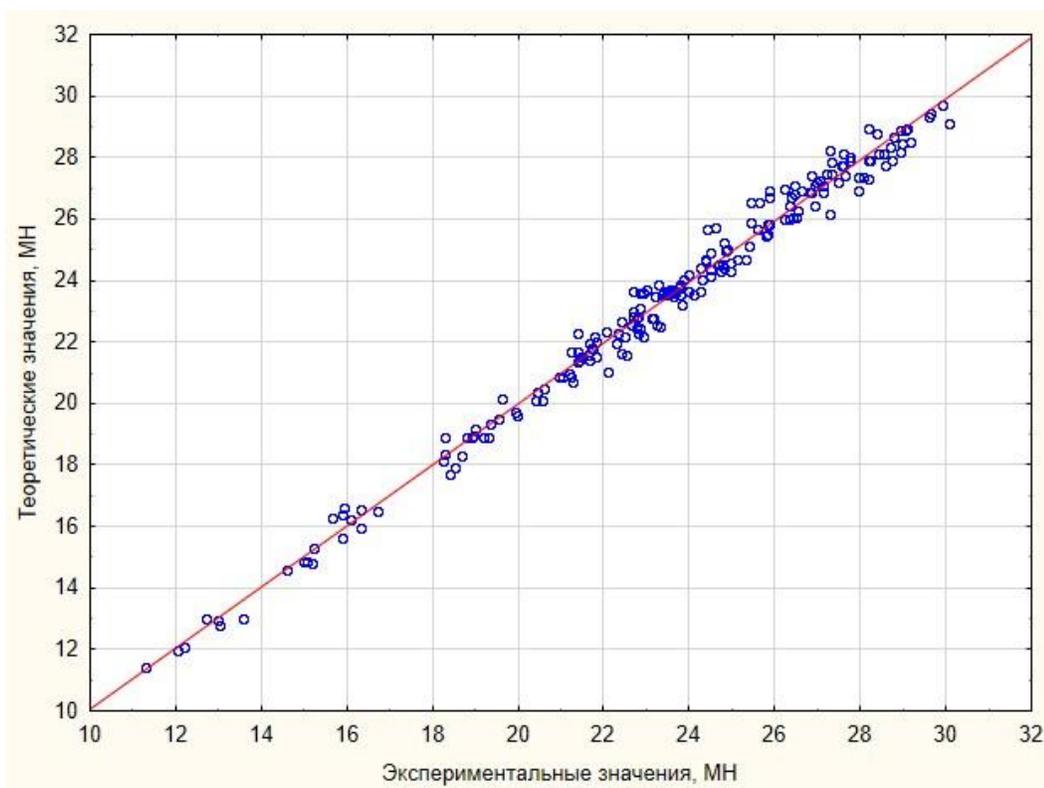


Рисунок 2.6 - Теоретические и экспериментальные значения усилия прокатки (N, МН) модели процесса листовой горячей прокатки

Таблица 2.2 - Результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных результатов математического моделирования

№	Марка (профиль)	Усилие прокатки, МН		Обжатие заготовки, %		Скорость прокатки, м/с	
		N	$\Delta N, \%$	ε	$\Delta\varepsilon, \%$	V_{II}	$\Delta V_{II}, \%$
1	SAE -1006 (2,0x1250)	$\frac{22,92}{22,51}$	1,82	$\frac{48,22}{47,12}$	2,33	$\frac{2,02}{2,12}$	4,71
2	St 37-2 (2,0x1000)	$\frac{20,42}{19,51}$	4,6	$\frac{31,5}{30,3}$	3,96	$\frac{2,03}{2,1}$	3,33
3	09Г2Д (4,0x885)	$\frac{15,60}{15,45}$	0,97	$\frac{40,5}{41,2}$	1,69	$\frac{1,72}{1,65}$	4,24
4	10ХСНД (8,0x1500)	$\frac{26,73}{25,50}$	4,82	$\frac{43,0}{42,6}$	0,93	$\frac{1,25}{1,23}$	1,62
5	10Г2ФБЮ (10,30x1668)	$\frac{26,70}{25,65}$	4,09	$\frac{38,6}{37,2}$	3,76	$\frac{1,15}{1,2}$	4,1

Примечание: в числителе приведены данные полученные по результатам моделирования
в знаменателе экспериментальные данные, полученные из цеховых данных.

2.2 Исследование функционирования системы «опорный валок – рабочий валок» и «рабочий валок – полоса» для условия подачи жидких смазочных материалов

В последнее время широко исследуется вопрос о влиянии смазочного материала на энергосиловые параметры листовой горячей прокатки. Данному вопросу в научно-технической литературе посвящено большое количество исследований [45,150,155,156,157,158].

На листовом стане 2000 горячей прокатки ПАО «ММК» СМ подается в виде дисперсии масла. В ходе промышленных экспериментов на основании анализа и расчета экспериментальных данных был подтвержден положительный эффект от применения СМ, выраженный в снижении энергосиловых параметров (токовые нагрузки главных приводов) в среднем на 3..5% [45,150]. Оценка проводилась экспериментальным путем при работающей и выключенной системе подачи жидких СМ с последующей статистической обработкой полученных результатов.

Однако в настоящее время практически полностью отсутствует понимание физической сущности воздействия СМ на энергосиловые условия горячей прокатки, позволяющего достигать снижения токовых нагрузок главных приводов. При этом, на наш взгляд, заявляемый эффект может быть значительно больше и снижение может достигать 10%, что требует проведения дополнительных теоретических исследований, описывающих взаимодействие в системах «опорный валок – рабочий валок» и «рабочий валок – полоса» для условия подачи жидких СМ в валковые узлы «кварто».

В ходе проведения исследований было установлено, что при использовании программного комплекса «Deform-3D» невозможно задать условия подачи СМ на контакте «опорный валок-рабочий валок». Поэтому требуется разработка дополнительного математического алгоритма,

направленного на развитие теории функционирования систем «опорный валок – рабочий валок» и «рабочий валок – полоса» в условиях подачи жидких СМ в валковые узлы «кварто».

Проводимые исследования включают в себя.

Для системы «опорный валок-рабочий валок»:

- разработку методов и подходов, направленных на математическое моделирование и описание процесса контактного взаимодействия с наличием СМ;

- моделирование процесса контактного взаимодействия, научное обоснование и объяснение механизма работы СМ;

- исследование контактного взаимодействия с наличием СМ;

- разработка рекомендаций по расходу СМ в технологии листовой горячей прокатки.

Для системы «рабочий валок-полоса»:

- исследование влияния режимов СМ на изменение напряженно-деформированного (структурного) состояния полосы в очаге деформации.

Практическая значимость теоретических исследований заключается в определении технологических режимов подачи СМ для листовых станов горячей прокатки, а также разработке последующих рекомендаций для их внедрения.

При проведении нижеприведенных исследований производится обобщение ранее полученных результатов, а также проводятся дополнительные исследования, позволяющие расширить теоретические представления, направленные на развитие теории функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса», путем разработки и применения технологии эффективного смазывания с целью снижения ресурсоёмкости при производстве ЛПП.

2.2.1 Моделирование контактного взаимодействия в системе «опорный валок-рабочий валок» с наличием смазочного материала

В настоящее время накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал, характеризующий определение энергосиловых параметров в межвалковом контакте при прокатке. Наиболее известными считаются модели по расчету усилий с учетом напряженно-деформированного состояния в очаге деформации [75,103,159,160].

Технология листовой горячей прокатки со СМ определяется следующими технологическими особенностями процесса:

- 1) выбор способа и места подачи СМ с целью снижения энергосиловых параметров процесса прокатки;
- 2) наличие или отсутствие СМ в очаге деформации, которое, в свою очередь, оказывает влияние на технологические параметры процесса прокатки (усилие прокатки (P , МН), момент на валу главного привода ($M_{дв}$, МН·м)).

Схема подачи жидких СМ в валковые узлы «кварто» (рисунок 2.7) соответствует реальной системе подачи смазочного материала, установленной на листовом стане горячей прокатки 2000 ПАО «ММК».

Исследование параметров контактного взаимодействия в системе «опорный валок-рабочий валок» с наличием СМ было реализовано аналитическим путем на основе результатов моделирования контакта двух цилиндрических тел при больших нагрузках, вызывающих деформацию контактирующих поверхностей.

Известно, что при больших нагрузках в контакте двух цилиндрических тел возникают деформации поверхностей, наблюдается изменение вязкости СМ. Такое явление возникает преимущественно в контакте двух смазываемых криволинейных поверхностей, особенно при большой разности радиусов кривизны.

Для описываемого случая выдвигается гипотеза, что при наличии СМ на контакте «опорный валок-рабочий валок» реализуется эластогидродинамический режим трения.

Эластогидродинамическим трением называется режим трения, при котором сила трения и толщина смазочного слоя между поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются упругими свойствами поверхностей и реологическими свойствами смазки.

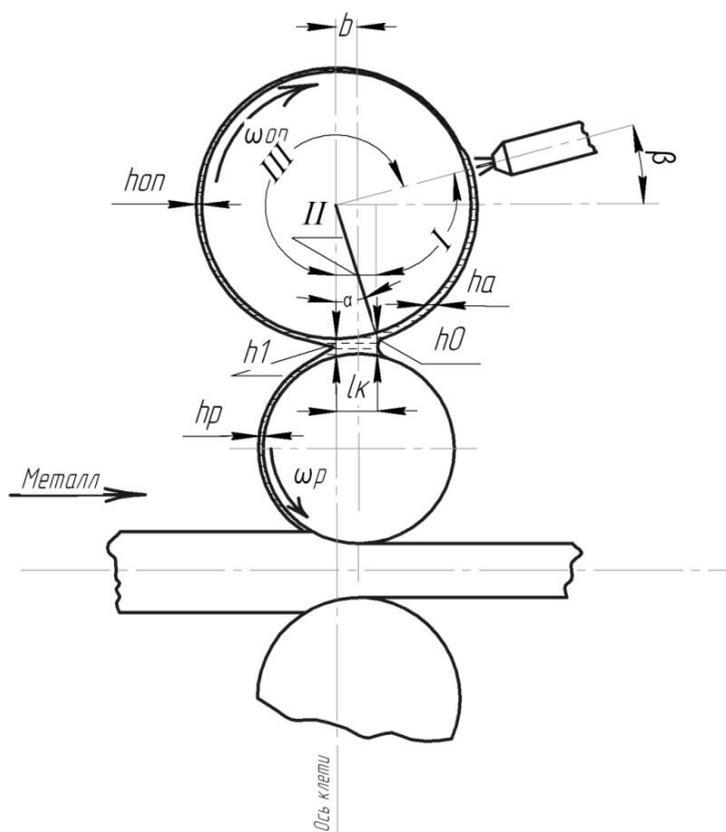


Рисунок 2.7 - Расчетная схема подачи СМ на листовом стане горячей прокатки 2000 ПАО «ММК» [161]:

h_a – толщина адгезировавшегося слоя СМ на поверхности опорного валка, мкм;
 h_0 – толщина слоя СМ на контакте «опорный валок-рабочий валок», мкм;
 h_p – толщина слоя СМ на поверхности рабочего валка, мкм; $h_{оп}$ – толщина слоя СМ на поверхности опорного валка, мкм.

Для решения задачи контактного взаимодействия в системе «опорный валок-рабочий валок» с наличием СМ рассмотрим контакт двух цилиндрических поверхностей значительной длины.

Основными уравнениями, описывающими течение смазочной жидкости в эластогидродинамическом контакте, являются уравнение Рейнольдса (2.1), формула Баруса (2.2) и уравнение, описывающее форму зазора с учетом упругих деформаций поверхностей $\delta(p)$ тел качения (2.3):

$$\frac{dp}{dx} = 6 \cdot \mu \cdot U_{\Sigma} \cdot \frac{h-h_0}{h^3}, \quad (2.1)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{\alpha \cdot p}, \quad (2.2)$$

$$h(x) = h_0 + \frac{x^2}{2 \cdot \rho_{\text{пр}}} + \delta(p), \quad (2.3)$$

где μ_0 - динамическая вязкость СМ при температуре масла на входе в контакт, Па·с;

α - пьезокоэффициент вязкости;

$R_{\text{пр}} = (R_1 \times R_2) / (R_1 + R_2)$ – эквивалентный радиус кривизны упругости контактирующих тел, мм;

$E_{\text{пр}} = (E_1 \times E_2) / (E_1 + E_2)$ - эквивалентный модуль упругости контактирующих тел, МПа;

$U_{\Sigma} = V_1 + V_2$ - суммарная скорость контактирующих поверхностей, м/с.

Расчетная схема контактного взаимодействия в системе «рабочий валок - опорный валок» приведена на рисунке 2.8, СМ условно не показан.

Для выражения (2.1) определение неизвестной величины $\delta(p)$ осуществлялось совместным решением теории упругости, уравнения Рейнольдса и гипотезы Винклера.

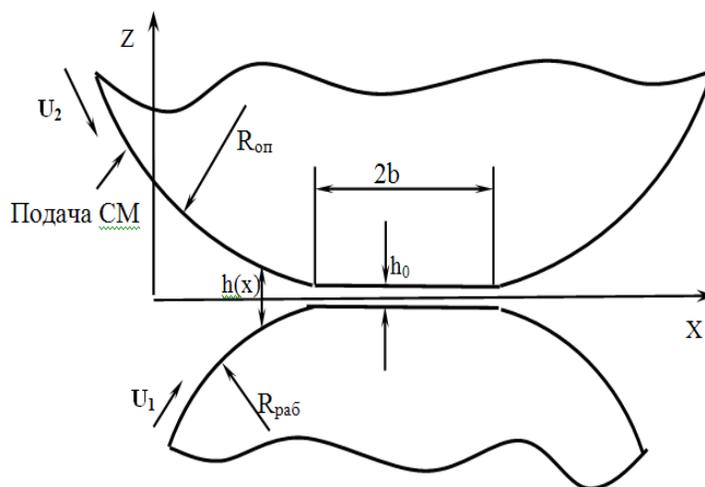


Рисунок 2.8 - Геометрия контакта «опорный валок–рабочий валок».

Система уравнений (2.1)-(2.3) не имеет аналитического решения и решается только **численными методами**. Для численного решения систем уравнений (2.1)-(2.3) необходимо аналитически определить неизвестный параметр, входящий в уравнение (2.3) – толщину слоя СМ на контакте «опорный валок–рабочий валок» (h_0 , мкм).

Определение толщины смазочного слоя на контакте «опорный валок-рабочий валок»

В научной литературе встречаются многочисленные расчетные формулы для определения толщины смазочного слоя (h_0 , мкм) в точке максимума гидродинамических давлений.

Наиболее известна формула, полученная Д.С. Кодниром и В.Н. Васиным для контакта цилиндров:

$$\frac{h_0}{\rho_{\text{пр}}} = \frac{1,864 \cdot p_S^{0,723} \cdot p_U^{0,558} \cdot p_N^{0,167}}{K_1}, \quad (2.4)$$

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

$$K_1 = 1 + P_T^{0,65} \cdot \lg(0,9 \cdot P_S^{0,114} \cdot P_U^{0,285} \cdot P_N^{0,0855}). \quad (2.5)$$

В приведенных формулах (2.4) и (2.5) выражения P_S , P_U , P_N , P_T – безразмерные критерии которые определяются:

$$P_S = \frac{\mu_0 \cdot U_{\Sigma}}{E_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{пр}}}; \quad P_U = \alpha \cdot E_{\text{пр}}; \quad P_N = \frac{E_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{пр}}}{q_n}; \quad P_T = \frac{\mu_0 \cdot \beta \cdot V_1^2}{\lambda_M}, \quad (2.6)$$

где μ_0 - динамическая вязкость СМ при температуре масла на входе в контакт, Па·с;

α - пьезокоэффициент вязкости СМ;

β - коэффициент экспоненциальной зависимости вязкости СМ от температуры;

λ_M - коэффициент теплопроводности СМ, Вт/м×К;

q_n - нагрузка на единицу длины линии контакта, кН/мм;

$E_{\text{пр}} = (E_1 \times E_2) / (E_1 + E_2)$, - эквивалентный модуль упругости контактирующих тел, МПа.

Согласно многочисленным исследованиям (Горячева И.Г., Елманов И.М., Терентьев Д.В. и др.) толщина смазочного слоя при эластогидродинамическом режиме трения находится в диапазоне $h_0=2...6$ мкм [162,163,164].

Учитывая достаточно большой сортамент прокатываемых марок, а также широкий диапазон типоразмеров прокатываемых заготовок, была проведена аналитическая проверка сходимости модели (2.4)-(2.6). Модель была численно реализована в среде «MS Excel». Статистическая оценка сходимости результатов моделирования проводилась в пакете «STATISTICA».

Результаты статистической оценки представлены на рисунке 2.9. Анализ результатов более 200 различных марок сталей и их типоразмеров установил, что для эластогидродинамического режима трения, при котором толщина СМ находится в диапазоне $h_0=2...6$ мкм, значения, полученные по формулам (2.4)-(2.6), совпадают на 20%, что позволяет признать модель недостоверной, а входящие в модель параметры требующими уточнения.

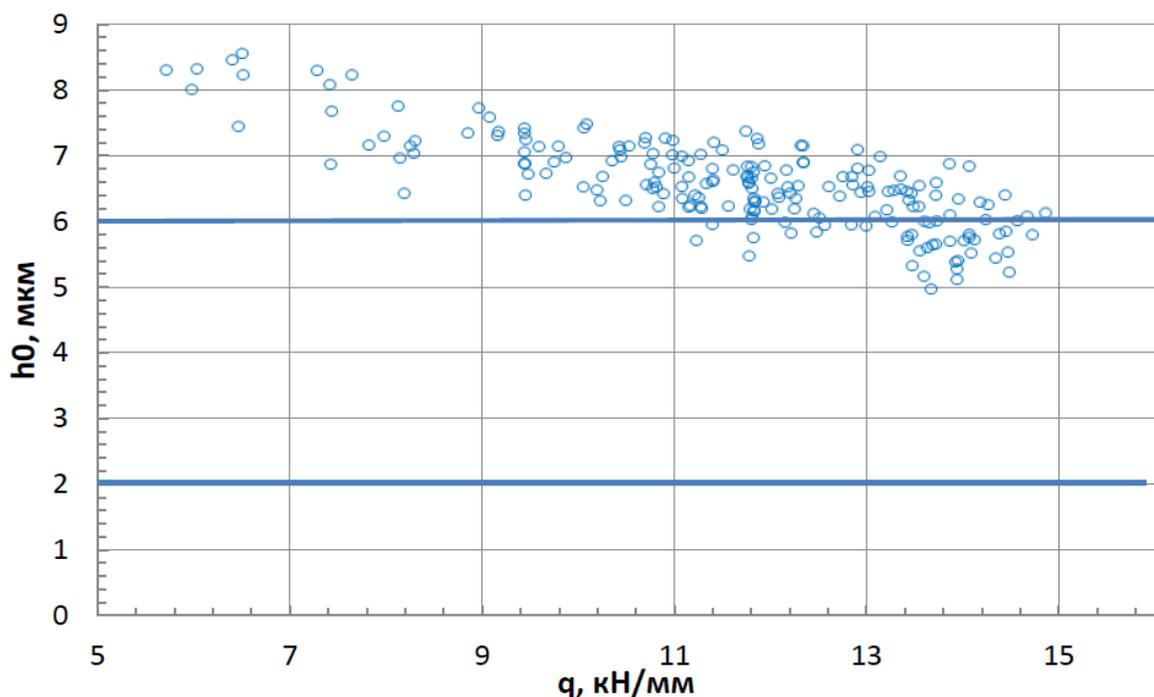


Рисунок 2.9 - Результаты статистической оценки модели определения толщины смазочного слоя (h_0 , мкм) (до модернизации).

Для системы «опорный валок–рабочий валок», исходя из заданного условия, что толщина СМ находится в диапазоне $h_0=2\dots6$ мкм, была произведена адаптация формул (2.4)-(2.6). Адаптация была произведена путем численной реализации в среде «MS Excel» с помощью использования программируемых макросов и встроенной функции «Поиск решения».

Произведена апробация известных подходов и выданы рекомендации о применимости формул для технологии листовой горячей прокатки с учетом реологии прокатываемой заготовки: в результате получены численные значения коэффициентов, для которых реализуется предложенный режим эластогидродинамического трения:

$$\frac{h_0}{\rho_{\text{пр}}} = \frac{1,864 \cdot p_S^{\alpha_1} \cdot p_U^{\alpha_2} \cdot p_N^{\alpha_3}}{K_1}, \quad (2.7)$$

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

$$K_1 = 1 + P_T^\beta \cdot \lg(0,9 \cdot p_S^{\alpha_1} \cdot p_U^{\alpha_2} \cdot p_N^{\alpha_3}). \quad (2.8)$$

Решения систематизированы в группы, согласно расчетным характеристикам сопротивления деформации прокатываемых заготовок (σ_{0i} , МПа). Численные значения коэффициентов приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - 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

Результаты статистической оценки полученных формул (2.8)-(2.9) представлены на рисунке 2.10. Анализ результатов показывает, что расчетные формулы модели (2.7)-(2.8) можно признать достоверными.

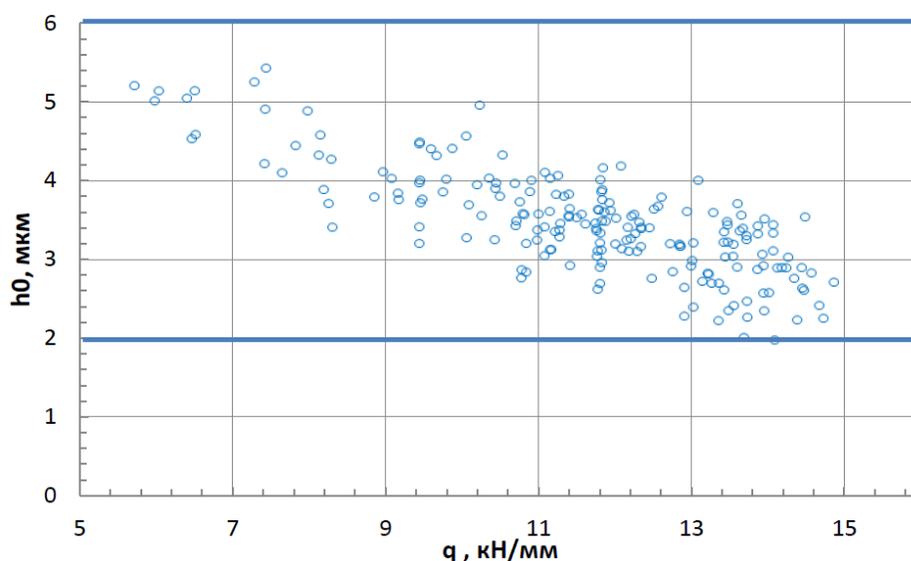


Рисунок 2.10 - Результаты статистической оценки модели определения толщины смазочного слоя (h_0 , мкм) (после модернизации)

Модель формирования смазочного слоя на контакте «опорный валок-рабочий валок»

Принципиальным отличием исследуемой расчетной схемы смазывания валков является место установки форсунки для подачи СМ. В расчетной схеме, представленной на рисунке 2.7, форсунка для подачи СМ расположена со стороны выходной части клетки и подает СМ на поверхность опорного валка. Для исключения эффекта «масляного голодания» опорный валок должен сделать минимум один оборот, чтобы СМ попал в контакт между опорным валком и рабочим валком.

Согласно литературным данным, толщина слоя смазки на поверхности опорного валка ($h_{оп}$) определяется следующими технологическими параметрами: уровнем адгезии СМ и параметрами шероховатости R_z бочки валка.

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

$$h_{см} = h_a + h(x), \quad (2.9)$$

где $h(x)$ – определяется по выражению (2.3);

h_a – толщина адгезировавшегося слоя СМ (мкм) на поверхности опорного валка, согласно рисунку 2.8.

Величина h_a определяется, мкм:

$$h_a = h_{\bar{\sigma}аз} + K_{Rz}, \quad (2.10)$$

где $h_{\bar{\sigma}аз}$ – толщина адгезировавшегося слоя СМ при базовой шероховатости поверхности, мкм, которая определялась согласно работам Терентьева Д.В., Огаркова Н.Н., с учетом маслосъемности контактирующих поверхностей;

K_{Rz} – коэффициент, характеризующий интенсивность захвата СМ неровностями поверхности.

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

$$V_a = l_a \times h_a, \quad (2.11)$$

где l_a – длина дуги опорного валка, на которой происходит адгезия СМ, мм.

Объем подаваемого СМ за время равное одному обороту опорного валка, мм³:

$$Q_a = (V_a \times \pi \times D_{on} \times n_{on} \times L) / l_a, \quad (2.12)$$

где L – длина бочки валка, мм;

n_{on} – количество оборотов опорного валка, об/мин;

D_{on} – диаметр опорного валка, мм.

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

$$V_{p/o} = h_{см} \times 2l_k, \quad (2.13)$$

где $h_{см}$ – толщина смазочного слоя, определяемая по формуле (2.9), мкм;

l_k – протяженность площадки упругого сжатия рабочего и опорного валков в зоне их соприкосновения, мм.

Таким образом, получено аналитическое выражение, позволяющее определять количество СМ на контакте «опорный валок-рабочий валок» при условии реализации эластрогидродинамического режима трения.

Однако полученное решение имеет частный характер, поскольку не учитывает изменения параметров шероховатости в контакте «опорный валок-рабочий валок». Необходимо учитывать, что время эксплуатации (межперевалочный период) может составлять до 150...180 часов для опорных и до 5...8 часов для рабочих валков.

Для поддержания стабильного условия реализации эластрогидродинамического режима трения в пределах каждой (i-ой)

монтажной партии, необходимо учитывать текущие (временные) изменения параметра K_{R_z} .

В работе предложен новый параметр $K_{R_z(i,j)}(t)$, который учитывает изменение шероховатости опорного валка ($k_{ш}^{оп}(t)$) и рабочего валка ($k_{ш}^{раб}(t)$) в пределах i -й монтажной партии, для j -ой клетки листового стана горячей прокатки. Безразмерный параметр $K_{R_z(i,j)}(t)$ представлен в виде.

$$K_{R_z(i,j)}(t) = \frac{k_{ш(i,j)}^{он}(t)}{k_{ш(i,j)}^{раб}(t)} \quad (2.14)$$

Коэффициенты $k_{ш i,j}^{оп}(t)$ и $k_{ш i,j}^{раб}(t)$ были получены по результатам статистической обработки массива экспериментальных данных, включающих наблюдение за 120 парами валков.

Измерение параметров шероховатости рабочих и опорных валков производили при помощи портативного измерителя шероховатости «TR200 Roughness Tester TIME Group Inc». Измерения производились не менее чем по пяти равноудаленным точкам на поверхности валков. Для статистической достоверности результатов в каждой точке производилось не менее пяти измерений. По результатам измерений были построены регрессионные уравнения. Значения коэффициентов регрессионных уравнений были найдены с помощью обобщенного метода наименьших квадратов.

Для i -ой монтажной партии и j -ой клетки листового стана горячей прокатки получены следующие выражения:

– для опорного валка:

$$k_{ш(i,j)}^{он}(t) = 1,91 - 1,458 \times R_{Z_0}^0 - 0,77 \times t_i + 0,906 \times \sigma + 2,014 \times \omega_{он}; \quad (2.15)$$

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

– для рабочего валка:

$$k_{u(i,j)}^{pab}(t) = 2,79 - 3,678 \times R_{Zppa}^0 - 1,894 \times t_i + 3,96 \times \sigma + 0,0154 \times \frac{P}{B_3} + \\ + 0,4128 \times \beta + 3,35 \times \omega_{pab}; \quad (2.16)$$

$$(R^2 = 0,85; F_{0,95;6}^{расч} = 175,3 \geq F^{табл} = 2,54),$$

где $R_{Zоп}^0$, $R_{Zраб}^0$ – базовое значение параметра шероховатости опорного и рабочего вала (устанавливается при перешлифовке), мкм; t_i – время эксплуатации опорного и рабочего вала в j-ой клетки, мин; $\omega_p, \omega_{оп}$ – угловая скорость рабочего и опорного вала соответственно, рад/сек; $h_{баз}$ – толщина адгезировавшегося слоя СМ на поверхности опорного вала, мкм; P – усилие прокатки, кН; B_3 – ширина прокатываемой заготовки, мм; β – коэффициент использования длины бочки вала.

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

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

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

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

Определение расхода смазочного материала в технологии листовой горячей прокатки

В принятой технологии листовой горячей прокатки СМ подается в контакт между рабочим и опорным валком. Для определения расхода примем следующие допущения:

– в зоне контакта поверхности валков образуют зазор, который заполняется СМ (рис 2.8), в результате создается так называемый масляный (смазочной) клин;

– при движении твердой поверхности примыкающий к ней слой жидкости движется с той же скоростью, т.е. скольжение между твердым телом и приконтактным слоем жидкости отсутствует;

– поверхности вращающихся валков нагнетают СМ в сужающийся приконтактный зазор (рисунок 2.8), в результате в смазочном клине возникает давление, растущее по мере приближения к вершине клина (к плоскости входа в зону межвалкового контакта). Если в вершине смазочного клина оно достигает величины давления пластической деформации (предела текучести металла), то слой СМ определенной толщины будет входить в зону межвалкового контакта.

Таким образом, принято, что в приконтактной зоне действует условный «гидродинамический насос», нагнетающий СМ в зону контакта валков. Кроме того, поступление СМ в зону контакта обеспечивается его захватом неровностями валков, в результате чего и реализуется процесс адгезии и возникают касательные напряжения сдвига в смазочном слое, т.е. при смыкании поверхностей часть СМ остается в углублениях микрорельефа и втягивается в зону контакта [161].

Для определения толщины смазочного слоя в межвалковом контакте необходимо знать характеристики СМ.

В настоящее время на стане 2000 г.п. ПАО «ММК» применяется СМ с характеристиками в соответствии с ТИ 101-П-ГЛ10-374–2004. При проведении исследований применялись следующие СМ: QUAKEROL N HB1082 и РОСОЙТ-МГП.

Динамическая вязкость (η_0) СМ определялась в лабораторных условиях на ротационном вискозиметре по методу Брукфильда (ГОСТ 1929-87), в лаборатории ХТЦ-РОСОЙЛ, г. Уфа.

Исследования динамической вязкости (η_0) СМ проводились при различных температурах, которые контролировались при помощи бесконтактного пирометра «TL 315E Time Group inc.». Температура СМ задавалась в рамках нормативов для температуры рабочих валков, принятых на ПАО «ММК». Результаты лабораторных исследований приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Измеренная величина динамической вязкости СМ при различных температурах.

СМ \ T °C	T = 60° C	T = 80° C	T = 85° C
QUAKEROL N HB1082	$\eta_0=0,0188 \text{ Па}\times\text{с}$	$\eta_0=0,0114 \text{ Па}\times\text{с}$	$\eta_0=0,010 \text{ Па}\times\text{с}$
РОСОЙТ-МГП	$\eta_0=0,0192 \text{ Па}\times\text{с}$	$\eta_0=0,0117 \text{ Па}\times\text{с}$	$\eta_0=0,013 \text{ Па}\times\text{с}$

Пьезометрический коэффициент вязкости (α) для каждого значения температуры рассчитывался по формуле [165]:

$$\alpha_i = 2,38 \cdot 10^{-2} - 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot (T^{\circ}\text{C} - 40) \quad (2.17)$$

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

$$V_{p/o}(t) = (h_{cm} \times 2l_k) \times [1 - K_{R_z(i,j)}(t)]. \quad (2.18)$$

Расход СМ, подаваемого на j-ю клеть прокатного стана, мм³/мин:

$$Q_{i,j}(t) = \frac{(h_{cm} \times 2l_k) \times L}{t} \times [1 - K_{R_z(i,j)}(t)], \quad (2.19)$$

где L –длина бочки опорного вала, мм; l_k – полуширина площадки контакта, мм; t – время, за которое валок совершает один оборот, мин.

Таким образом, расчет толщины СМ на контакте «опорный валок – рабочий валок» выполняется по следующим зависимостям.

Входящий в выражение (2.18) и (2.19) параметр l_k - протяженность площадки упругого сжатия рабочего и опорного валков в зоне их соприкосновения, определим по формуле Герца–Беляева, расчетная схема приведена согласно исследованиям проф. В.Л. Мазура [48].

$$l_k = 2 \cdot 1.128 \cdot \sqrt{\eta \cdot q_m \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}, \quad (2.20)$$

где
$$\eta = \frac{1-\vartheta_1^2}{E_1} + \frac{1-\vartheta_2^2}{E_2}, \quad (2.21)$$

R_1 и R_2 – радиусы опорного и рабочего валков соответственно, мм;

ϑ_1, ϑ_2 – коэффициенты Пуассона;

E_1, E_2 – модули упругости, (МПа);

q_m – распределенная погонная нагрузка, (МН/м).

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.

По предложенному алгоритму разработаны режимы подачи СМ, результаты которых приведены в таблице 2.5 [166].

Таблица 2.5 - Режимы подачи СМ валки НШСП

Сопротивления деформации заготовки (σ_{0i}), МПа	Рекомендуемый расход СМ в непрерывной чистовой клетке ($\text{мм}^3/\text{мин} \cdot 10^6$)		
	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

Анализ полученных результатов исследования при сопоставлении с экспериментальными данными и расчетным параметром $K_{Rz i,j}(t)$, позволил разработать ряд рекомендаций.

2.3 Моделирования процесса контактного взаимодействия в системе «опорный валок – рабочий валок» с наличием смазочного материала

На следующем этапе были проведены теоретические исследования влияния рекомендованных режимов СМ на изменение напряженного состояния в системе «опорный валок – рабочий валок». Исследования были реализованы в программном комплексе «Deform-3D».

Модельное представление для определения энергосиловых факторов в системе «опорный валок – рабочий валок» сформировано следующим образом: рабочий валок, представленный как упругая среда, взаимодействует с опорным – абсолютно жестким телом, причём рабочий валок также установлен в абсолютно жёстких опорах. Усилия прокатки были экстраполированы на рабочий валок, который ранее по условию вышеописанной задачи является упругопластическим. Расчетная схема взаимодействия в исследуемой системе «опорный валок – рабочий валок» представлена на рисунке 2.11.

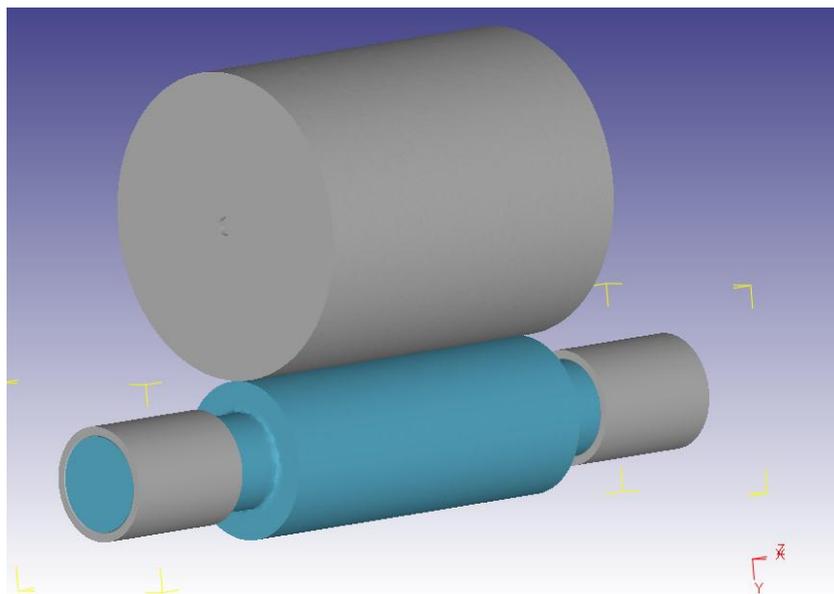


Рисунок 2.11 - Твёрдотельная модель процесса взаимодействия в системе «опорный валок - рабочий валок» в Deform-3D

Современные рабочие валки представляют собой двух или трехслойные биметаллические материалы, что обеспечивает уникальное сочетание эксплуатационных свойств. Сердцевина и шейка рабочих валков

изготавливаются из чугуна (высокопрочный чугун с шаровидным графитом). Рабочий слой вала изготавливается из высокохромистого чугуна (с содержанием хрома 15...18%) или из быстрорежущей стали, например, 200ХВФМ. Объем рабочего слоя составляет 10...15 % от объема вала.

Задача, которая решалась посредством моделирования, заключалась в исследовании контактных напряжений в системе «опорный валок – рабочий валок», поэтому при моделировании было принято допущение – заменить слоистый биметаллический материал на упругое, однородное и изотропное тело, выполненное из быстрорежущей марки стали.

Технологические и физико-механические данные быстрорежущей марки стали 200ХВФМ, приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Технологические и физико-механические свойства быстрорежущей стали марки 200 ХВФМ [154]

Характеристика	Размерность	Данные
Твердость, НS	ГПа	75-90
Предел прочности на растяжение	МПа	650-800
Модуль упругости	ГПа	22-24
Коэффициент линейного удли	$(20 \div 100^{\circ}\text{C})10^6/^{\circ}\text{C}$	13-15
Ударная вязкость	Дж/см ²	3,5-4,5
Теплопроводность	Вт/м·К	21-23
Теплоемкость	Дж/кг·К	420-450

После проверки импортированной геометрии была сгенерирована конечно-элементная (КЭ) сетка рабочего вала, которая включала около 200 000 объемных элементов типа тетраэдр. Конечно-элементная модель рабочего вала, на примере клетки № 7 стана 2000 г.п. ПАО «ММК», приведена на рисунке 2.12.

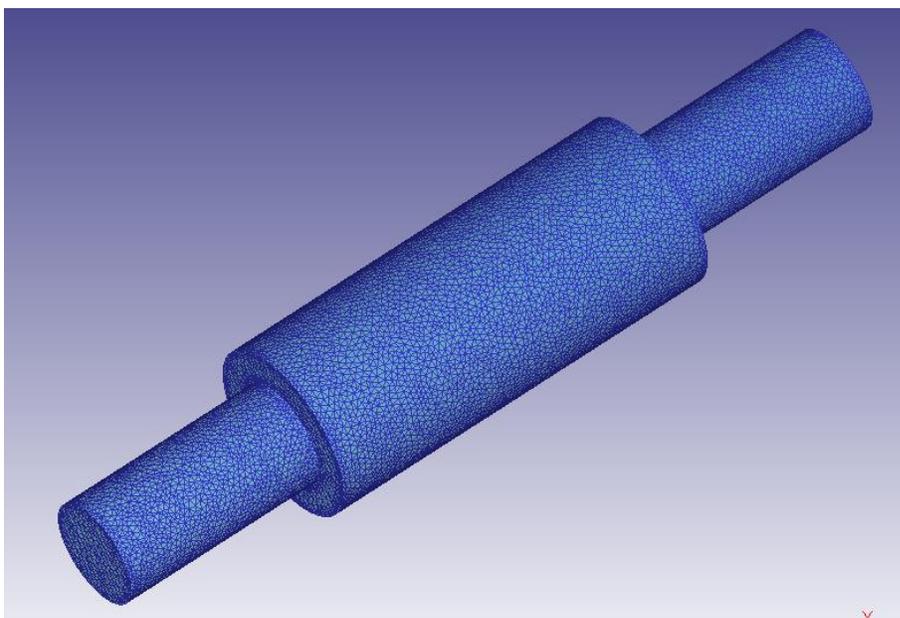


Рисунок 2.12 - Конечно-элементная модель рабочего валка

При проведении моделирования приняты следующие допущения и ограничения:

- материал опорного валка – абсолютно жесткий;
- подшипниковые опоры рабочего валка неподвижны, коэффициент трения в них принят равным нулю;
- опорный валок – неподвижный;
- рабочему валку задана температура – 80°C , опорному валку – 40°C .

Поскольку моделируется процесс с подачей СМ, то при выполнении исследования необходимо сравнить результаты моделирования при двух условиях:

- взаимодействие в системе «опорный валок - рабочий валок» без СМ;
- взаимодействие в системе «опорный валок - рабочий валок» с наличием на контактной поверхности СМ.

Для вышеперечисленных случаев в качестве начальных условий в программном комплексе «Deform-3D» необходимо на контакте «опорный валок – рабочий валок» задавать соответствующие коэффициенты трения:

– для условия взаимодействия в системе «опорный валок – рабочий валок» без СМ принимаем, что реализуется условие для насыщенного пластического контакта (НПК), для которого коэффициент трения определим согласно работам И.В. Крагельского [167]:

$$f_0 = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,9 \cdot \Delta^{0,5} \cdot \left(\frac{p_c}{HB} \right)^{0,5}, \quad (2.22)$$

где Δ – комплексная характеристика шероховатости рабочего валка;

HB – твердость рабочего тела;

p_c – контурные давления на контакте «опорный валок - рабочий валок», МПа;

β – триботехнические характеристики рабочего валка;

– для условия взаимодействия в системе «опорный валок - рабочий валок» с наличием СМ коэффициент трения определяли по формулам Ю.Н. Дроздова, Д.С. Коднира и Е.П. Жильникова [59,167,168].

$$f_{cm} = \frac{4,5 \times 10^{-3} \times \sigma_n^{0,02} \times \left[10 + \lg \left(\frac{HB \times R_a}{E_{np} \times \rho_{np}} \right) \right]}{\eta^{0,07} \times U_\Sigma^{0,12} \times V_s^{0,2}}; \quad (2.23)$$

$$f_{cm \square} = \frac{v_s U_s}{h_0 p_{max} \left[1 + 10^a \left(\frac{U_s}{2} \sqrt{\frac{v_s}{\lambda T_s}} \right)^b \right]}; \quad (2.24)$$

где σ_n - контактные напряжения, определяемые по формуле Герца–Беляева, МПа;

η_0 - динамическая вязкость СМ, Па·с;

R_a – средне арифметическое отклонение профиля рабочего валка, мкм;

$V_s = V_{раб} - V_{оп}$, где $V_{раб}, V_{оп}$ – линейная скорость рабочего и опорного валка соответственно, м/сек.;

v_s – кинематическая вязкость СМ, (Па×с);

h_0 – толщина СМ определяемая формуле (2.4), мкм;

p_{max} – максимальное гидродинамическое давление в смазочном слое, МПа;

a и b – координаты начала и конца области трения;

λ – теплопроводность СМ, Вт/м×К;

T_s – температура СМ, Т°С.

По формулам (2.23)- (2.24) был произведен расчет коэффициентов трения, результаты которого приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Расчетные значения коэффициента трения на контакте «опорный валок - рабочий валок»

Режимы	Расход СМ, л/мин	Коэффициент трения
0	Смазочный материал отсутствует	0,22
1	0,12	0,17
2	0,1	0,15
3	0,05	0,13
4	0,21	0,10

На рисунках 2.13-2.17 приведены результаты моделирования в программном комплексе «Deform-3D» для рассчитанных условий, приведенных в таблице 2.7.

В результате расчета процесса контактного взаимодействия в системе «рабочий валок – опорный валок» было исследовано изменение значения параметра – интенсивность напряжений (σ_i , МПа) с наличием и с отсутствием СМ.

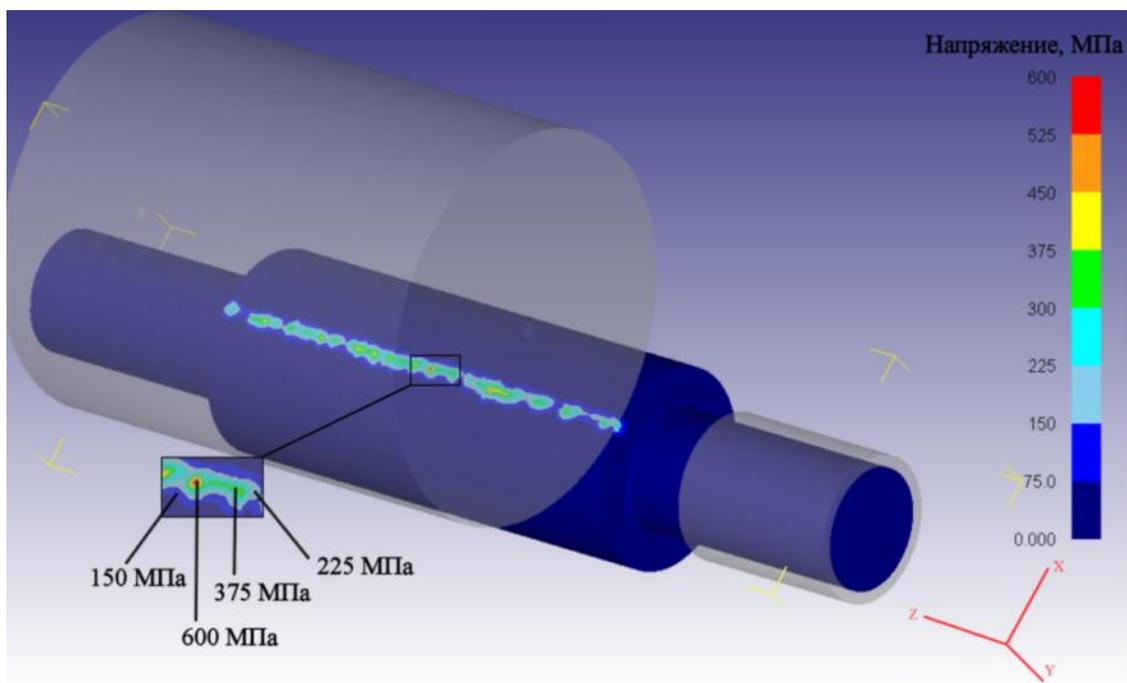


Рисунок 2.13 - Распределение интенсивности напряжений (σ_i) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок», МПа. Эксперимент 0 - смазочный материал отсутствует, $f=0,22$

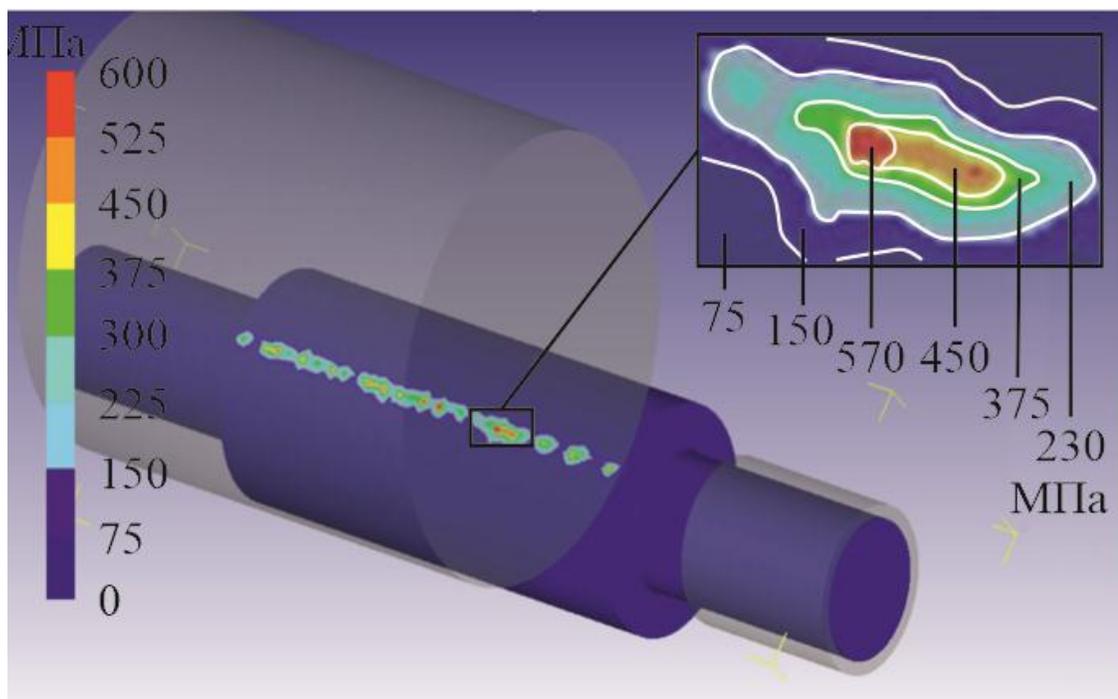


Рисунок 2.14 - Распределение интенсивности напряжений (σ_i) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок», МПа. Режим №1; $Q=0,12$ л/мин, $f=0,17$

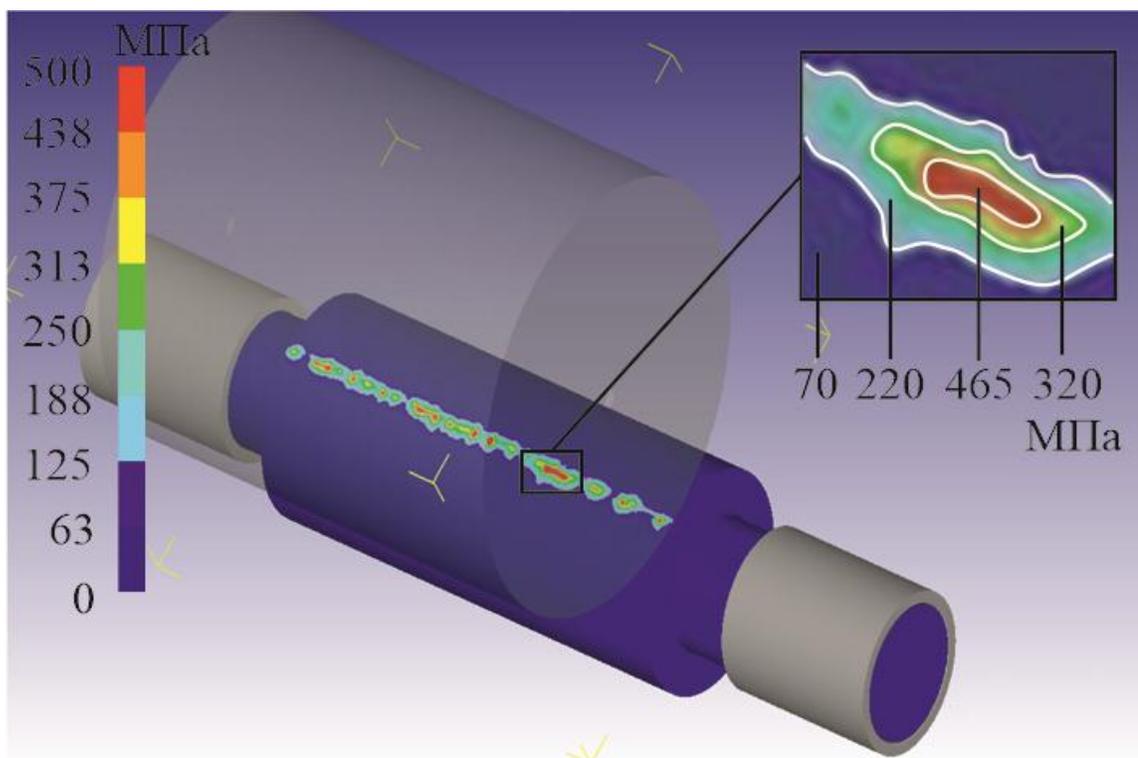


Рисунок 2.15 - Распределение интенсивности напряжений (σ_i) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок», МПа.
Режим №2; $Q=0,1$ л/мин, $f=0,15$

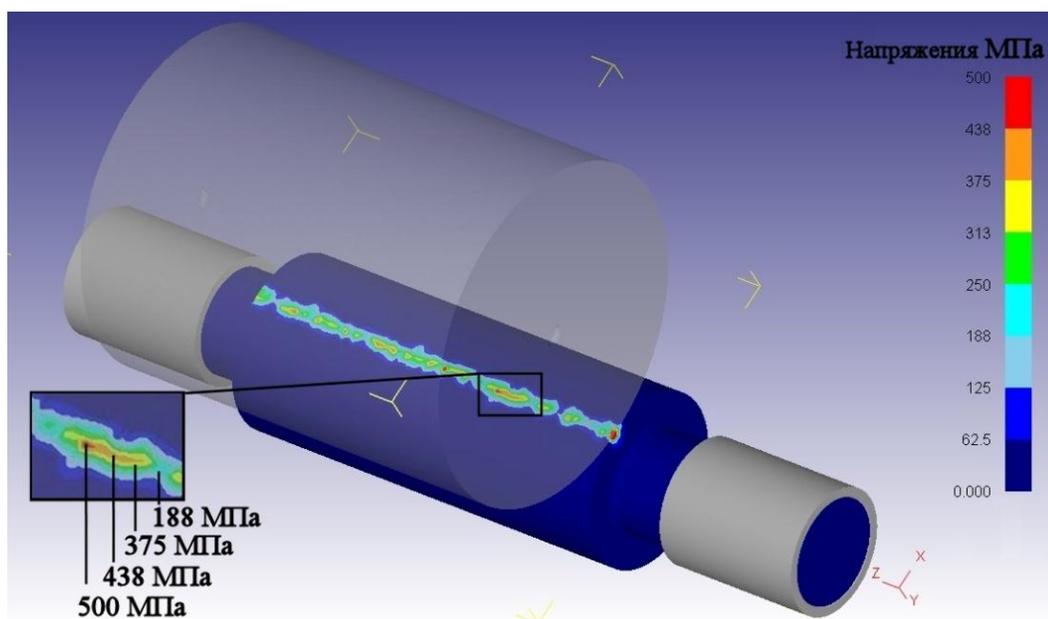


Рисунок 2.16 - Распределение интенсивности напряжений (σ_i) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок», МПа.
Режим №3; $Q=0,051$, $f=0,13$

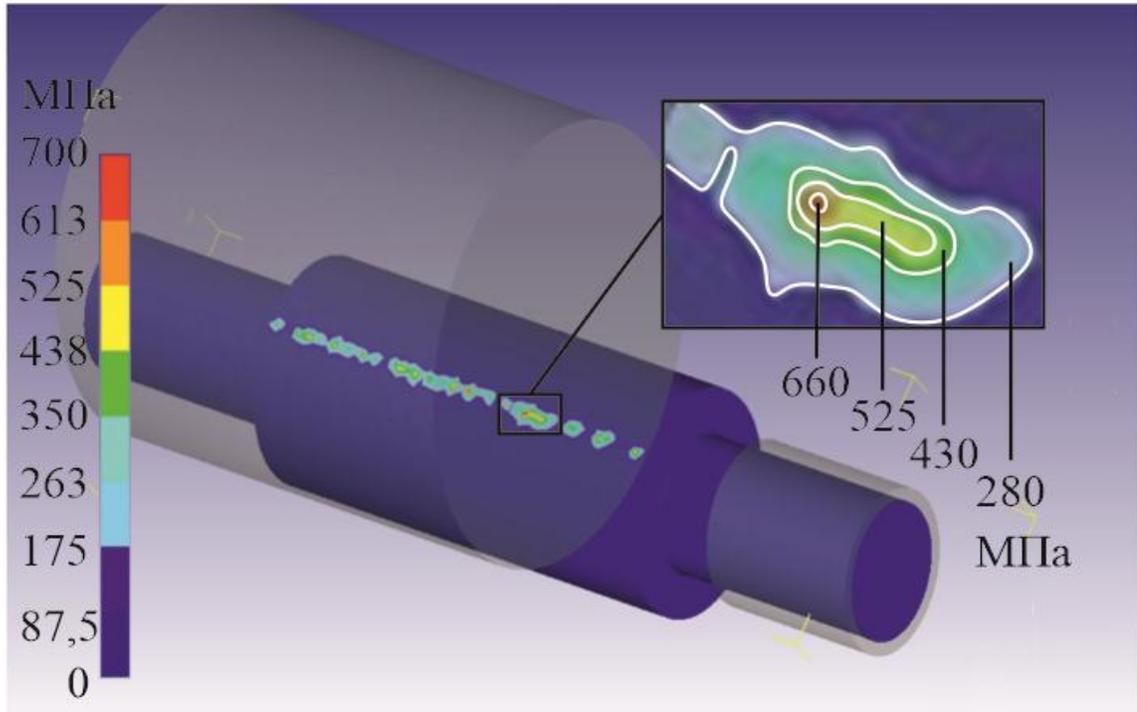


Рисунок 2.17 - Распределение интенсивности напряжений (σ_i) в зоне контакта «опорный валок - рабочий валок», МПа.
Режим №4; $Q=0,21$, $f=0,10$

Анализ результатов моделирования процесса контактного взаимодействия в системе «опорный валок – рабочий валок» с наличием смазочного материала.

В программном комплексе «Deform-3D» реализована конечно-элементная модель для исследуемой системы «опорный валок – рабочий валок» при различных режимах подачи СМ. Результаты моделирования систематизированы и сведены в таблицу 2.8 [169,170,171,172].

На основе проведенных исследований сделаны выводы, что применение СМ в рекомендованных режимах позволяют уменьшить напряжения в зоне контакта (σ_i , МПа) в 1,15...1,18 раза.

Таблица 2.8 - Результаты исследований влияния технологической смазки на изменение напряженного состояния на контакте «**опорный валок – рабочий валок**»

Технологическая смазка отсутствует		Подача смазочного материала				
Максимальные напряжения в зоне контакта (σ_i), МПа	Среднее значение (σ_i), МПа	Режимы подачи технологической смазки	Расход технологической смазки, (л/мин)	Коэффициент трения	Максимальные напряжения в зоне контакта (σ_i), МПа	Среднее значение (σ_i), МПа
600	325	1	0,12	0,17	570	230
		2	0,1	0,15	465	265
		3	0,05	0,13	500	280
		4	0,21	0,10	550	270

Исследование влияния режимов подачи СМ на изменение напряженно–деформированного (структурного) состояния в системе «рабочий валок – полоса».

В работе вводится предположение, что, для рассматриваемой схемы подачи СМ, на поверхность полосы СМ попадает в результате адгезии на контакте валков.

Исследования влияния режимов подачи СМ на изменения напряженно–деформированного (структурного) состояния в системе «рабочий валок – полоса» проводились на основе упругопластической модели очага деформации, предложенной проф. Э.А Гарбером [76,118,173].

Упругопластическая модель напряженного состояния полосы в очаге деформации позволяет для i -ой клетки определить следующие характеристики:

- интенсивность напряжений (нормальных, контактных, средних касательных напряжений), МПа;
- интенсивности деформаций и интенсивность скорости деформаций.

Помимо этого, на основе модели, рассчитываются энергосиловые параметры процесса листовой горячей прокатки:

- удельная работа по каждому из участков (a_i) и суммарная работа, МДж;

- мощность процесса прокатки ($N_{пр}$), МВт;
- мощность ($N_{дв}$), МВт и момент на двигателе главного привода ($M_{дв}$), МН×м;
- усилие прокатки (P), кН;
- среднее контактное давление, ($p_{ср}$) МПа.

В предложенных подходах к расчету энергосиловых параметров листовой горячей прокатки главные отличия вытекают из особенности напряженного состояния полосы, заключающиеся в том, что большая часть протяженности очага деформации при горячей прокатке представляет собой зону пластической деформации заготовки (зону прилипания) [76,118,173].

Особенностью расчета структурных параметров очага деформации при горячей прокатке является протяженность упругих участков. Согласно исследованиям авторов [76,118,173] известно, что в первых клетях чистовых групп доля длины упругих участков от общей длины очага деформации составляет 1-2 %, а в последних клетях увеличивается до 10-21 %. Также отмечается, что в последних клетях чистовых групп возрастает протяженность второго упругого участка, на котором происходит восстановление части толщины полосы. Необходимо отметить, что система подачи СМ установлена в первых клетях непрерывной группы, что приводит к некоторым трудностям при проведении анализа и выявления закономерностей.

В используемой упругопластической модели очага деформации используются следующие допущения:

- на упругих участках очага деформации длиной $x_{1\text{упр}}$ и x_2 действует закон трения скольжения, на котором коэффициент трения (μ), определяется по методике Штерлова;
- на пластическом участке, представляющем собой зону «прилипания», касательные напряжения изменяются линейно от максимального значения $\tau_{x\text{max}} = \tau_S$, до минимального значения $\tau_x \geq -\tau_S$, проходя через значение $\tau_x = 0$ в нейтральном сечении;

- сопротивление деформации полосы на пластическом участке ($\sigma_{ф\text{пл}}$, МПа) определяется по методике Л.В. Андreyока с учетом фактического изменения очага деформации для конкретных параметров процесса: температуры (T , °С), скорости деформации (U , с⁻¹), степени деформации (ϵ , %).

Основываясь на экспериментальных данных, показывающих снижение энергосиловых параметров прокатки (усилие прокатки) при попадании СМ в очаг деформации, в разработанный алгоритм было внесено предположение, учитывающее влияние СМ на напряженно-деформируемого состояния полосы: выдвинута и проверена гипотеза, что при попадании СМ в очаг деформации происходит его структурное изменение, выраженное в увеличении протяженности зоны скольжения ($X_{1\text{упр}}$), уменьшении пластической зоны ($X_{\text{пл}}$) при постоянстве зоны X_2 .

Изменение структурных составляющих очага деформации влечет за собой изменение касательных напряжений в каждой из зон ($\tau_{x(i)}$, МПа), а также оказывает влияние на величину $p_{\text{ср}i}$.

Известный алгоритм расчета упругопластической модели очага деформации был дополнен новым граничным условием:

$$\begin{cases} x_{1\text{упр}} \rightarrow \max \\ x_{\text{пл.опер}} + x_{\text{пл.отст}} > 0 \\ x_{1\text{упр}} > 0 \\ x_2 = \text{const} \end{cases} \quad (2.25)$$

Для решения исходных систем уравнений (согласно подходу Э.А. Гарбера) совместно с дополненным граничным условием (2.25) был использован подход, в котором в качестве исходных данных фиксировали экспериментальные значения параметра «усилие прокатки». Данные фиксировались из цеховых систем учета, точность измерения составляет до 1,5%. Фиксировались данные при прокатке одинаковых марок сталей и их типоразмеров, с применением СМ, а также без СМ. Режимы подачи СМ

определялись согласно рекомендациям, приведенным в таблице 2.1.

Принимая условие постоянства длины очага деформации l_{ci} и зоны x_2 , относительно неизвестных переменных ($x_{1упр}$) ($x_{пл.}$), были решены системы уравнений. Численные решения были реализованы в среде «MS Excel» с помощью макросов и встроенной функции «Поиск решения».

Было проведено более 300 измерений с последующим расчетом структурных параметров очага деформации, результаты которых приставлены в таблице 2.9 [174,175,176]. Результаты расчета энергосиловых параметров представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.9 - Результаты сравнительного расчета структурных параметров очага деформации для клетки №7 НШСП 2000 ПАО «ММК»

Прокатываемая полоса и ее типоразмер	l_d/h_{cp}	Параметры очага деформации			P_{cp}
		$x_{1упр}$	$x_{пл.}$	x_2	
Группа 1. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 69...73$ МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клетки $0,09...0,10*10^6$ мм³/мин					
10 (2,0x1050)	<u>3,410</u> 3,412	<u>0,114</u> 0,121	<u>83,001</u> 82,996	<u>2,657</u> 2,658	<u>220,63</u> 210,12
08Ю (3,3x1620)	<u>3,923</u> 3,924	<u>0,081</u> 0,084	<u>87,591</u> 87,587	<u>2,149</u> 2,150	<u>176,69</u> 169,89
08кп (7x1150)	<u>4,039</u> 4,036	<u>0,069</u> 0,074	<u>98,199</u> 98,193	<u>1,905</u> 1,907	<u>159,79</u> 150,75
Группа 2. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 86...96$ МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клетки $0,12...0,14*10^6$ мм³/мин					
Ст3сп (2,7x1363)	<u>3,501</u> 3,504	<u>0,119</u> 0,131	<u>83,30</u> 83,122	<u>2,966</u> 2,965	<u>255,46</u> 234,36
20 (3x1495)	<u>3,325</u> 3,328	<u>0,132</u> 0,142	<u>80,475</u> 80,466	<u>3,048</u> 3,047	<u>257,65</u> 240,80
S235JR (6x1500)	<u>4,327</u> 4,329	<u>0,066</u> 0,070	<u>93,101</u> 93,096	<u>1,962</u> 1,963	<u>162,87</u> 155,11
Группа 3. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 96...116$ МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клетки $0,05...0,10*10^6$ мм³/мин					
09Г2С (3,0x1000)	<u>3,353</u> 3,350	<u>0,179</u> 0,190	<u>81,588</u> 81,577	<u>4,095</u> 4,095	<u>343,61</u> 323,68
Ст5сп (3,9x1430)	<u>3,969</u> 3,965	<u>0,103</u> 0,109	<u>84,137</u> 84,131	<u>2,842</u> 2,841	<u>235,81</u> 224,58
09Г2Д (6x1208)	<u>4,112</u> 4,112	<u>0,063</u> 0,071	<u>100,195</u> 100,186	<u>1,845</u> 1,843	<u>160,19</u> 145,63

Прокатываемая полоса и ее типоразмер	l_d/h_{cp}	Параметры очага деформации			p_{cp}
		$x_{1упр}$	$x_{пл.}$	x_2	
Группа 4. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 116...125$ МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клети $0,04...0,05 \cdot 10^6$ мм³/мин					
10ХСНД (6,0x1750)	<u>4,166</u> 4,169	<u>0,100</u> 0,105	<u>88,230</u> 88,224	<u>2,880</u> 2,879	<u>236,66</u> 227,55
K55 (7x1390)	<u>3,444</u> 3,440	<u>0,093</u> 0,100	<u>106,212</u> 106,204	<u>2,068</u> 2,069	<u>174,96</u> 163,52
09ГСФ (14x1005)	<u>3,357</u> 3,356	<u>0,091</u> 0,094	<u>123,855</u> 123,851	<u>1,786</u> 1,788	<u>145,58</u> 141,33
Группа 5. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 125...130$ МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клети $0,03...0,06 \cdot 10^6$ мм³/мин					
H220P (2,0x1115)	<u>3,310</u> 3,309	<u>0,102</u> 0,111	<u>85,792</u> 85,784	<u>2,331</u> 2,329	<u>198,83</u> 184,10
HC340LA (3,9x1335)	<u>3,591</u> 3,588	<u>0,149</u> 0,157	<u>90,889</u> 90,881	<u>3,575</u> 3,573	<u>296,54</u> 282,42
13ХФА (11,8x1660)	<u>3,430</u> 3,429	<u>0,089</u> 0,094	<u>118,960</u> 118,954	<u>1,856</u> 1,857	<u>154,12</u> 146,79
Группа 6. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 130$ и более МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клети $0,05...0,09 \cdot 10^6$ мм³/мин					
DX54D (2,8x1628)	<u>3,133</u> 3,135	<u>0,111</u> 0,120	<u>86,710</u> 86,700	<u>2,357</u> 2,359	<u>199,51</u> 186,46
DX53D (3,9x1065)	<u>3,645</u> 3,653	<u>0,078</u> 0,083	<u>98,863</u> 98,857	<u>1,889</u> 1,890	<u>158,36</u> 149,40
DX54D (5x1540)	<u>4,289</u> 4,281	<u>0,058</u> 0,064	<u>98,859</u> 98,853	<u>1,761</u> 1,760	<u>150,20</u> 139,06
Примечание: в числителе прокатка осуществляется без СМ, в знаменателе с применением СМ; l_d/h_{cp} - отношение дуги захвата к средней высоте сечения прокатываемой полосы, мм; $x_{1упр}h_{i-1}, h_i x_{1упр}$ - протяженность первого упругого участка, мм; x_2 - протяженность второго упругого участка, мм; $x_{пл.}x_{пл}$ - протяженность пластического участка, мм; p_{cp} - среднее контактное напряжение, МПа.					

Таблица 2.10 - Результаты сравнительного расчета энергосиловых параметров процесса прокатки на примере №7 НШСП 2000 ПАО «ММК»

Прокатываемая полоса	Экспериментальные данные	Расчетные данные	
	Усилие прокатки Р, МН	Мощность прокатки, $N_{пр}$, МВт	Момент на валу главного привода, $M_{дв}$, МН×м
Группа 1. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 69-73$ МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клети $0,09...0,10 \cdot 10^6$ мм³/мин			
10 (2,0x1050)	<u>19,245</u> 18,329	<u>5,890</u> 5,609	<u>1,343</u> 1,279
08Ю (3,3x1620)	<u>25,087</u> 24,122	<u>9,213</u> 8,858	<u>1,847</u> 1,776
08кп (7x1150)	<u>18,054</u> 17,032	<u>6,893</u> 6,503	<u>1,490</u> 1,406

Прокатываемая полоса	Экспериментальные данные	Расчетные данные	
	Усилие прокатки P, МН	Мощность прокатки, N _{пр} , МВт	Момент на валу главного привода, M _{дв} , МН×м
Группа 2. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 86-96$ МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клети $0,12...0,14 \cdot 10^6$ мм³/мин.			
Ст3сп (2,7x1363)	<u>28,969</u> 26,58	<u>8,489</u> 7,788	<u>2,025</u> 1,857
20 (3x1495)	<u>31,028</u> 29,00	<u>10,093</u> 9,432	<u>2,099</u> 1,962
S235JR (6x1500)	<u>22,755</u> 21,67	<u>8,422</u> 8,021	<u>1,780</u> 1,696
Группа 3. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 96-116$ МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клети $0,05...0,10 \cdot 10^6$ мм³/мин			
09Г2С (3,0x1000)	<u>28,019</u> 26,43	<u>7,199</u> 6,791	<u>1,922</u> 1,813
Ст5сп (3,9x1430)	<u>28,390</u> 27,04	<u>9,531</u> 9,077	<u>2,008</u> 1,912
09Г2Д (6x1208)	<u>19,398</u> 17,63	<u>5,644</u> 5,131	<u>1,633</u> 1,485
Группа 4. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 116-125$ МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клети $0,04...0,05 \cdot 10^6$ мм³/мин			
10ХСНД (6,0x1750)	<u>36,562</u> 35,15	<u>8,101</u> 7,790	<u>2,711</u> 2,607
К55 (7x1390)	<u>25,848</u> 24,16	<u>5,616</u> 5,249	<u>2,308</u> 2,157
09ГСФ (14x1005)	<u>18,131</u> 17,60	<u>4,776</u> 4,636	<u>1,887</u> 1,833
Группа 5. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 125-130$ МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клети $0,03...0,06 \cdot 10^6$ мм³/мин			
H220P (2,0x1115)	<u>19,035</u> 17,63	<u>4,847</u> 4,488	<u>1,373</u> 1,271
HC340LA (3,9x1335)	<u>30,077</u> 28,65	<u>8,806</u> 8,386	<u>2,298</u> 2,189
13ХФА (11,8x1660)	<u>30,454</u> 29,00	<u>8,599</u> 8,190	<u>3,045</u> 2,900
Группа 6. Сопротивления деформации заготовки $\sigma_{0i} = 130$ и более МПа. Расход СМ в непрерывной чистовой клети $0,05...0,09 \cdot 10^6$ мм³/мин			
DX54D (2,8x1628)	<u>28,190</u> 26,35	<u>8,220</u> 7,683	<u>2,055</u> 1,921
DX53D (3,9x1065)	<u>16,684</u> 15,74	<u>6,514</u> 6,146	<u>1,386</u> 1,308
DX54D (5x1540)	<u>22,877</u> 21,18	<u>8,656</u> 8,014	<u>1,901</u> 1,760
Примечание: в числителе прокатка осуществляется без СМ, в знаменателе с применением СМ.			

Анализ результатов исследования (в том числе исходя из данных таблицы 2.10) показывает, что для системы «рабочий валок – полоса» применение СМ вызывает изменение структурных составляющих в очаге деформации. Сравнительный анализ проводился для первых трех клеток чистовой группы стана 2000 г.п. ПАО «ММК» (клетки №№7-9) с применением пакета программ «STATISTICA».

По результатам опытной прокатки более 300 различных стальных горячекатаных полос (по марочному и геометрическим параметрам) экспериментально-аналитическим путём с применением сравнительного статистического анализа (по двухвыборочному t – тесту при 95% значимости) доказано, что в зависимости от режимов подачи СМ, наблюдаются структурные изменения в очаге деформации.

Определено, что наличие СМ на контакте «рабочий валок – полоса» приводит к изменениям, характеризующимся относительным смещением нейтрального сечения на величину (0,48%...7,23%) в направлении зоны пластического опережения ($X_{пл}$), что в свою очередь приводит к изменениям энергосиловых параметров процесса прокатки.

На основе работ Э.А Гарбера были произведены теоретические расчеты технологического параметров процесса: мощность прокатки ($N_{пр}$, МВт), момент на валу главного привода ($M_{дв}$, МН×м). Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показали, что применение СМ приводит к снижению исследуемых технологических параметров в среднем на 4...6% [178].

Выводы по второй главе

1. В специализированном программном комплексе «Deform–3D» реализована конечно-элементная модель процесса листовой горячей прокатки. Для исследуемой системы «рабочий валок – полоса» получены численные значения технологических параметров процесса листовой горячей прокатки: интенсивность напряжений (σ_i , МПа), усилие прокатки (N , т), температура прокатываемой заготовки, а также ее распределение по длине и ширине очага деформации (T , °С), обжатие заготовки (ε , %), скорость прокатки (V , м/с).
2. Достоверность математической модели определялась путем сравнения теоретических и фактических (экспериментальных) данных по следующим критериям: усилие прокатки (N , МН), обжатие заготовки (ε , %), скорость прокатки (V , м/с). Сравнительный анализ проводился с применением пакета программ «STATISTICA». Анализ результатов процесса моделирования более чем 200 различных марок сталей и их типоразмеров установил, что величина ошибки составляет не более 6%, что позволяет признать модель достоверной.
3. Анализ полученных результатов, а также условия постановки и проведения теоретического эксперимента позволили сделать заключение, что для исследования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» в программном комплексе «Deform–3D» невозможно задать условия подачи СМ в валковые узлы «кварто». Необходимо проведение дополнительных теоретических исследований процесса листовой горячей прокатки: взаимодействие в системах «опорный валок – рабочий валок» и «рабочий валок – полоса» с наличием СМ.
4. Для системы «опорный валок - рабочий валок» на основе численного моделирования процесса формирования смазочного слоя на контакте «опорный валок – рабочий валок» предложена и научно обоснована зависимость для расчета толщины и расхода СМ, дополненная коэффициентами, учитывающими

изменение параметров шероховатости опорных ($k_{ш}^{оп}(t) = 0,07 \dots 0,83$) и рабочих ($k_{ш}^{раб}(t) = 0,08 \dots 0,37$) валков.

4.1. Для технологии производства ЛГП разработаны режимы подачи СМ, учитывающие изменение параметров шероховатости рабочих и опорных валков.

4.2. Для системы «опорный валок – рабочий валок» в программном комплексе «Deform-3D» проведено исследование напряженного состояния при различных режимах подачи СМ. Сравнительный анализ проводился с применением пакета программ «STATISTICA»: применение СМ в рекомендованных режимах позволяют уменьшить напряжения в зоне контакта (σ_i , МПа) в 1,15...1,18 раза.

5. Для системы «рабочий валок – полоса» на основе упругопластической модели очага деформации, проведены теоретические исследования влияния режимов СМ на изменения напряженно–деформированного состояния полосы. Показано, что наличие СМ на контакте «рабочий валок – полоса» приводит к изменениям, характеризующимся относительным смещением нейтрального сечения на величину (0,48%...7,23%) в направлении зоны пластического опережения ($X_{пл}$), что в свою очередь приводит к изменениям энергосиловых параметров (усилие прокатки (P , МН), $N_{пр}$ (МВт), $M_{дв}$ (МН×м)) процесса прокатки.

5.1. На основе работ Э.А Гарбера были произведены теоретические расчеты технологических параметров процесса: мощность прокатки ($N_{пр}$, МВт) и момент на валу главного привода ($M_{дв}$, МН×м). Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало, что применение СМ приводит к снижению исследуемых технологических параметров в среднем на 4...6%.

3. ЛАБОРАТОРНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПОДАЧИ ЖИДКИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ОПОРНЫЙ ВАЛОК – РАБОЧИЙ ВАЛОК – ПОЛОСА»

Применение жидких смазочных материалов в технологии листовой горячей прокатки, согласно ранее проведенным исследованиям, направлено на снижение ресурсоёмкости производства ЛГП, выраженное в сокращении энергетических затрат и повышении эксплуатационной стойкости рабочих валков.

Для качественной оценки эффективности применения режимов подачи жидких СМ, а также для последующей рекомендации их к применению в технологии листовой горячей прокатки, предложено использовать показатели эффективности (\mathcal{E}_i).

$$\mathcal{E}_i = \frac{\Pi_i^0}{\Pi_i^1}, \quad (3.1)$$

где Π_i –показатели оценки эффективности применения режимов СМ: 0 - без применения СМ; 1 – с применением СМ.

Показатели эффективности (\mathcal{E}_i) применения режимов подачи жидких смазочных материалов в технологии листовой горячей прокатки.

Для исследуемых режимов подачи жидких СМ (глава 2, п.2.3.) с целью последующей оценки их эффективности, предлагаются использовать следующие относительные показатели (\mathcal{E}_i), которые условно можно разделить на две группы.

Первая группа. Показатели эффективности (\mathcal{E}_i), полученные на основе проведения теоретических расчетов и лабораторных экспериментов:

– момент трения ($M_{тр(i,j)}^{эф(оп-раб)}$, кН×м) на контакте «опорный валок – рабочий валок» и момент прокатки ($M_{пр(i,j)}^{эф}$ кН×м) (3.2.а);

– износ образцов, моделирующих взаимодействие рабочих ($U_{раб(i,j)}^{эф.лаб}$, гр.) и опорных ($U_{оп(i,j)}^{эф.лаб}$, гр.) валков на лабораторном стенде «Машина трения» (3.2.б).

Вторая группа. Показатели эффективности (\mathcal{E}_i), полученные по результатам опытно-промышленных испытаний:

– значение силы тока ($I_{(i,j)}^{эф.пром}$, А) электродвигателей привода рабочих валков чистовой группы клетей листовых станов горячей прокатки (3.2.г);

– расчетно-аналитическое значение показателей изнашивания ($J_{раб(i,j)}^{эф.пром}$) рабочих валков (3.2.в).

Эффективность воздействия на процессы смазывания для оценки функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» рассчитывается при соблюдении следующих условий: $\mathcal{E}_i > 1$ и $\mathcal{E}_i \rightarrow \max$.

$$M_{тр(i,j)}^{эф(оп-раб)} = \frac{M_{тр(i,j)}^{0(оп-раб)}}{M_{тр(i,j)}^1(оп-раб)}, \quad M_{пр(i,j)}^{эф} = \frac{M_{пр(i,j)}^0}{M_{пр(i,j)}^1}, \quad 3.2 (а)$$

$$U_{раб(i)}^{эф.лаб} = U \frac{J_{раб(i,j)}^0}{U_{раб(i,j)}^1}, \quad U_{оп(i)}^{эф.лаб} = \frac{U_{оп(i,j)}^0}{U_{оп(i,j)}^1}, \quad 3.2 (б)$$

$$J_{раб(i,j)}^{эф.пром} = \frac{J_{раб(i,j)}^0}{J_{раб(i,j)}^1}, \quad 3.2 (в)$$

$$I_{(i,j)}^{эф.пром} = \frac{I_{раб(i,j)}^0}{I_{раб(i,j)}^1}. \quad 3.2 (г)$$

Определение показателей эффективности в зависимости от режимов подачи жидких СМ, а также их влияние на изменение контактного взаимодействия в системе «опорный валок – рабочий валок», необходимо исследовать в рамках постановки и проведения лабораторных экспериментов. Эффективным направлением считается использование лабораторно-статистических методов обработки данных, полученных на физической (лабораторной) модели.

Метод физического (лабораторного) моделирования позволяет решить конкретные задачи, в том числе в области трения и изнашивания, а также позволяет с помощью теории подобия трансформировать полученные результаты на реально действующий промышленный объект.

3.1 Лабораторное исследование влияния режимов подачи смазочных материалов.

Для проведения исследований влияния режимов подачи СМ на изменение контактного взаимодействия в системе «опорный валок – рабочий валок», использовали испытательный стенд – «Машина трения СМЦ-2» (далее по тексту, лабораторная установка). Кинематическая схема лабораторной установки приведена на рисунке 3.1, технические характеристики приведены в таблице 3.1.

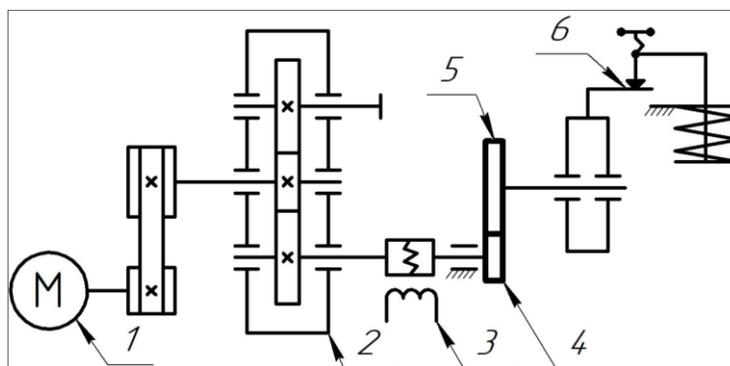


Рисунок 3.1 - Кинематическая схема лабораторной установки

1– электродвигатель; редуктор с передаточным отношением $U=1$; 3- бесконтактный индуктивный датчик измерения «момента трения»; 4- приводной нижний ролик, моделирующий рабочий валок; 5 – верхний ролик, моделирующий опорный валок; 6– система нагружения

Таблица 3.1 - Технические характеристики лабораторной установки

Частота вращения приводного нижнего ролика, c^{-1}	0,1...25,0
Диапазон измерения момента трения, Н*м	1,5...15,0
Нагрузка на образцы, кН	0,2...2,0
Мощность, потребляемая, макс, кВт	2,2

Для проведения экспериментальных исследований лабораторная установка прошла техническую модернизацию, заключающуюся в отказе от использования потенциометра и переход на полупроводниковые схемы управления сигналами, а также в использовании контроллеров для управления и слежения за несколькими исследуемыми параметрами одновременно. В силовой части был установлен частотный преобразователь электродвигателя. С целью определения изменения загрузки главного привода в процессе проведения эксперимента на каждую из трех фаз электродвигателя была установлена двухканальная система регистрации энергосиловых параметров (напряжения и тока) [177]. Общий вид лабораторной установки, цифрового блока управления и устройства вывода информации представлены рисунках 3.2 и 3.3.



Рисунок 3.2 - Общий вид лабораторной установки



Рисунок 3.3 - Блок контроллеров и устройства вывода информации

Управление всем комплексом исследуемых параметров осуществляется посредством специально разработанной программы для ЭВМ через интерфейс, общий вид которого представлен на рисунке 3.4. Пример отображения параметров в ходе эксперимента представлен на рисунке 3.5.

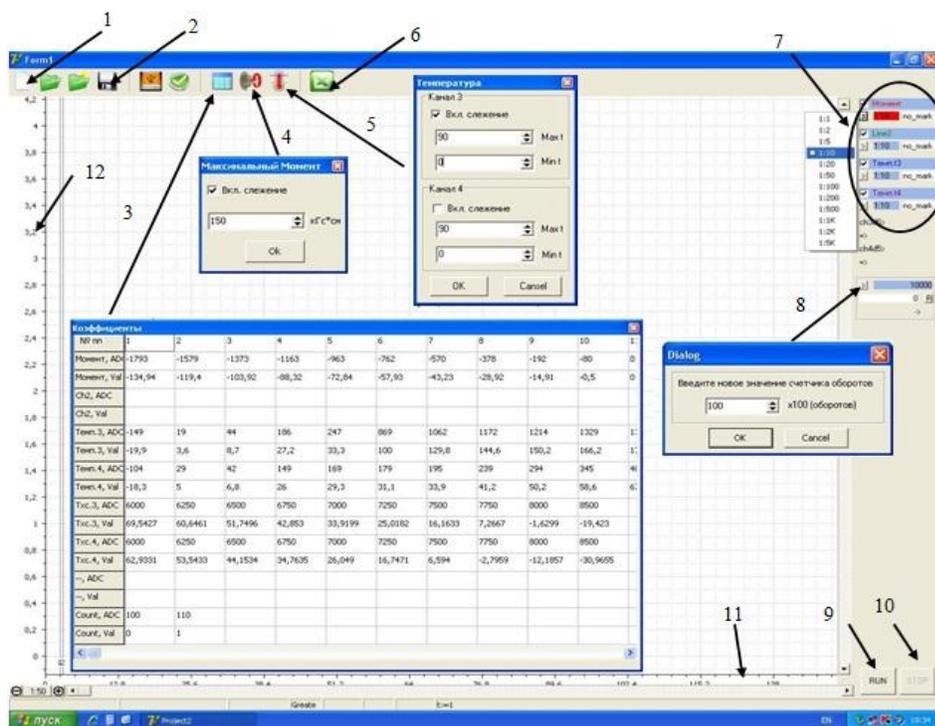


Рисунок 3.4 - Визуализация интерфейса программного комплекса лабораторной установки

Позиции на рисунке 3.4:

- 1) кнопка создания нового эксперимента;
- 2) кнопка сохранения результатов проведенного эксперимента;
- 3) кнопка вывода тарифовочных коэффициентов;
- 4) предельное значение момента трения ($M_{тр}$, кН*м), при превышении которого машина отключается и автоматически останавливается дальнейшее проведение эксперимента;
- 5) предельное значение температуры, при превышении которой машина отключается и автоматически останавливается дальнейшее проведение эксперимента;
- 6) кнопка сохранения результатов в среде «MS Excel» с возможностью выбора объема сохраняемых данных;

- 7) кнопки выбора масштаба отображения регистрируемых параметров;
- 8) предельное значение числа оборотов приводного вала универсального трибометра, при превышении которого машина отключается и автоматически останавливается дальнейшее проведение эксперимента;
- 9) кнопка запуска эксперимента;
- 10) кнопка останова эксперимента;
- 11) шкала времени от начала проведения эксперимента, сек.;
- 12) шкала измеряемого (отслеживаемого) параметра.

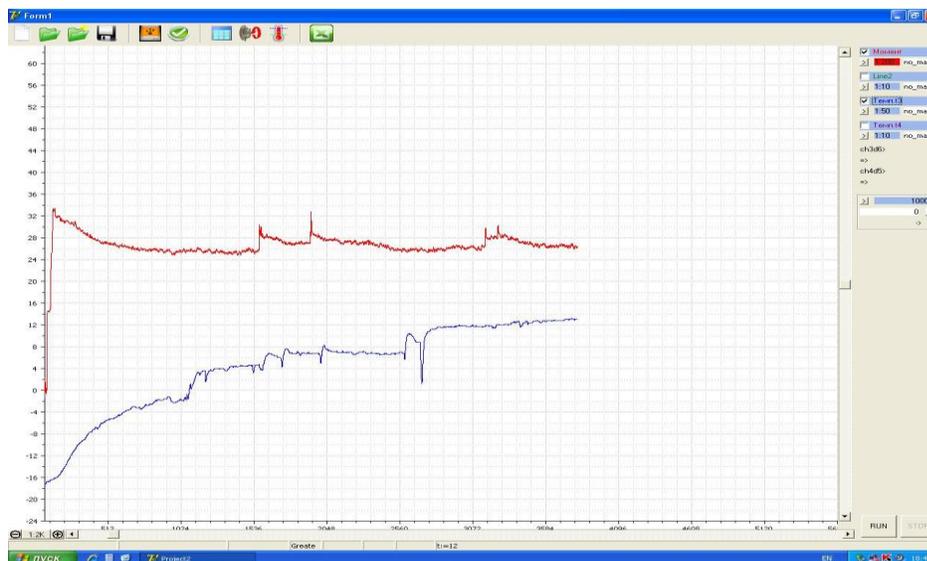


Рисунок 3.5 - Пример отображения регистрируемых параметров в процессе проведения эксперимента

Определение показателей эффективности при проведении лабораторных исследований

исследования $M_{mp(i,j)}^{эф(оп-раб)}$, $U_{раб(i,j)}^{эф.лаб}$, $U_{оп(i,j)}^{эф.лаб}$.

Предложенные показатели эффективности применения жидких СМ ($M_{mp(i,j)}^{эф(оп-раб)}$, $U_{раб(i,j)}^{эф.лаб}$, $U_{оп(i,j)}^{эф.лаб}$) были определены на лабораторной установке. Кинематическая схема привода верхнего рабочего валка широкополосного стана горячей прокатки соответствует кинематической схеме, представленной на рисунке 3.1, и используемой на лабораторной установке.

Таким образом, подбирая соответствующие диаметры верхнего и нижнего роликов, материалы роликов, и усилие нагружения, на лабораторной установке можно воспроизводить и исследовать контактное взаимодействие в системе

«опорный валок – рабочий валок», на примере верхней валковой пары клетей «кварто».

В процессе постановки и проведения исследования на лабораторной установке «Машина трения» были определены следующие показатели эффективности (Θ) применения жидких СМ для технологии листовой горячей прокатки:

– момент трения на контакте «опорный валок – рабочий валок» ($M_{тр(i,j)}^{эф(оп-раб)}$, кН×м) для клетей «кварто» (3.2.а);

– износ образцов (гр.), моделирующих взаимодействие рабочих ($U_{раб(i,j)}^{эф.лаб}$) и опорных ($U_{оп(i,j)}^{эф.лаб}$) валков клетей «кварто» (3.2.б).

Объектом моделирования на лабораторной установке является верхняя валковая пара клетей «кварто» №№7-9 стана 2000 г.п. ПАО «ММК», на которых установлена система подачи СМ.

Подбор масштабных коэффициентов.

На контактное взаимодействие в системе «опорный валок – рабочий валок» оказывают воздействие следующие параметры:

- погонная нагрузка, н/м;
- нормальные контактные и касательные напряжения, МПа;
- коэффициент трения;
- момент трения, кН×м;
- подача СМ, мм³/мин.

Известно [179], что коэффициент трения через момент трения можно описать следующей зависимостью:

$$f = \frac{2M_{тр}}{d_{раб} \times P}, \quad (3.3)$$

где: $M_{тр}$ - момент трения, на контакте «опорный валок – рабочий валок», Н×м;

$d_{\text{раб}}$ – диаметр нижнего ролика, моделирующий верхний рабочий валок, мм;

P – нагрузка в трибосопряжении для системы «опорный валок – рабочий валок», Н.

С целью обеспечения подобия при воспроизведении режимов контактного взаимодействия исследуемой системы «опорный валок – рабочий валок» клетей «кварто» и роликов, моделирующих верхнюю валковую пару на лабораторной установке, использовали основные положения задачи Герца и вторую теорему теории подобия. В результате было получено выражение:

$$f = \frac{4M_{\text{тр}}}{\pi d_2 P_{\text{max}}^0 b l'} \quad (3.4)$$

где P_{max}^0 – максимальное контактное напряжение, МПа;

b – полуширина площадки контакта, мм;

l – длина бочки опорного валка (верхнего ролика), мм.

При моделировании приняты следующие допущения:

- смещение оси рабочего валка относительно опорного отсутствует;
- коэффициент трения на контакте «опорный валок – рабочий валок» и контакте лабораторной установке «Машина трения» одинаков.

Моделируемое контактное взаимодействие в лабораторной установке и контактное взаимодействие на контакте «опорный валок – рабочий валок» будут считаться подобными в том случае, если масштабные коэффициенты математических зависимостей будут равны 1.

Комбинация масштабных коэффициентов будет представлена в виде:

$$k_{f_1} f_1 = \frac{4k_{\text{мтр}} M_{\text{тр}}^1}{\pi k_{d_2} d_2^1 k_{P_{\text{max}}}^0 P_{\text{max}}^{01} k_b b^1 k_l l^1}; \quad (3.5)$$

где 1 – индекс, указывающий на характеристики объекта моделирования.

Характеристики экспериментальной установки через комплекс масштабных коэффициентов будут выглядеть следующим образом:

$$f_2 = k_f f_1; M_{\text{тр}}^2 = k_{\text{мтр}} M_{\text{тр}}^1; d_2^2 = k_{d_2} d_2^1; P_{\text{max}}^{02} = k_{P_{\text{max}}}^0 P_{\text{max}}^{01}; b^2 = k_b b^1; l^2 = k_l l^1.$$

Разделив выражение 3.5 почленно получим:

$$f_1 = \frac{4M_{\text{тр}}^1}{\pi d_2^1 P_{\text{max}}^{01} b^1 l^1} \quad (3.6)$$

или:

$$\frac{k_{\text{Мтр}}}{k_{f_1} k_{d_2} k_{P_{\text{max}}^0} k_b k_l} = 1. \quad (3.7)$$

При использовании индикатора подобия становится возможным определение масштабных коэффициентов, входящих в выражение 3.7, и сравнение данных, полученных на лабораторной установке и в результате опытно-промышленных исследований.

Выражения для определения масштабных коэффициентов:

$$k_{d_2} = \frac{d_2^2}{d_2^1} = 0,0407; \quad k_{P_{\text{max}}^0} = \frac{P_{\text{max}}^{02}}{P_{\text{max}}^{01}} = 0,367; \quad k_b = \frac{b^2}{b^1} = 0,0149;$$

$$k_l = \frac{l^2}{l^1} = 0,00549, \quad k_{\text{Мтр}} = \frac{M_{\text{тр}}^2}{M_{\text{тр}}^1} = 2,542 \cdot 10^{-6},$$

где $M_{\text{тр}}^1$ - определялся по экспериментальным данным на лабораторной установке «Машина трения».

$$\text{Коэффициент подобия: } k_f = \frac{k_{\text{Мтр}}}{k_{d_2} k_{P_{\text{max}}^0} k_b k_l} = 2,064.$$

По полученному коэффициенту подобия (k_f) для проверки адекватности предлагаемых решений были проведены предварительные однофакторные эксперименты.

Постановка и проведение однофакторных экспериментов.

В качестве объекта моделирования принята клеть №7 листового стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК». На основе соответствующих расчетов определены условия проведения лабораторного эксперимента.

Постоянные факторы:

- диаметр верхних роликов в среднем 65 мм;
- диаметр нижних роликов в среднем 35 мм;

- ширина верхнего ролика 10 мм;
- ширина нижнего ролика 12 мм;
- вес роликов перед экспериментами: нижний – 68 гр., верхний – 249 гр.;
- верхний ролик холостой;
- материал роликов: верхний ролик – сталь 90ХФ, нижний ролик быстрорежущая сталь 200ХВФМ (все ролики изготовлены в литейной лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»);
- Смазочный материал – РОСОЙТ-МГП.

Варьируемые факторы:

- число оборотов нижнего ролика $\omega = 500; 1000$ об/мин;
- объемы подаваемого смазочного материала $Q = 0,01; 0,5$ мм³/мин;
- внешняя нагрузка $P = 300; 900$ Н.

Аналогичные расчеты были произведены для клеток №№8,9 листового стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК». Для каждого опыта использовалась новая пара роликов.

Методика проведения предварительных экспериментов

При реализации эксперимента использовали параметры.

Варьируемые параметры эксперимента:

- X_1 – внешняя приложенная к верхнему ролику нагрузка, P (290; 850 Н);
- X_2 – количество оборотов нижнего ролика, ω (500; 1000 об/мин);
- X_3 – расход смазочного материала, Q (0,1; 0,5 мм³/мин).

Контролируемые параметры эксперимента:

- Y_1 – момент трения ($M_{тр}, Н \times м$);
- Y_2 – износ верхнего и нижнего ролика ($U_{верх}, U_{нижн}, гр.$);
- Y_3 – температура верхнего и нижнего ролика ($T, ^\circ C$).

СМ в зону контакта подавался порционно, строго в требуемом объеме, согласно условиям эксперимента.

Усилие прижатия роликов (P , Н) фиксировалось при помощи нажимного устройства и поддерживалось на постоянном уровне на всех этапах проведения эксперимента.

Время проведения эксперимента определялось по числу оборотов нижнего ролика.

Температура роликов (T , $^{\circ}\text{C}$) контролировалась при помощи оттарированной термопары, которой оснащена лабораторная установка.

Момент трения ($M_{\text{тр}}$, Н \times м) измерялся бесконтактным индуктивным датчиком. Фиксация полученных данных осуществлялась с помощью электронно-вычислительного блока, интегрированного с ЭВМ. Количество измерений, регистрируемых цифровым блоком составляло 4-м измерениям в секунду. Точность измерения момента силы трения равна 0,015 Н \times м ($\pm 1,5\%$).

Износ роликов ($U_{\text{верх}}$, $U_{\text{нижн}}$, гр.) определялся на аналитических весах с точностью до 0,001 гр.

При моделировании контактного взаимодействия в системе «опорный валок – рабочий валок» для каждой из клеток (№№7,8,9) было реализовано восемь однофакторных экспериментов. Для проведения сравнительного анализа был проведен дополнительный эксперимент (№0 см. таблицу 3.2) при следующих условиях: $P=850$ Н; $\omega = 1000$ об/мин, $Q = 0$ мм³/мин.

В таблице 3.3 приведены результаты моделирования для 7-ой клетки листового стана 2000 г.п. ПАО «ММК». Фотографии экспериментальных образцов после проведения экспериментов представлены на рисунке 3.6 [180,181].

Таблица 3.2 - Результаты предварительных экспериментов на лабораторной установке

Номер опыта	Варьируемые параметры эксперимента			Изменяемые параметры эксперимента				
	Нагрузка, Р, Н	Кол-во оборотов, ω об/мин.	Расход СМ, Q мм ³ /мин	Момент трения, М _{тр} , Н×м	Износ, гр.		Температура, °С	
					U _{верх}	U _{нижн}	T _{верх}	T _{нижн}
0	850	1000	0	29,3	1,199	0,906	65	56,7
1	290	500	0,1	22,2	0,895	0,77	48,65	42,8
2	850	500	0,1	27,9	0,827	0,79	43,25	38,1
3	290	1000	0,1	25,0	0,898	0,803	63	54,7
4	850	1000	0,1	26,7	0,736	0,904	51,45	44,9
5	290	500	0,5	23,4	0,723	0,812	43,9	40,6
6	850	500	0,5	26,5	0,747	0,756	46,1	39,9
7	290	1000	0,5	24,4	0,895	0,881	69,45	61,65
8	850	1000	0,5	28,3	0,953	0,795	60	47,65

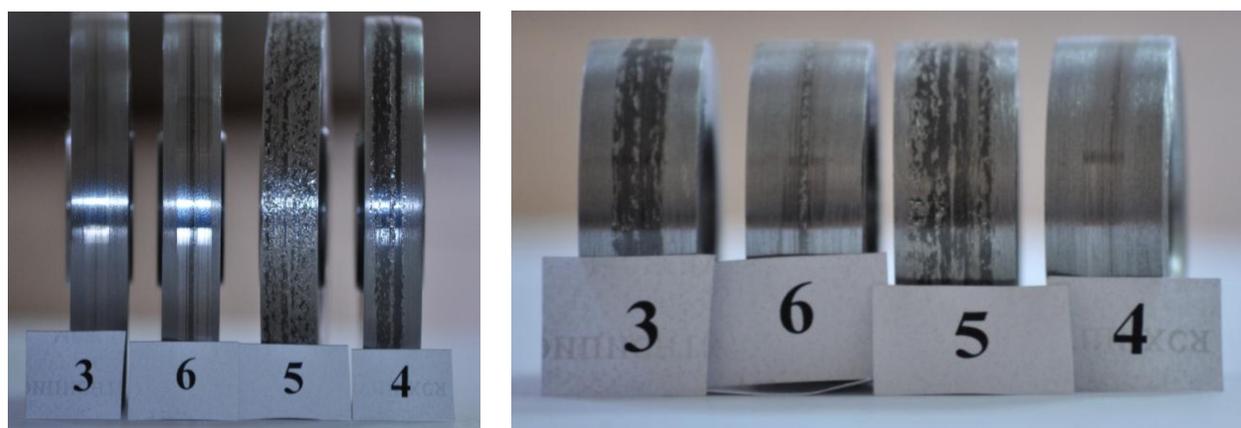


Рисунок 3.6 - Экспериментальные образцы после проведения эксперимента

Верификация экспериментальных данных

Верификация полученных данных проводилась путем сравнения результатов лабораторного эксперимента с данными действующего производства, с учетом рассчитанного коэффициента подобия. Результаты приведены в таблице 3.3. Полученные расхождения в 12...21% можно признать допустимыми, а разработанные подходы для проведения экспериментов на лабораторной установке «Машина трения» применимыми.

Таблица 3.3 - Результаты сравнительного однофакторного эксперимента

Клеть	Марка стали, типоразмер	Группа стали (σ_{0i}), МПа	Сравнительные параметры процесса листовой прокатки,		
			Момент трения, Н*М		Расхождение, %
			*Лаборатор.	**Эксперим.	
7	SAE1006 2x1250	1	26,6	27,5	3,27
7	Ст2пс 3x1185	2	23,2	23,7	2,11
7	St-37-2 2x1000	2	24,7	23,1	-6,93
7	10Г2ФБЮ 8x1250	6	26,6	25,1	-5,98
7	20ЮА 6,0x1280	2	24,3	21,7	-11,98
7	SAE1015(М) 2,5x1510	1	23,5	21,1	-11,37
8	08Ю 2,6x1710	1	24,3	21,1	-15,17
8	SAE1008 2x1200	2	23,7	21,1	-12,32
8	DX51D 2,0x1280	2	24,8	21,1	-17,54
8	10ХСНД 8x1500	4	24	23,6	-1,69
8	B-API 5L 3,9x1297	2	22,7	21,9	-3,65
8	SAE1006 2x1250	1	21,8	23,3	6,44
8	Ст2пс 3x1185	2	23,9	21,1	-13,27
8	St-37-2 2x1000	2	23,9	21,1	-13,27
8	10Г2ФБЮ 8x1250	6	26,6	21,1	-26,07
9	20ЮА 6,0x1280	2	23,1	21	-10,00
9	SAE1015(М) 2,5x1510	1	22,9	21,7	-5,53
9	08Ю 2,6x1710	1	21,8	25,6	14,84
9	SAE1008 2x1200	2	22	21,1	-4,27
9	20 6x1040	2	22,8	23,6	3,39
9	DX51D 2,0x1280	2	22,2	24	7,50
9	10ХСНД 8x1500	4	24,4	25,9	5,79
9	B-API 5L 3,9x1297	2	22,9	24,5	6,53

Примечание:
*данные результатов лабораторных экспериментов с учетом определенного коэффициента подобия;
**данные рассчитанные по результатам промышленного эксперимента согласно работам [161] согласно методике [56]

Выводы по результатам исследования

1. На основе проведенной предварительной серии лабораторных экспериментов, определены диапазоны влияния факторов: внешняя нагрузка P (Н), скорость вращения нижнего ролика V (об/мин), расход СМ Q ($\text{мм}^3/\text{мин}$) на исследуемые технологические параметры: момент трения $M_{\text{тр}}$ (Н \times м), величину износа $U_{\text{верх}}$, $U_{\text{нижн}}$ (гр.) и температуру верхнего и нижнего ролика (моделирующих рабочий и опорный валки) T (град.).
2. Результаты лабораторных экспериментов показывают, что наличие СМ при контактном взаимодействии позволяет уменьшить износ роликов (гр) и момент трения (Н \times м). Полученные результаты сравнивались с данными эксперимента №0. Для верхних роликов (моделирующих опорные валки) зафиксировано снижение износа в 1,1...1,32 раз, для нижних роликов (моделирующих рабочие валки) в 1,1..1,42 раз, снижение момента трения составило 1,2...2,4 раза.
3. Определены наиболее эффективные режимы контактного взаимодействия для условия применения жидких СМ.
 - 3.1. Режим №1, который реализован при наименьшей нагрузке ($P=290\text{Н}$) и минимальном количестве СМ ($Q=0,1 \text{ мм}^3/\text{мин}$). Для режима №1 износ контактирующих тел снизился: в 6,2 раза для верхнего и в 5,79 раз для нижнего роликов. Данный эффект можно объяснить известными подходами, описывающими эффект смазывания двух контактирующих поверхностей.
 - 3.2. Режим № 6, для которого характерна высокая нагрузка ($P=850\text{Н}$) при расходе СМ ($Q=0,1 \text{ мм}^3/\text{мин}$), характеризуется снижением износа в 4,6 раза для верхнего и 5,01 раз для нижнего роликов. Данный эффект, на наш взгляд, достигается за счет образования эластогидродинамического режима трения, реализуемого на контакте двух смазываемых криволинейных поверхностей. Аналогичный эффект наблюдается для режима № 4, при котором отмечается снижение износа в 3,8 раза для верхнего и 3,9 раз для нижнего роликов, при нагрузке ($P=850\text{Н}$) и расходе СМ ($Q=0,1 \text{ мм}^3/\text{мин}$).

Результаты предварительных экспериментов не в полной мере отражают процессы, протекающие при контактном взаимодействии в системе «опорный валок – рабочий валок» при подаче СМ, и позволяют только выявить направление дальнейших исследований. Учитывая многообразие и сложность процессов, для более глубокого исследования влияния различных факторов необходимо построить математическую модель высокого (второго) порядка с привлечением теории планирования эксперимента.

Постановка и реализация многофакторного эксперимента

При проведении эксперимента с привлечением теории планирования эксперимента решаются следующие задачи.

1. Построение адекватной математической модели, описывающей взаимосвязь исследуемых факторов и их влияние на выбранные качественные и количественные показатели.
2. Определение наиболее значимых технологических факторов диапазона и их влияния на качественные показатели исследуемого процесса.

Практическое решение поставленной задачи позволит оценить количественное влияние внешних технологических параметров на исследуемый процесс и оптимизировать их сочетание с целью повышения эффективности режима контактного взаимодействия валков для условия применения жидких СМ. Процесс оптимизации предполагается произвести путем поиска оптимума функционального критерия при варьировании технологических режимов обработки. Оптимизация включает следующие основные этапы:

- выбор параметра оптимизации;
- определение факторов технологического процесса и границ их варьирования;
- построение плана эксперимента и матрицы планирования;
- осуществление экспериментов согласно плану;
- проведение статистического анализа;
- построение уравнения регрессии;

- оценка адекватности полученной математической модели результатам реальных экспериментов;
- проведение исследований по поиску оптимального значения, при которых исследуемые параметры стремятся преобразовать искомую функцию к условиям минимума или максимума.

Методика постановки и проведения эксперимента.

Варьируемые факторы:

- 1) усилие – Р, Н (фактор X_1);
- 2) угловая скорость вращения нижнего ролика - ω , об/мин (фактор X_2);
- 3) количество СМ - Q, мм³/мин, (фактор X_3).

Постоянные факторы:

- 1) геометрические размеры и материал верхнего ролика;
- 2) геометрические размеры и материал нижнего ролика;
- 3) свойства подаваемого СМ (температура, вязкость, плотность и т.д.);
- 4) температура окружающей среды.

Контролируемые (измеряемые) параметры:

- 1) Момент трения - $y(M_{тр})$, кН*м;
- 2) Величина износа роликов:
 - $U_{верх}$, для верхнего ролика, гр.;
 - $U_{нижн}$, для нижнего ролика, гр.;
- 3) Температура роликов:
 - $T_{верх}$, для верхнего ролика, °С;
 - $T_{нижн}$, для нижнего ролика, °С.

На основе результатов предварительных экспериментальных были определены уровни и интервалы варьирования факторов, приведенных в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Факторы и уровни их варьирования в эксперименте

Факторы		Внешняя, приложенная к верхнему ролику нагрузка, Н	Количество оборотов нижнего ролика, об/мин	Расход смазочного материала, мм ³ /мин
Кодированное значение факторов		X ₁	X ₂	X ₃
Уровень варьирования	Верхнее значение (+1)	850	1000	0,55
	Нижнее значение (-1)	290	500	0,1

Был выбран полнофакторный эксперимент вида ПФЭ 2³ с ортогональным, центральным композиционным планом (ОЦКП) (опыт №№ 1-8, см. таблицу 3.5). На первом этапе было реализовано восемь опытов (№№ 1-8). После обработки первичной информации было принято решение провести дополнительно опыты (№№ 9-15), для которых были определены звездные точки (а). Общая матрица планирования эксперимента представлена в таблице 3.5. Для оценки воспроизводимости эксперимента каждый опыт дублировался 3 раза. Результат реализации эксперимента приведен в таблице 3.6.

Таблица 3.5 - Матрица планирования экспериментов для ПФЭ 2³ ОЦКП

№ п/п	Размерные параметры			Безразмерные										
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁₂	x ₁₃	x ₂₃	x ₁₂₃	x ₁ ² -a	x ₂ ² -a	x ₃ ² -a
1	290	500	0,1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27
2	850	500	0,1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27
3	290	1000	0,1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27
4	850	1000	0,1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27
5	290	500	0,55	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27
6	850	500	0,55	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27
7	290	1000	0,55	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27
8	850	1000	0,55	1	1	1	1	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27
9	230	750	0,32	1	-1,22	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73
10	910	750	0,32	1	1,22	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73
11	570	446	0,32	1	0	-1,22	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73
12	570	1054	0,32	1	0	1,22	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73
13	570	750	0,05	1	0	0	-1,22	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75
14	570	750	0,60	1	0	0	1,22	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75
15	570	750	0,32	1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73

Таблица 3.6 - Результаты отклика эксперимента ПФЭ 2³ ОЦКП

№ п/п	Отклик				
	Y1	Y2		Y3	
	Момент трения Мтр, кН*м	Величина износа, гр		Температура, С°	
Верхний ролик		Нижний ролик	Верхний ролик	Нижний ролик	
1	10,702	0,103	0,582	43,1	40,5
2	14,143	0,915	0,180	44,4	37,6
3	16,306	0,179	0,698	63,4	56,6
4	19,997	0,148	0,129	56,8	46,6
5	12,589	0,717	0,087	36,2	33,4
6	16,977	0,145	0,164	38,6	35,6
7	17,052	0,591	0,284	68,5	63,8
8	18,506	0,461	0,093	61,6	49,2
9	8,375	0,902	0,142	39,3	37,3
10	12,144	0,701	0,097	40,4	34,7
11	14,311	0,164	0,159	45,3	49
12	16,759	1,113	0,091	52,4	39,1
13	9,988	0,598	0,867	31,1	30,6
14	15,041	0,102	0,101	33,6	31,9
15	15,694	0,593	0,108	51,7	53,7

Определение коэффициентов уравнений регрессии производился в кодированном виде. Оценка статистической значимости входящих в уравнения коэффициентов b_{0i} , b_i , b_{ii} b_{ii}^2 проведена по критерию Стьюдента при 95% уровне значимости.

Проверка адекватности полученных моделей была проведена по критерию Фишера и среднеквадратичному отклонению. По результатам проверки модели признаны адекватными.

После перевода из кодированных значений к натуральным величинам были получены следующие выражения:

Момент трения (моделирующий взаимодействие в системе «опорный валок-рабочий валок»):

$$M_{mp}^{(он-раб)} = 25,420 + 1,17X_1 - 1,57X_2 - 1,180X_3 - 0,1X_1^2 + 1,04X_2^2 - 9,563X_3^2 \quad (3.8)$$

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

Износ верхнего ролика (моделирующий износ опорного вала):

$$J_{\text{он}}^1 = 1,2471 - 0,12X_1 - 0,14X_2 - 0,19X_3 + 1,12X_1X_2 + 5,3X_1X_3 + 5,62X_2X_3 - 2,1X_1X_2X_3 - 2,1X_1^2 - 2,88X_2^2 - 1,19X_3^2; \quad (3.9)$$

$(R^2 = 0,85; F_{0,95;7}^{\text{расч}} = 185,6 \geq F^{\text{табл}} = 19,16)$

Износ нижнего ролика (моделирующий износ рабочего вала):

$$J_{\text{раб}}^1 = 5,353 + 1,20X_1 - 1,45X_2 - 1,3X_3 + 3,8X_1X_2 + 3,17X_1X_3 + 2,21X_2X_3 - 2,5X_1X_2X_3 - 1,01X_1^2 + 2,74X_2^2 - 3,35X_3^2; \quad (3.10)$$

$(R^2 = 0,85; F_{0,95;7}^{\text{расч}} = 192,3 \geq F^{\text{табл}} = 19,3)$

Температура верхнего ролика (моделирующий опорный валок):

$$T_{\text{он}}^1 = 11,57 - 2,39X_1 - 1,84X_2 - 7,41X_3 - 3,3X_1X_2 + 3,6X_2X_3 + 4,4X_1^2 + 11,1X_2^2 - 29,76X_3^2; \quad (3.11)$$

$(R^2 = 0,85; F_{0,95;7}^{\text{расч}} = 182,5 \geq F^{\text{табл}} = 22,4)$

Температура нижнего ролика (моделирующий рабочий валок):

$$T_{\text{раб}}^1 = 3,154 + 4,48X_1 - 1,02X_2 + 27,74X_3 - 3,8X_1X_2 + 2,14X_2X_3 - 3,6X_1^2 + 12,6X_2^2 - 40,4X_3^2; (R^2 = 0,85; F_{0,95;7}^{\text{расч}} = 240,1 \geq F^{\text{табл}} = 26,9)$$

(3.12)

По полученным уравнениям были построены графики, представленные на рисунках 3.7, 3.8 (а-е) [182].

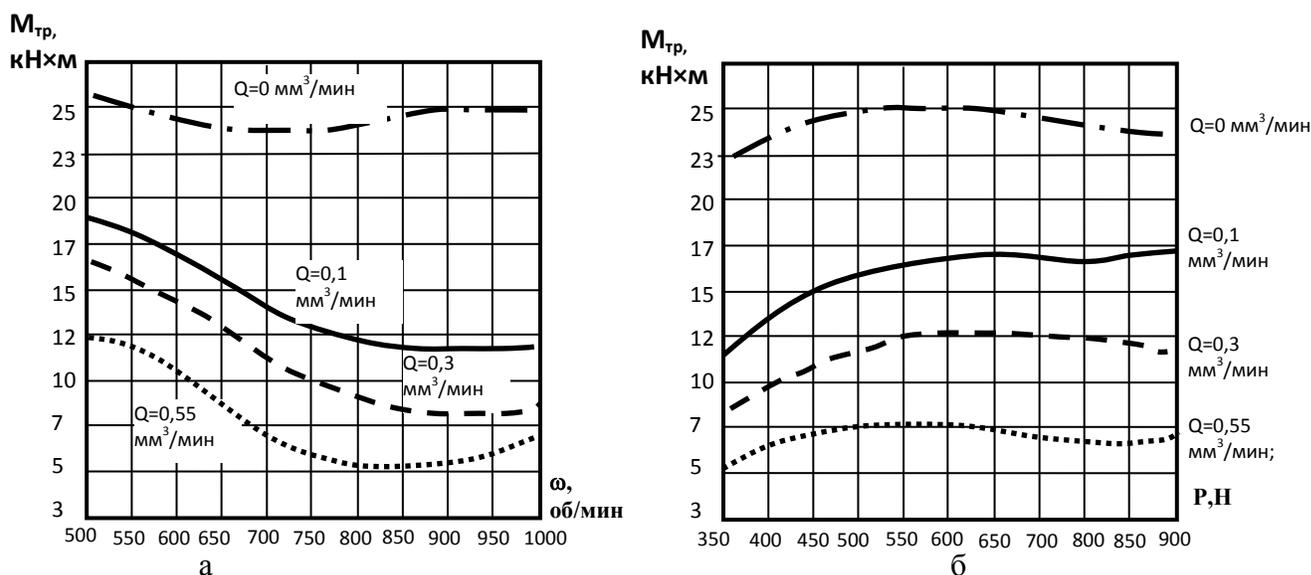
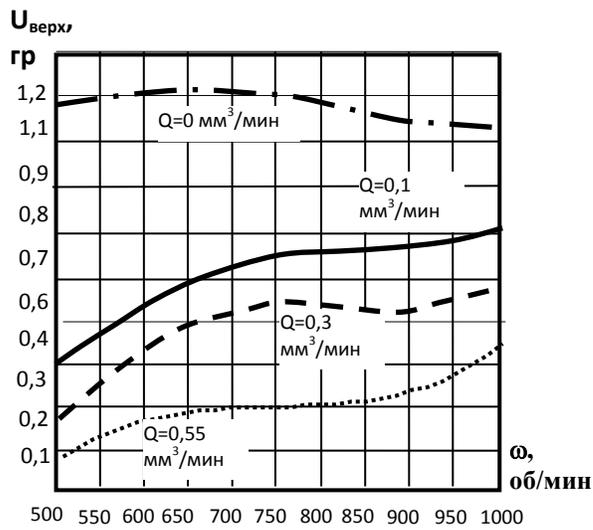
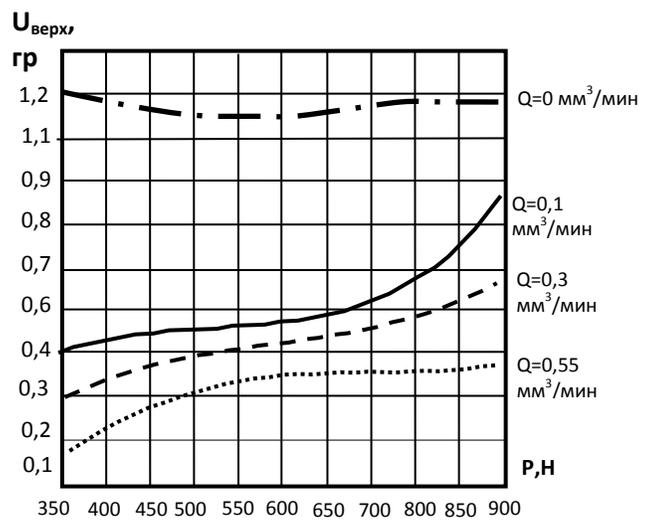


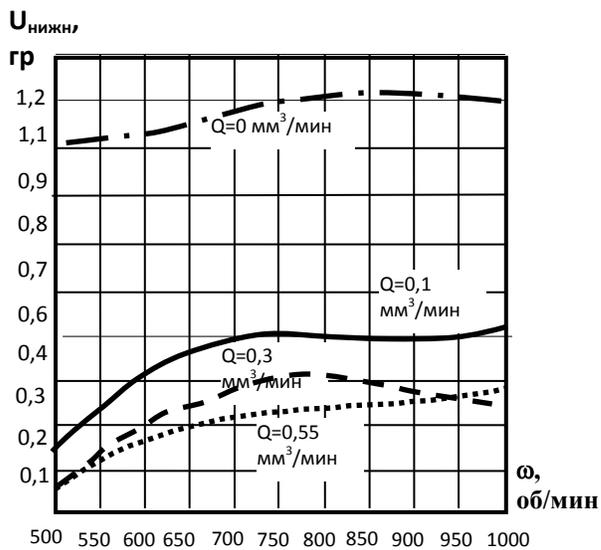
Рисунок 3.7 - Зависимости, описывающие параметры эксперимента:
а, б: момент трения ($M_{\text{тр}}$, кН×м), угловая скорость (ω , об/мин), внешняя нагрузка (P , Н) при различных режимах подачи СМ (Q , мм³/мин)



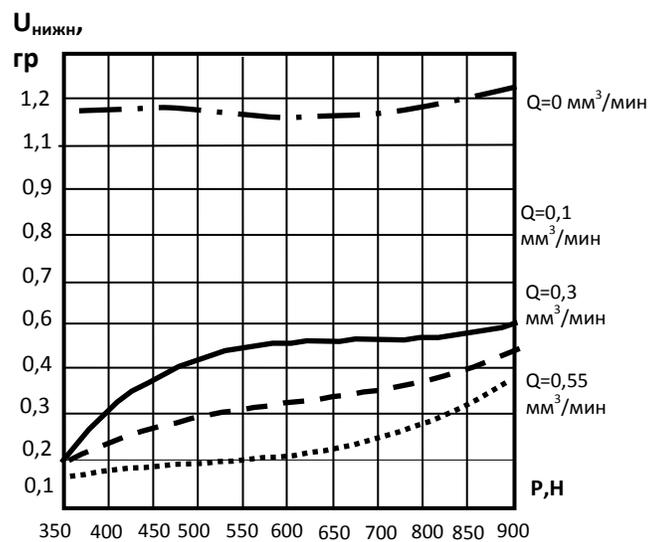
а



б



в



г

Рисунок 3.8 - Зависимости, описывающие параметры эксперимента:
 а, б: износ верхнего ролика (моделирующий износ опорного вала) ($U_{\text{верх}}$, гр.),
 угловая скорость (ω , об/мин), внешняя нагрузка (P, H) при различных режимах
 подачи СМ (Q , мм³/мин);
 в, г: износ нижнего ролика (моделирующий износ рабочего вала) ($U_{\text{нижн}}$, гр.),
 угловая скорость (ω , об/мин), внешняя нагрузка (P, H) при различных режимах
 подачи СМ (Q , мм³/мин);

Анализ полученных результатов исследований позволяет сделать следующие **выводы**.

1. Наибольшее влияние на исследуемую величину ($M_{тр}$) оказывает фактор X_3 (расход СМ), что численно выражено коэффициентом $b_3 = 1,180$, а также коэффициентом $b_{33} = 9,563$. Детальный анализ графиков позволяет сделать вывод, что наиболее предпочтительно выбирать фактор X_3 в диапазоне $0,12 \dots 0,43$ мм³/мин. Следует отметить, что на исследуемую величину ($M_{тр}$) в уравнении (3.8) статистически незначимым членом оказался коэффициент парной корреляции для коэффициентов X_1, X_2, X_3 , что говорит об отсутствии корреляционной взаимосвязи исследуемых факторов. Факторы X_1 и X_2 не оказывают значительного влияния на величину $M_{тр}$. Для достижения минимального значения функции $M_{тр}$ рекомендуется выбирать факторы X_1 в диапазоне $350 \dots 500$ Н, а фактор X_2 в диапазоне $850 \dots 950$ об/мин.

2. Анализ выражений (3.9) и (3.10) позволяет сделать вывод, что на величину износа исследуемой пары трения (верхнего и нижнего ролика) существенное влияние оказывает фактор X_3 – расход СМ, влияние которого учитывается коэффициентами $b_3 = 3,89$ и $b_{33} = 3,19$ (для верхнего ролика) и $b_3 = 3,35$ и $b_{33} = 3,17$ (для нижнего ролика). При этом знак, стоящий перед фактором X_3 , показывает, что при уменьшении количества подаваемого СМ, происходит увеличение износа в исследуемой паре трения. Для получения минимального значения износа в паре трения рекомендуется выбирать факторы X_3 в диапазоне $0,49 \dots 0,53$ мл/мин.

3. По результатам проведенного эксперимента установлено, что применение СМ позволило уменьшить износ в $1,15 \dots 1,25$ раза, при этом максимальное снижение величины износа наблюдается в опыте №8 при $P = 850$ Н, $\omega = 1000$ об/мин, $Q = 0,55$ мм³/мин, что, на наш взгляд, можно объяснить образованием эластогидродинамического режима трения, реализуемого на контакте двух смазываемых криволинейных поверхностей.

4. Анализ выражений (3.11) и (3.12) показывает, что все исследуемые факторы не оказывают существенного влияния на изменение температуры верхнего и нижнего роликов. Одной из задач, решаемых при проведении эксперимента, являлось исследование качественного влияния фактора X_3 (количество подаваемого СМ) на изменение температуры верхнего и нижнего ролика. Анализ полученных результатов свидетельствует о статистически незначительном влиянии фактора X_3 на исследуемый параметр, что позволяет сделать вывод, что расход СМ не оказывает существенного влияния на изменение температуры. Результаты исследования показывают, что факторы X_1 и X_2 , а также их парная корреляция также не оказывают статистически значимого влияния на изменение температуры как верхнего, так и нижнего ролика.

5. Таким образом, анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что исследуемая функция, описанная уравнением (3.11) и (3.12), является статистически адекватным уравнением, но не оказывает существенного влияния на исследуемый технологический процесс, поэтому при проведении дальнейших исследований данную функцию учитывать не будем.

Для поиска оптимальных значений исследуемых в эксперименте параметров была использована методика, приведённая в работе [183].

В качестве исследуемой функции были выбраны следующие параметры: момент трения ($M_{тр}$), износ верхнего ($U^{верх}$) и износ нижнего ($U^{нижн}$) ролика. Расчет параметров проводился для уравнений, полученных в кодированном виде. Математическое решение поставленной задачи сводилось к выражениям.

$$M_{mp}(x_1, x_2, x_3) \rightarrow \min \begin{cases} \frac{\partial y(M_{mp})}{\partial x_1} = 1,208 - 1,874x_1 = 0 \\ \frac{\partial y(M_{mp})}{\partial x_2} = 1,775 + 5,376x_2 = 0 \\ \frac{\partial y(M_{mp})}{\partial x_3} = 0,987 + 0,964x_3 = 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$I^{верх}(x_1, x_2, x_3) \rightarrow \min \begin{cases} \frac{\partial y(I)}{\partial x_1} = -0,1070 - 0,1116x_2x_3 - 0,1142x_1 = 0 \\ \frac{\partial y(I)}{\partial x_2} = 0,1225x_3 - 0,1116x_1x_3 - 0,086x_2 = 0 \\ \frac{\partial y(I)}{\partial x_3} = 0,1225x_2 - 0,1116x_1x_2 - 0,1206x_3 = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$I^{нижн}(x_1, x_2, x_3) \rightarrow \min \begin{cases} \frac{\partial y(I)}{\partial x_1} = -0,0405 - 0,0376x_2x_3 - 0,0382x_1 = 0 \\ \frac{\partial y(I)}{\partial x_2} = 0,0404x_3 - 0,0376x_1x_3 + 0,0338x_2 = 0 \\ \frac{\partial y(I)}{\partial x_3} = 0,0404x_2 - 0,0376x_1x_2 - 0,0356x_3 = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Практическое решение задачи оптимизации, представлено в таблице 3.7, в виде определенных координат центра, записанных в кодированном и натуральном виде для каждой поверхности отклика [184].

Таблица 3.7 - Результаты поиска оптимальных значений эксперимента

Факторы	Безразмерные параметры			Размерные параметры			Функция отклика у
	x ₁	x ₂	x ₃	X ₁	X ₂	X ₃	
				Внешняя, приложенная к верхнему ролику нагрузка, Н	Скорость вращения нижнего ролика, об/мин	Расход смазочного материала, мм ³ /мин	
M _{тр} ^{min} , Н×М	0,644	-0,330	-1,024	75,0	667	0,01	12,970
U _{верх} ^{min} , гр	-0,937	0	0	30,8	750	0,32	0,049
U _{нижн} ^{min} , гр	-1,060	0	0	27,3	750	0,32	0,0456

Графическое изображение решенной задачи приведено на рисунке 3.9, на котором линиями определены расчетные области оптимальных значений эксперимента, при которых исследуемые технологические параметры стремятся к минимуму.

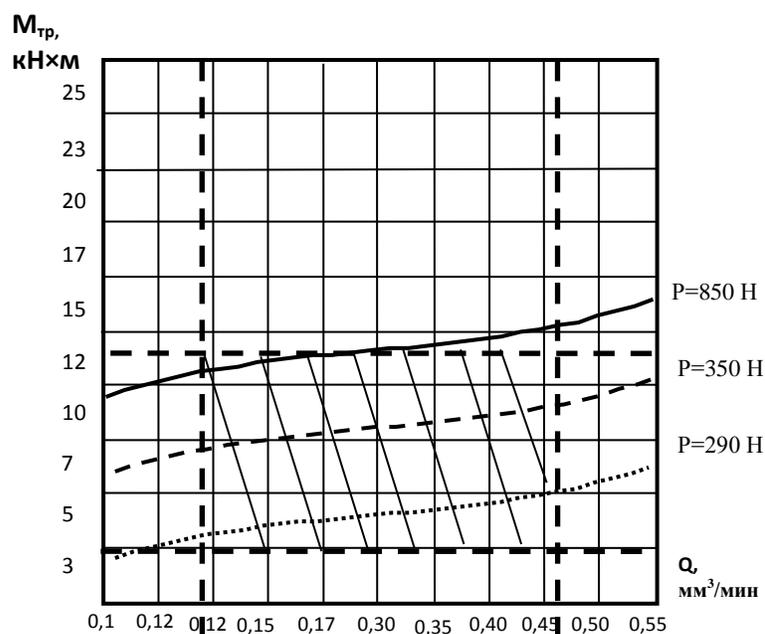


Рисунок 3.9 - Область оптимальных значений для исследуемых факторов эксперимента: момент трения ($M_{тр}$, Н*м) и количество подаваемого СМ (Q , мм³/мин)

Выводы по результатам моделирования. Определение показателей эффективности.

1. С помощью метода физического моделирования и теории планирования эксперимента исследовано влияние режимов подачи СМ на эксплуатационные показатели образцов, моделирующих взаимодействие валковой пары «опорный валок – рабочий валок» клетки «кварто». Получены адекватные регрессионные зависимости, описывающие влияние расхода СМ на изнашивание в системе «опорный валок – рабочий валок».

2. Определены рациональные режимы подачи СМ, при которых наблюдается снижение изнашивания рабочих валков в среднем в 1,15...1,25 раза: внешняя нагрузка $P = 350...500$ Н; угловая скорость $\omega = 850...950$ об/мин, расход СМ $Q = 0,11...0,45$ мм³/мин.

Для определения предложенных показателей эффективности (Θ_i) описывающих условия применения жидких СМ ($M_{тр(i,j)}^{эф(оп-раб)}$, $U_{раб(i,j)}^{эф.лаб}$, $U_{оп(i,j)}^{эф.лаб}$)

согласно разработанным режимам подачи СМ (см.п.2.3), была проведена серия дополнительных лабораторных экспериментов. Полученные результаты систематизированы и приведены в таблице 3.8. Анализ результатов показывает следующую эффективность применения СМ: снижение параметра $M_{тр}$, (H^*m) на 6...11%, снижение величины износа образцов на 3...15 %.

Определение показателей эффективности по результатам опытно-промышленных испытаний.

Предложенные показатели эффективности применения жидких СМ ($\Gamma^{эф}$, $J^{эф}$, $M_{пр}^{эф}$) при различных режимах подачи были определены на основе теоретических расчетов и опытно-промышленных испытаний.

Таблица 3.8 - Расчетные значения показателей эффективности

Непрерывная чистовая группа клетей	Показатели эффективности (Ξ), полученные на основе лабораторных исследований					
	Момент трения		Износ образцов			
	$M_{тр(i,j)}^{эф(оп-раб)}$	$\Xi = \frac{M_{тр(i,j)}^{0(оп-раб)}}{M_{тр(i,j)}^{1(оп-раб)}}$	$U_{оп(i,j)}^{эф.лаб}$	$\Xi = \frac{U_{раб(i,j)}^0}{U_{раб(i,j)}^1}$	$U_{раб(i,j)}^{эф.лаб}$	$\Xi = \frac{U_{оп(i,j)}^0}{U_{оп(i,j)}^1}$
Режим 1. Расход СМ=0,09-0,24·10⁶ мм³/мин						
7-ая клеть	$\frac{29,0...30,2}{21,8...24,6}$	1,07...1,11	$\frac{1,01...1,21}{0,77...0,88}$	1,03...1,06	$\frac{0,91...0,96}{0,87...0,90}$	1,06...1,09
8-ая клеть	$\frac{29,0...30,2}{20,8...23,4}$	1,06...1,12	$\frac{1,11...1,22}{0,76...0,99}$	1,05...1,08	$\frac{0,87...0,93}{0,76...0,80}$	1,05...1,12
9-ая клеть	$\frac{29,0...30,2}{20,5...26,6}$	1,06...1,12	$\frac{1,09...1,27}{0,78...0,98}$	1,09...1,11	$\frac{0,90...0,95}{0,75...0,85}$	1,10...1,15
Режим 2. Расход СМ=0,12-0,20·10⁶ мм³/мин						
7-ая клеть	$\frac{30,0...31,2}{25,8...27,6}$	1,05...1,10	$\frac{1,11...1,20}{0,75...0,88}$	1,04...1,08	$\frac{0,94...0,97}{0,76...0,87}$	1,05...1,09
8-ая клеть	$\frac{30,0...31,2}{23,8...28,6}$	1,07...1,13	$\frac{1,12...1,20}{0,79...0,95}$	1,08...1,10	$\frac{0,91...0,95}{0,79...0,91}$	1,06...1,12
9-ая клеть	$\frac{30,0...31,2}{25,8...29,6}$	1,05...1,14	$\frac{1,11...1,22}{0,75...0,93}$	1,09...1,12	$\frac{0,93...0,95}{0,76...0,903}$	1,09...1,12
Режим 3. Расход СМ=0,05-0,13·10⁶ мм³/мин						
7-ая клеть	$\frac{30,0...32,2}{21,8...25,6}$	1,08...1,11	$\frac{1,01...1,20}{0,78...0,98}$	1,02...1,09	$\frac{0,90...0,95}{0,77...0,90}$	1,06...1,09
8-ая клеть	$\frac{30,0...32,2}{23,8...27,6}$	1,08...1,11	$\frac{1,01...1,20}{0,78...0,98}$	1,07...1,09	$\frac{0,90...0,95}{0,77...0,90}$	1,06...1,11
9-ая клеть	$\frac{30,0...30,2}{25,8...29,6}$	1,09...1,13	$\frac{1,01...1,20}{0,78...0,98}$	1,07...1,10	$\frac{0,87...0,93}{0,76...0,80}$	1,07...1,12

Режим 4. Расход СМ=0,04-0,12·10⁶ мм³/мин						
7-ая клеть	$\frac{29,0...30,2}{22,8...25,6}$	1,11..1,13	$\frac{1,11..1,20}{0,78..0,98}$	1,06..1,08	$\frac{0,97..0,99}{0,74..0,91}$	1,02...1,09
8-ая клеть	$\frac{29,0...30,2}{22,8...25,6}$	1,09..1,14	$\frac{1,14..1,24}{0,78..0,98}$	1,07..1,08	$\frac{0,92..0,99}{0,72..0,95}$	1,06...1,10
9-ая клеть	$\frac{29,0...30,2}{22,8...25,6}$	1,09..1,15	$\frac{1,11..1,26}{0,77..0,97}$	1,07..1,11	$\frac{0,87..0,93}{0,76..0,80}$	1,07...1,13
Режим 5. Расход СМ=0,03-0,12·10⁶ мм³/мин						
7-ая клеть	$\frac{26,0...29,2}{23,8...27,6}$	1,09..1,12	$\frac{1,01..1,22}{0,78..0,98}$	1,05..1,07	$\frac{0,90..0,95}{0,77..0,90}$	1,00...1,89
8-ая клеть	$\frac{26,0...29,2}{24,8...28,6}$	1,08..1,11	$\frac{1,01..1,20}{0,78..0,98}$	1,06..1,09	$\frac{0,90..0,95}{0,77..0,90}$	1,08...1,11
9-ая клеть	$\frac{26,0...29,2}{21,8...27,6}$	1,08..1,13	$\frac{1,01..1,20}{0,78..0,98}$	1,08..1,10	$\frac{0,90..0,95}{0,77..0,90}$	1,09...1,12
Примечание: В числителе приведены данные результатов лабораторных экспериментов без применения смазочных материалов. В знаменатели данные результатов лабораторных экспериментов с применением смазочных материалов.						

3.2 Разработка расчетной (прогнозной) модели параметра «Сила тока» электродвигателей чистовой группы клетей листового стана горячей прокатки

Задачей исследования является разработка прогнозной модели, позволяющей на этапе составления монтажных партий (с вероятностью не менее $P(t)=80\%$) выдавать практические рекомендации по загрузке клетей стана, в том числе для технологии листовой горячей прокатки с применением жидких СМ.

На основе математико-статистического подхода (регрессионного анализа) была получена математическая модель для прогнозирования параметра «Сила тока» электродвигателей чистовой группы клетей листового стана горячей прокатки.

В модель были включены количественные и качественные переменные, представленные на рисунке 3.10.

Для учета влияния качественных параметров в модель были введены переменные, принимающие значения 0 или 1, где: 1 – прокатка с применением СМ; 0 – прокатка без применения СМ.

В качестве исходных данных были приняты фактические данные процесса листовой горячей прокатки (рапорт прокатки на НШСГП 2000 ПАО «ММК») за период с 01.01.2019 г. по 30.09.2019 г., а также:

- режимы подачи СМ;
- значения параметра «Сила тока» (А) по клетям чистовой группы;
- значения технологического параметра «Усилие прокатки», (МН) по клетям чистовой группы.

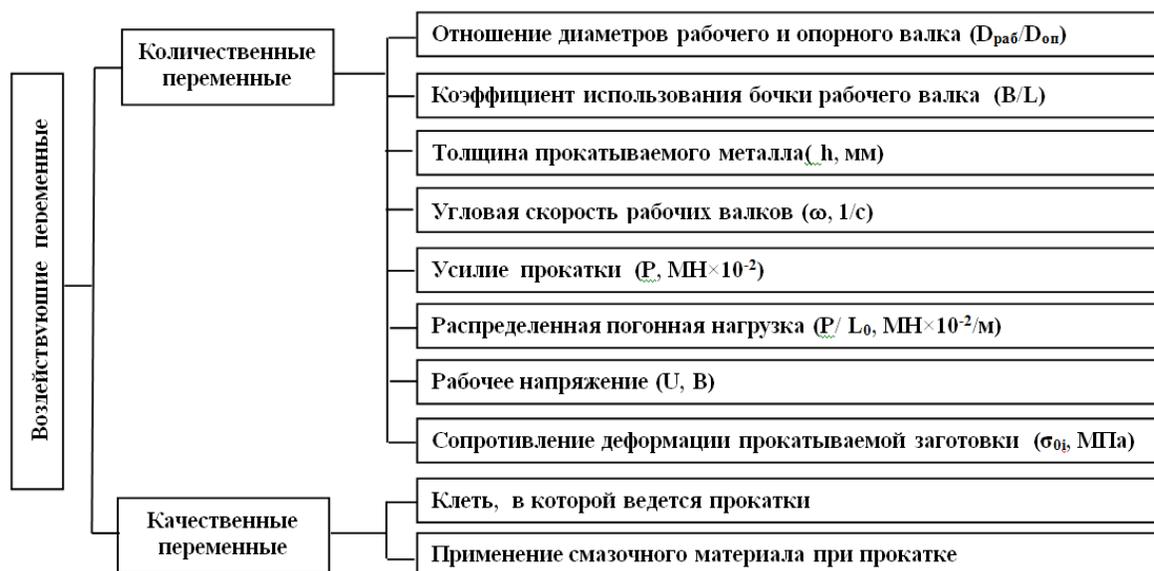


Рисунок 3.10 - переменные для построения прогнозной модели параметра «Сила тока» электродвигателей чистовой группы клетей.

$Z_1^{(1;0)}$ – подача СМ материал в первой клетии стана;

$Z_2^{(1;0)}$ – подача СМ во второй клетии стана;

$Z_3^{(1;0)}$ – подача СМ в третьей клетии стана;

Z_{4i} – режимы подачи СМ, включающие в себя:

Z_{41} – Режим подачи СМ №1. Расход СМ = $0,09-0,24 \cdot 10^6$ мм³/мин;

Z_{42} – Режим подачи СМ № 2. Расход СМ = $0,12-0,20 \cdot 10^6$ мм³/мин;

Z_{43} – Режим подачи СМ № 3. Расход СМ = $0,05-0,13 \cdot 10^6$ мм³/мин;

Z_{44} – Режим подачи СМ № 4. Расход СМ = $0,04-0,12 \cdot 10^6$ мм³/мин;

Z_{45} – Режим подачи СМ № 5. Расход СМ = $0,03-0,12 \cdot 10^6$ мм³/мин.

Для решения поставленной задачи использовалась аналитическая платформа Deductor Studio Academic 5.2 и пакет программ Statistica. Величины коэффициентов регрессионного уравнения были найдены с помощью

обобщенного метода наименьших квадратов. Для исключения из модели незначимых переменных была применена процедура последовательного исключения факторов из модели.

Получено уравнение регрессии (3.16), позволяющее определять значения силы тока для чистой групп клеток $(I_{(i,j)}^{1,0}, A)$ листового стана горячей прокатки.

$$I_i^{(1,0)} = 2 \times (-1264,5 + 3541,92 \times \frac{P_i^{(1,0)}}{L} - 968,76 \times Z_{23} - 2253,7 \times Z_{22} + 263,05 \times \frac{b}{L} - 726,47 \times Z_{25} + 43,4 \times h - 1465,14 \times Z_{24} + 1,12 \times U_i^{(1,0)} - 790,67 \times Z_{26} - 1803,51 \times Z_{21} - 63,16 \times \omega_i^{(1,0)} + 3654,09 \times \frac{D_{\text{верхн}}}{D_{\text{нижн}}}) - 67,32 \times Z_1 - 10,46 \times \delta); (R^2 = 0,85; F_{0,95;6}^{\text{расч}} = 1753 \geq F^{\text{табл}} = 2,54) \quad (3.16)$$

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; $D_{\text{опi}}$ – диаметр опорного рабочего валка в i -ой клетки, мм; $D_{\text{рабi}}$ – диаметр рабочего валка в i -ой клетки, мм.

Все возможные значения комбинаций значений фиктивных переменных, применяемых для определения параметра «Сила тока», приведены в таблице 3.9. и 3.10.

Таблица 3.9 - Комбинации значений фиктивных переменных для модели прогнозирования параметра «Сила тока» по критерию $Z_i^{(1,0)}$

№ п/п	№ клетки	Применение СМ	$Z_1^{(1,0)}$	$Z_2^{(1,0)}$	$Z_3^{(1,0)}$
1	7-ая клетка	Да	1	0	0
2		Нет	0	0	0
3	8-ая клетка	Да	0	1	0
4		Нет	0	0	0
5	9-ая клетка	Да	0	0	1
6		Нет	0	0	0

Таблица 3.10 - Комбинации значений фиктивных переменных для модели прогнозирования параметра «Сила тока» по критерию Z_{4i}

№ п/п	Переменная, учитывающая подачу СМ Z_{4i}	Применение СМ	Z_{41}	Z_{42}	Z_{43}	Z_{44}	Z_{55}
1	Z_{41} – Режим подачи СМ №1	Да	1	0	0	0	0
		Нет	0	0	0	0	0
2	Z_{41} – Режим подачи СМ №2	Да	0	1	0	0	0
		Нет	0	0	0	0	0
3	Z_{41} – Режим подачи СМ №3	Да	0	0	1	0	0
		Нет	0	0	0	0	0
4	Z_{41} – Режим подачи СМ №4	Да	0	0	0	1	0
		Нет	0	0	0	0	0
5	Z_{41} – Режим подачи СМ №5	Да	1	0	0	0	1
		Нет	0	0	0	0	0

Апробация расчетной (прогнозная) модели параметра «Сила тока» электродвигателей чистовой группы клеток листового стана горячей прокатки.

Пример прогнозирования параметра «Сила тока» для производства листового проката с размерными характеристиками $3,2 \times 1275$ мм из стали марки 08пс с применением СМ представлен в таблице 3.11. Аналогичный расчет был произведен для широкого сортамента прокатываемых заготовок, включающий в себя около 200 различных марок и их типоразмеров. Анализ полученных результатов, представленный на рисунке 3.11, показывает, что разработанная прогнозная модель обладает достаточно высокой точностью прогнозирования, для которой средняя величина ошибки составляет 4%, максимальная величина ошибки не превышает 16,6%, среднее квадратичное отклонение составляет 412,5 А, что позволяет признать модель достоверной.

Таблица 3.11 - Пример прогнозирования энергосиловых параметров производства листового проката с размерными характеристиками 3,2x1275 мм из стали марки 08пс при работающей системе подачи СМ

№ клетки	Угловая скорость валков (ω , 1/с)	Рабочее напряжение (U, В)	Распред. погонная нагрузка (P/L0, МН·10 ⁻² /м)	Коэф. исполнения бочки рабочего валка (В/L)	Отношения диаметров бочек (D _{он} /D _{раб})	Сила тока (I, А) прогн.	Сила тока (I, А) набл.	Абс. ошибка (А)	Относит. ошибка (%)
7	4,576	694,77	1,106	0,637	0,870	8560,3	9333,8	773,5	8,29
8	6,799	879,91	0,957	0,637	0,870	6740,6	7206,0	465,4	6,46
9	10,78	735,30	0,7165	0,637	0,870	6773,8	6821,3	47,5	0,70

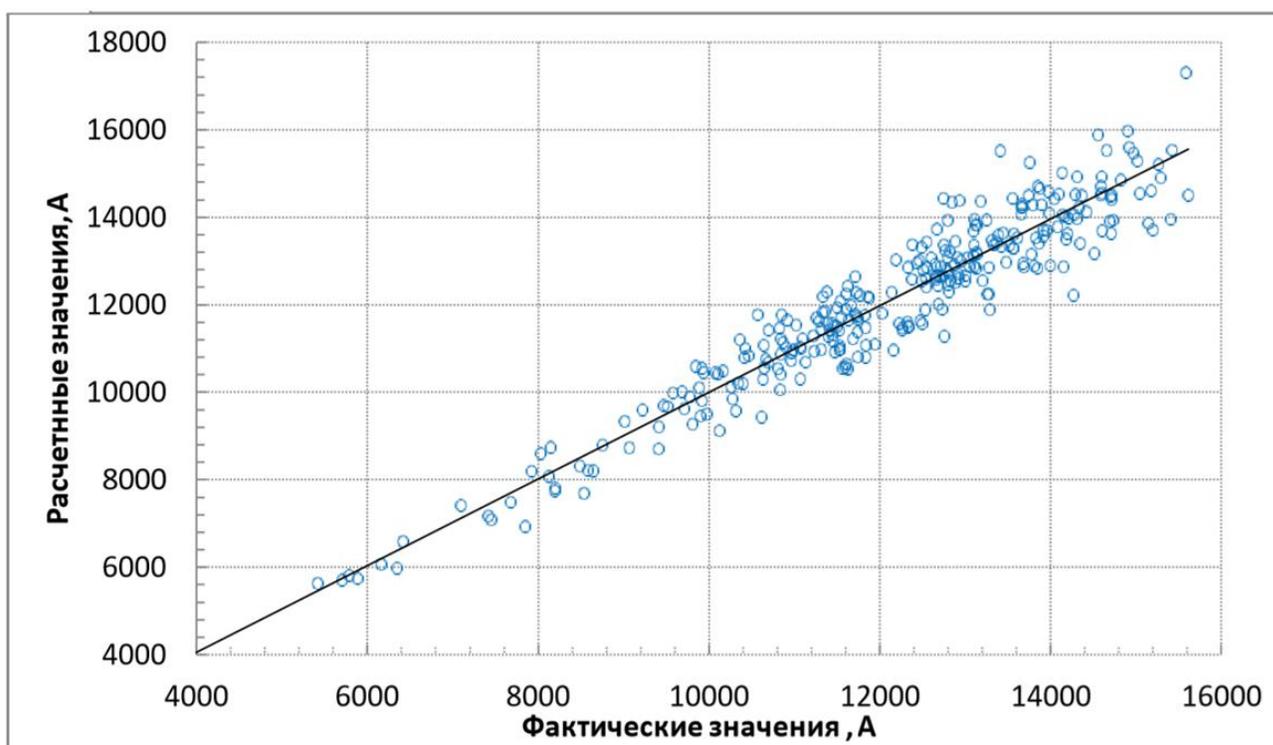


Рисунок 3.11 - Расчетные (прогнозная) модель и фактические значения параметра «Сила тока»

Выводы по результатам построения модели определения показателя эффективности Γ^{Φ}

Разработана прогнозная модель (3.25), которая позволяет на этапе составления монтажных партий (с вероятностью не менее $P(t)=80\%$) выдавать практические рекомендации по загрузке клеток стана, в том числе определять

эффективность процесса листовой горячей прокатки по предложенному критерию эффективности ($I_{(i,j)}^{эф.пром}$).

По результатам теоретических и промышленных исследований произведена оценка показателя эффективности ($I_{(i,j)}^{эф.пром}$). Результаты исследований систематизированы и приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 - Расчетное значение показателя эффективности ($I_{(i,j)}^{эф.пром}$)

Непрерывная чистовая группа клеток	параметр «Сила тока», А		Показатель эффективности (Э) $I_{(i,j)}^{эф.пром} = \frac{I_{раб(i,j)}^0}{I_{раб(i,j)}^1}$
	$I_{(i,j)}^0$ без подачи СМ	$I_{(i,j)}^1$ с подачей СМ	
Режим 1. Расход СМ=0,09-0,24•10⁶ мм³/мин			
1-ая клеть	8432...85230	8113...8126	1,08...1,12
2-ая клеть	7839...7976	6931...6990	1,06...1,11
3-ая клеть	8420...8543	7746...7856	1,08...1,13
Режим 2. Расход СМ=0,12-0,20•10⁶ мм³/мин			
1-ая клеть	8271...8290	7506...7552	1,07...1,11
2-ая клеть	8195...8200	8080...8120	1,06...1,12
3-ая клеть	8947...8993	8148...8189	1,08...1,12
Режим 3. Расход СМ=0,05-0,13•10⁶ мм³/мин			
1-ая клеть	6605...6632	6458...6520	1,08...1,11
2-ая клеть	6930...6958	6792...6860	1,07...1,12
3-ая клеть	10262...10310	9576...9675	1,07...1,13
Режим 4. Расход СМ=0,04-0,12•10⁶ мм³/мин			
1-ая клеть	10795...10850	9812...9935	1,08...1,12
2-ая клеть	9552...9620	8074...8112	1,06...1,11
3-ая клеть	9548...9580	9272...9358	1,08...1,13
Режим 5. Расход СМ=0,03-0,12•10⁶ мм³/мин			
1-ая клеть	10795...10860	9812...9880	1,07...1,11
2-ая клеть	9552...9615	8074...8123	1,06...1,12
3-ая клеть	9548...9632	9272...9315	1,07...1,12

Анализ полученных результатов показывает, что применение жидких СМ в технологии листовой горячей прокатки позволяет снизить энергозатраты (токовые нагрузки главных приводов) в среднем на 7...10 %.

3.3 Моделирование процесса изнашивания рабочих валков листовых станов горячей прокатки. Определение показателей эффективности.

Наиболее адекватным параметром, позволяющим оценивать функционирование системы «**опорный валок – рабочий валок – полоса**», является энергетический показатель изнашивания ($J_{эн}$).

На листовых станах горячей прокатки применяется технология получения заготовок монтажными партиями. Каждая монтажная партия состоит из различных прокатываемых марок сталей (в том числе по длине и ширине), и ограничена эксплуатационной стойкостью (износом) рабочих или опорных валков.

Технологией заложено, что для каждой i -ой монтажной партии СМ подается на каждую из прокатываемых полос. При этом в технологии заложен ряд условий, при которых подача СМ не применяется. С учетом того, что время эксплуатации (межперевалочный период) может составлять до 150...180 часов для опорных и до 5...8 часов для рабочих валков, оценить величину износа опорных валков зачастую не представляется возможным. В дальнейшем в работе будет исследовано влияние СМ на характеристику изнашивания рабочих валков с учетом влияния факторов функционирования системы «**опорный валок – рабочий валок – полоса**».

Математическая модель изнашивания рабочего валка основана на известных подходах, базирующихся на работах [167,185,186], в основу которых заложена базовая энергетическая теория изнашивания твердых тел [167,187,188]:

$$\Delta V(t) = J_{ij(0,1)}^{\text{ЭН}} \cdot A_{\text{тр}ij(0,1)}(t) = J_{ij(0,1)}^{\text{ЭН}} \cdot N_{\text{тр}ij(0,1)} \cdot t, \text{ мм}^3 \quad (3.17)$$

где $J^{\text{ЭН}}$ – энергетический показатель изнашивания рабочего вала, $\text{мм}^3/\text{Нм}$;

$N_{\text{тр}}$ – мощность, затраченная на преодоления сил трения, Вт.

В выражении (3-17) индексы описывают следующие: 0 – процесс прокатки происходит без применения СМ; 1 – с применением СМ; i- номер клетки; j - положение вала (верхний/нижний).

При математическом описании процесса изнашивания рабочих валков листовых станов горячей прокатки принимаем допущения, что рабочий валок выходит из строя по износу его рабочих поверхностей.

Поскольку на практике износ рабочих валков оценивают по его линейной величине (ΔR – для прокатного вала), характеристики определим из условия:

$$\Delta V_i = V_{i(0)} - V_{i(1)}, \quad (3.18)$$

где $V_{i(0)}$ - объем вала с исходным профилем;

$V_{i(1)}$ - объем вала с изношенным профилем.

Определение объема изношенного материала рабочего вала

Износ поверхностей рабочих валков происходит за счет сил трения в системах «рабочий валок – полоса» и «рабочий валок – опорный валок».

При решении задачи принимаем условия, что износ поверхностей рабочих валков прокатного стана может происходить как равномерно, так и неравномерно.

Определение равномерного и неравномерного износа рабочего вала.

На рисунке 3.12 приведена расчетная схема для определения износа рабочего вала. Центральная точка «0», находится в геометрическом центре бочки вала.

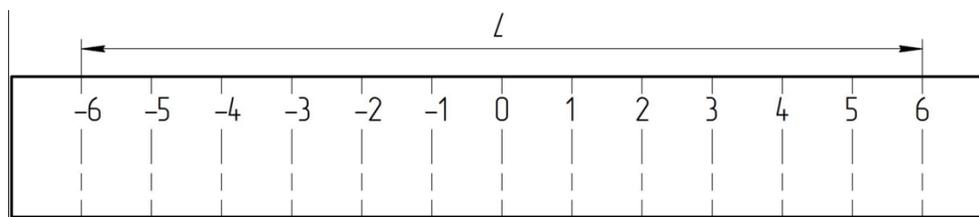


Рисунок 3.12 - Схема для определения равномерного и неравномерного износа рабочего валка.

Считаем, что число зон «n» может быть различным, но обязательно четным числом.

Из N зон $N/2$ имеют положительный номер от 1 до $+N/2$, $N/2$ зон имеют отрицательный номер от -1 до $-N/2$, где L – длина бочки валка мм, ΔL_N - длина зоны, мм.

Длины всех зон обладают условием равенства между собой.

$$\Delta L_1 = \Delta L_{-1} = \Delta L_{N/2-1} = \Delta L_{-(N/2)-1} = \Delta L_{N/2} = \Delta L_{-N/2}.$$

Число левых от точки «0» зон должно быть равно $N/2$ и число правых от точки «0» зон также равно $N/2$, т.е. число зон, расположенных слева от точки «0» должно быть равно числу зон расположенных справа точки «0».

Считаем, что перед прокаткой, рабочий валок имеет определенный типоразмер, т.е. в каждой точке определенный диаметр $-N/2 \dots -3; -2; -1; 0; 1; 2; 3 \dots$, который обозначим как D_i , где $i = -N/2 \dots -2; -1; 0; 1; 2 \dots N/2$.

После вывалки валка (завершения процесса прокатки) за счет износа диаметры $D_{-N/2}; D_{-2}; D_{-1}; D_0; D_1; D_2 \dots D_{N/2}$ уменьшат свои значения до $D'_{-N/2}; \dots D'_{-2}; D'_{-1}; D'_0; D'_1; D'_2; D'_{N/2}$.

$$\begin{aligned} \text{Необходимо выполнение неравенства: } & D'_{-N/2} \leq D_{-N/2}; & D'_{-2} \leq D_{-2}; \\ & D'_{-1} \leq D_{-1}; & D'_0 \leq D_0; & D'_1 \leq D_1; & D'_2 \leq D_2; & D'_{N/2} \leq D_{N/2}. \end{aligned}$$

Абсолютное изменение диаметра валка в точке $i = -N/2 \dots -1; 0; 1 \dots +N/2$ можно определить, как разность диаметров до прокатки и после прокатки, в каждой зоне с i :

$$D_i - D'_i = \Delta D_i. \quad (3.19)$$

Относительное изменение диаметра в каждой зоне с i можно определить:

$$\eta_i = \frac{\Delta D_i}{D_i} \cdot 100\% = \frac{D_i - D'_i}{D_i} \cdot 100\%. \quad (3.20)$$

Боковая поверхность (образующая валка) может иметь три геометрических вида, представленных на рисунке 3.13:

1) цилиндрическая форма (рисунок 3.13а)

$$D_i = \text{const}, D_{-N/2} = D_{-1} = D_0 = D_1 \dots D_{N/2}; \quad (3.21)$$

2) эллипсоид вращения (выпуклой формы вдоль большой оси вращения) – рисунок 3.13б:

$$\left. \begin{aligned} D_0 &= D_{max} & D_{-1} &= D_1 < D_0; \\ D_{-2} &= D_2 < D_1 = D_{-1}; \\ D_{-N/2} &= D_{N/2} < D_{-(N/2-1)} = D_{+(N/2-1)}; \\ D_{-N/2} &= D_{N/2} = D_{min}. \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

3) однополостный гиперboloид вращения (вогнутой формы вдоль большой оси вращения) – рисунок 3.13в

$$\left. \begin{aligned} D_0 &= D_{min}; \\ D_{-N/2} &= D_{N/2} = D_{max}; \\ D_{-1} &= D_1 > D_0; \\ D_{-2} &= D_2 > D_1 = D_{-1}; \\ D_{-N/2} &= D_{N/2} = D_{-(N/2-1)} = D_{(N/2-1)}. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$



Рисунок 3.13 - Формы валков прокатных станов

Будем считать, что износ валка будет называться **равномерным**, если новая образующая линия боковой поверхности валка после износа будет эквидистантно образующей линии боковой поверхности, которую валок имел до износа.

Если в результате износа образующая линия боковой поверхности не будет в точности параллельна образующей линии боковой поверхности до износа, то такой износ будет называться **неравномерным**.

Для описания равномерного износа рабочего валка, рассмотрим две параллельные, которые представим, как образующие линии боковой (образующей) поверхности валка до износа и после (рис.3.14).

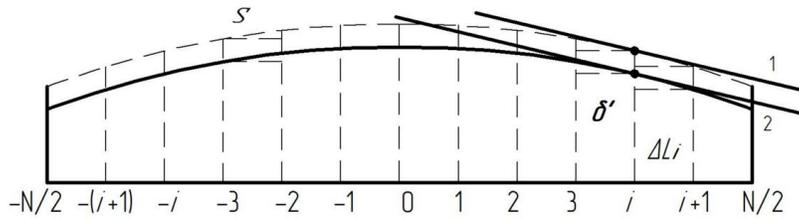


Рисунок 3.14 - Равномерный износ боковой (образующей) поверхности валка:
 S' - образующая линия боковой поверхности до износа;
 S' - образующая линия боковой поверхности после износа

Условие параллельности образующих линий S' и S' . В точке i к образующим линиям S' и S' проведем касательные 1 и 2. Считаем, что износ равномерный, поэтому в произвольной точке i касательная 1 будет параллельна касательной 2. Это свойство распространяется на все точки i от $-N/2$ до $N/2$. Тангенс угла наклона α касательной в этой же точке i для образующей линии S' . Тангенсы $tg\alpha_i$ и $tg\alpha'_i$ определяются из треугольников, построенных на стороне ΔL_i и $\left(\frac{D_i}{2} - \frac{D_{i+1}}{2}\right)$ или ΔL_i и $\left(\frac{D'_i}{2} - \frac{D'_{i+1}}{2}\right)$. В результате получим следующее выражение:

$$tg\alpha_i = \frac{|D_i/2 - D_{i+1}/2|}{\Delta L_i} = \frac{1}{2} \left[\frac{D_i - D_{i+1}}{\Delta L_i} \right], \quad (3.24)$$

где D_i ; D_{i+1} - диаметры валка в точках i ; $i + 1$ до износа.

Если образующая линия S' параллельна образующей линии S , тогда должно выполняться равенство:

$$tg\alpha_i = tg\alpha'_i. \quad (3.25)$$

Равенство, используя правые части уравнений (3.24).

$$\frac{1}{2} \left[\frac{D_i - D_{i+1}}{\Delta L_i} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{D'_i - D'_{i+1}}{\Delta L_i} \right].$$

Или модули в виде двух равенств.

$$D_i - D_{i+1} = D'_i - D'_{i+1}; \quad (3.26)$$

$$D_{i+1} - D_i = D'_{i+1} - D'_i. \quad (3.27)$$

Равенство (3.26) применимо к выпуклому валку, а равенство (3.27) применимо для вогнутого валка. После преобразования имеем выражения вида:

$$1) \quad D_i - D'_i = D_{i+1} - D'_{i+1} \text{ (валок выпуклой формы)}$$

$$\Delta D_i = \Delta D_{i+1} \quad \Delta D_i > 0; \quad (3.28)$$

$$2) \quad D'_i - D_i = D'_{i+1} - D_{i+1} \text{ (валок вогнутой формы)}$$

$$\Delta D_i = \Delta D_{i+1} \quad \Delta D_i > 0; \quad (3.29)$$

$$3) \quad D'_i - D_i = D'_{i+1} - D_{i+1} \text{ (валок цилиндрической формы)}$$

$$\Delta D_i = \Delta D_{i+1} \text{ или } \Delta D_i = \Delta D_{\kappa}. \quad (3.30)$$

При равномерном износе изменение диаметра D_i в любой точке центральной продольной оси i (ΔD_i) должно происходить на одну и ту же величину.

Изменение диаметра ΔD_i по длине бочки валка при износе есть величина постоянная: $\Delta D_i = const$ и не зависит от вида боковой (образующей) поверхности валка

В случае неравномерного износа в различных частях боковой (образующей) поверхности валка степень износа будет различной.

В том случае изменение диаметра валка в различных точках i будет различно, что можно записать в виде выражения:

$$\Delta D_i \neq \Delta D_{\kappa}. \quad (3.31)$$

При равномерном износе величины относительного изменения диаметра валка в различных зонах будут иметь разные значения.

$$\eta_i = \frac{\Delta D_i}{D_i} \cdot 100\% \text{ в } i - \text{зоне} \quad (3.32)$$

$$\eta_{\kappa} = \frac{\Delta D_{\kappa}}{D_{\kappa}} \cdot 100\% \text{ в } \kappa - \text{зоне}$$

Так как $\Delta D_i = \Delta D_{\kappa}$ при равномерном износе, а $\Delta D_i \neq \Delta D_{\kappa}$, то

$$\eta_i \neq \eta_{\kappa}. \quad (3.33)$$

Определение объема износа поверхности рабочего вала

Введем декартовую систему координат X, Y, Z . Направим ось OZ системы вдоль по центру вала, а центр системы координат O поместим в геометрический центр бочки вала. Декартова система координат X, O, Z бочки вала показана на рисунке 3.15.

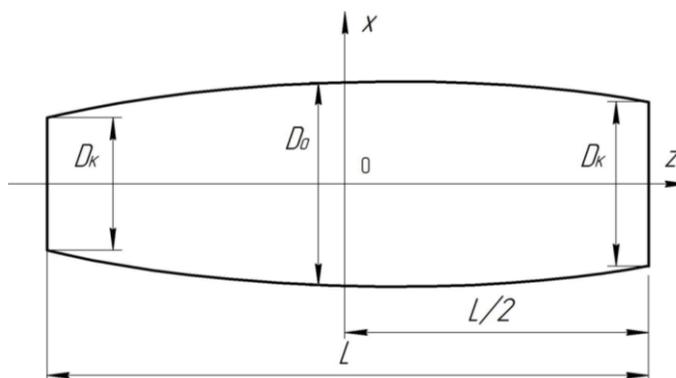


Рисунок 3.15 - Бочка вала в системе координат XOZ

Уравнение, описывающее образующую боковую поверхность вала в системе координат XOY , представляет собой тело вращения (меридианы) и для случая бочки вала в общем виде может быть представлено как $y = f(z)$ или $x = f(z)$.

Бочка вала является телом вращения вокруг оси OZ . Определим объем бочки вала, как объем тела вращения вокруг оси OZ . Зная уравнение, описывающее образующую боковую поверхность вала в системе координат XOY , можно определить объем поверхности из уравнения:

$$V = \pi \int_{z_1}^{z_2} [f(z)]^2 dz. \quad (3.34)$$

Применение выражения (3.34) более удобно, если вычислить сначала объем полубочки вала, а затем удвоить полученные значения: $V = 2 \cdot V_{1/2}$, где:

$$V_{1/2} = \pi \int_0^{L/2} [f(z)]^2 dz; \quad (3.35)$$

$$V = 2\pi \int_0^{L/2} [f(z)]^2 dz, \quad (3.36)$$

где L – длина бочки валка.

Вводим допущение, что если процесс прокатки полосы производится на всю длину бочки, тогда износ поверхности будет происходить также по всей длине бочки L .

В результате износа уравнение меридианы будет иметь вид:

$$y = f_k(z) \quad \text{или} \quad x = f_k(z); \quad (3.37)$$

Объем бочки валка после прокатки можно найти с помощью формулы

$$V' = 2\pi \int_0^{L_i/2} [f_k(z)]^2 dz, \quad (3.38)$$

где V' - объем валка после прокатки.

Из-за процесса износа валка всегда будет соблюдаться условие $V' < V$.

Определим износ бочки валка, который произошел в процессе прокатки по всей длине бочки валка:

$$\Delta V = V - V'; \quad (3.39)$$

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

$$\Delta V = 2\pi \int_0^{L_i/2} [f(z)]^2 - [f_k(z)]^2 dz. \quad (3.40)$$

Здесь ΔV - объем износа бочки при прокатке полосы, ширина которой b равна длине бочки валка L_i

$$b = L_i. \quad (3.41)$$

Для случая, когда ширина прокатываемой полосы b_i меньше длины бочки рабочего валка L_i соблюдается неравенство:

$$b_i < L_i. \quad (3.42)$$

Для случая (3.42) в процессе прокатки будет задействована только зона рабочего валка, которая симметрична, относительно середины бочки валка, длиной ΔL_i .

$$b_i < \Delta L_i. \quad (3.43)$$

Для определения объема износа ΔV материала, происходящего в процессе прокатки, необходимо вместо длины бочки валка L_i использовать величину, равную длине прокатки (ширине прокатываемой полосы) $\Delta L_i = b$, или:

$$\Delta V = 2\pi \int_0^{b/2} [f(z)]^2 - [f_k(z)]^2 dz, \quad (3.42)$$

где b – ширина полосы прокатки.

Равномерный износ рабочего валка, имеющего цилиндрическую форму боковой поверхности $D_i = D_k$ (расчетная схема приведена на рисунке 3.16).

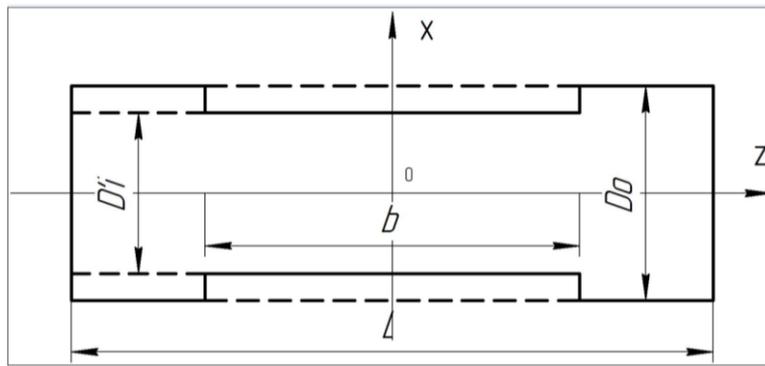


Рисунок 3.16 – Равномерный износ цилиндрической боковой поверхности рабочего валка в результате прокатки

Запишем граничные условия для равномерного износа рабочего валка, имеющего параметры: длина бочки рабочего валка L_i , ширина прокатываемой полосы b , длина активной рабочей зоны валка ΔL_i :

$\Delta L_i = b$; $y = f(z)$ – уравнение меридианы рабочего валка до прокатки,

$y = f_k(z)$ – уравнение меридианы рабочего валка после прокатки.

В случае равномерного износа цилиндрической поверхности уравнение меридианы до процесса прокатки имеет вид: $x = y = f(z)$, уравнение меридианы после прокатки $x = y = f_k(z)$, или

$$x = y = f(z) = D_0/2 \text{ – до прокатки,}$$

(3.43)

$$x = y = f_k(z) = D'/2 \text{ – после прокатки,}$$

где $D_0/2 > D'/2$.

Подставим в уравнение (3.42), получим:

$$\Delta V = 2\pi[D_0/2]^2 - [D'/2]^2 \cdot b/2 = 2\pi \cdot [D_0/2 - D'/2] \cdot [D_0/2 + D'/2], \text{ или,}$$

преобразовав, получим:

$$\Delta V = \frac{\pi \cdot b}{4} [D_0 - D'_i] \cdot [D_0 + D'_i]. \quad (3.44)$$

Рабочий валок имеет форму боковой поверхности в виде вытянутого эллипсоида (рисунок 3.17)

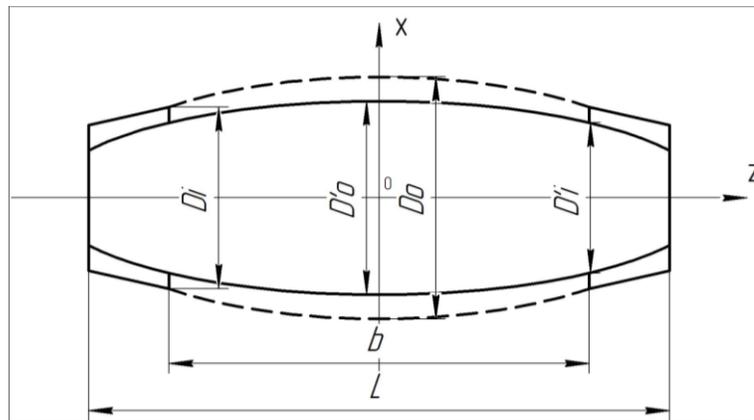


Рисунок 3.17 - Равномерный износ эллипсоидной боковой поверхности рабочего валка в результате прокатки

Уравнение эллипса в общем виде:

$$\frac{z^2}{c^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1; \quad \frac{z^2}{c^2} + \frac{x^2}{a^2} = 1.$$

Для условия равномерного износа рабочего валка, имеющего параметры: длина бочки рабочего валка L_i , ширина прокатываемой полосы b , длина активной рабочей зоны валка ΔL_i , определим коэффициенты c и a .

1) До начала процесса прокатки в точке $x = 0$; $x = y = D_0/2$.

$$\frac{y^2}{b^2} = 1; \quad x^2 = y^2 = a^2; \quad a^2 = \frac{D_0^2}{4}; \quad a = \frac{D_0}{2}. \quad (3.45)$$

При $z = b/2$; $x = y = \frac{D_i}{2}$.

Подставляя в уравнение эллипса, получим: $\frac{b^2}{4c^2} + \frac{D_i^2}{D_0^2} = 1$.

Выразим коэффициент c : $\frac{b^2}{4c^2} = 1 - \frac{D_i^2}{D_0^2}$,

$$c = \frac{b \cdot D_0}{2\sqrt{D_0^2 - D_i^2}}. \quad (3.46)$$

Уравнение эллипса имеет вид до начала процесса прокатки и при отсутствии износа:

$$\frac{z^2 \cdot 4(D_0^2 - D_i^2)}{b^2 D_0^2} + \frac{4y^2}{D_0^2} = 1.$$

Определим:

$$\begin{aligned} x^2 &= y^2, \frac{4y^2}{D_0^2} = 1 - \frac{z^2 \cdot 4(D_0^2 - D_i^2)}{b^2 D_0^2}; \\ x^2 &= y^2 = \frac{D_0^2}{4} \left[\frac{b^2 \cdot D_0^2 - 4(D_0^2 - D_i^2) \cdot z^2}{b^2 \cdot D_0^2} \right]; \\ x^2 &= y^2 = \frac{1}{4b^2} [b^2 \cdot D_0^2 - 4(D_0^2 - D_i^2) \cdot z^2]. \end{aligned} \quad (3.47)$$

Уравнение после процесса прокатки при наличии износа, для которого D'_0 - диаметр бочки валка в центре; D'_i - диаметр бочки валка на расстоянии $z = b/2$ от точки О, после процесса прокатки при наличии износа имеет вид:

$$x_k^2 = y_k^2 = \frac{1}{4b^2} [b^2 \cdot D_0'^2 - 4(D_0'^2 - D_i'^2) \cdot z^2], \quad (3.48)$$

где $x^2 = y^2 = f^2(z)$; $x_k^2 = y_k^2 = f_k^2(z)$.

Определение объема изношенного материала после процесса прокатки.

Подставим в подынтегральное выражение $f^2(z)$ и $f_k^2(z)$, получим

$$\begin{aligned} \Delta V &= 2\pi \int_0^{b/2} \left[\frac{1}{4b^2} (b^2 \cdot D_0^2 - 4(D_0^2 - D_i^2) \cdot z^2) \right] dz \\ &- 2\pi \int_0^{b/2} \left[\frac{1}{4b^2} (b^2 \cdot D_0'^2 - 4(D_0'^2 - D_i'^2) \cdot z^2) \right] dz \\ &\text{или } \Delta V = \frac{\pi b}{4} (D_0 - D_0') \cdot (D_0 + D_0') + \\ &+ \frac{\pi b}{12} [(D_0' - D_i') \cdot (D_0' - D_i') - (D_0 - D_i) \cdot (D_0 + D_i)]; \end{aligned} \quad (3.49)$$

Если износ производится равномерно, то в соответствии с условием (3.35) получим из (3.49) следующую формулу при равномерном износе:

$$\begin{aligned} \Delta D &= D_0 - D'_0 = D_i = D'_i; \\ \Delta V &= \Delta D \left[\frac{\pi b}{4} (D_0 + D'_0) + \frac{\pi b}{12} (D_i + D'_i) \right]. \end{aligned} \quad (3.50)$$

Если поверхность цилиндрическая, то должно выполняться условие:

$$D_0 = D_{\pm i} = D_{\pm N/2}.$$

Когда износ поверхности происходит равномерно, то выполняется условие: $D'_0 = D'_{\pm i} = D'_{\pm N/2}$.

Алгоритм определения объема изношенного материала рабочего валка

Перед процессом прокатки измеряют начальное значение диаметра рабочего валка в центре бочки D_0 и на концах бочки $z = \pm L/2$, где диаметр бочки равен $\pm D_i$. Однако в процессе прокатки активной зоной валка будет являться часть боковой поверхности валка на расстоянии полуширины полосы прокатки $z = \pm b'/2$ от точки «0» – центра бочки рабочего валка.

Износ валка в этом случае осуществляется только в центральной части. Первоначально необходимо определить диаметры валка в точках $\pm i$, которые отстоят от центра бочки валка «0» на расстоянии полуширины полосы $z = \pm b/2$. Для этого, используя значения $D_0; D_{\pm N/2}$, находят уравнение меридианы или, в данном случае, эллипса, для которого можно записать уравнения, вида:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \text{ или } \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

Для решения данных уравнений необходимо определить коэффициенты a и c . В точке $z = 0; y = x = \pm D_{0/2}$, откуда $a = \pm \frac{D_0}{2}; a^2 = \pm \frac{D_0^2}{4}$.

Рассмотрим значение x на концах бочки валка, когда $z = \pm L/2$. Пусть $z = \pm L/2; x = y = \pm D_{N/2/2}; x^2 = y^2 = \pm D_{N/2/2}^2$. В уравнение эллипса определим неизвестную c :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D_{N/2}^2 \cdot 4}{4 \cdot D_0^2} + \frac{L^2}{4c^2} = 1; \\ \frac{L^2}{4c^2} = 1 - \frac{D_{N/2}^2}{D_0^2} = \frac{D_0^2 - D_{N/2}^2}{D_0^2}; \\ c = \pm \frac{D \cdot L}{2 \sqrt{D_0^2 - D_{N/2}^2}}. \end{array} \right. \quad (3.51)$$

Уравнение эллипса:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{4x^2}{D_0^2} + \frac{4z^2(D_0^2 - D_{N/2}^2)}{D_0^2 \cdot L^2} = 1; \\ \text{или} \\ \frac{4y^2}{D_0^2} + \frac{4z^2(D_0^2 - D_{N/2}^2)}{D_0^2 \cdot L^2} = 1. \end{array} \right. \quad (3.52)$$

Подставим в полученное уравнение эллипса значение $z = \pm b/2$ (полуширина полосы). В этой точке $x = y = D_{i/2}$.

Определим величину диаметра D_i до начала процесса прокатки, когда износ отсутствует.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{4D_i^2}{D_0^2} + \frac{4 \cdot b^2 \cdot (D_0^2 - D_{N/2}^2)}{4 \cdot D_0^2 \cdot L^2} = 1; \\ D_i^2 = D_0^2 - \frac{b^2}{L^2} (D_0^2 - D_{N/2}^2). \end{array} \right.$$

Введем коэффициент N_D и получим равенство:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_D = \frac{D_{N/2}}{D_0}; \\ D_i^2 = D_0^2 - \frac{b^2}{L^2} (1 - N_D^2) \cdot D_0^2; \\ D_i^2 = \pm \frac{D_0}{L} \sqrt{L^2 - b^2(1 - N_D^2)}; \\ \text{где } N_D = \frac{DL/2}{D_0}. \end{array} \right. \quad (3.54)$$

После процесса прокатки полосы необходимо измерить диаметр бочки валка D_0' в центре и на расстоянии $z = \pm b/2$ от центра бочки валка на расстоянии полуширины полосы проката D_i' .

Рабочий валок имеет форму боковой поверхности в виде однополостного гиперболоида (рисунок 3.18).

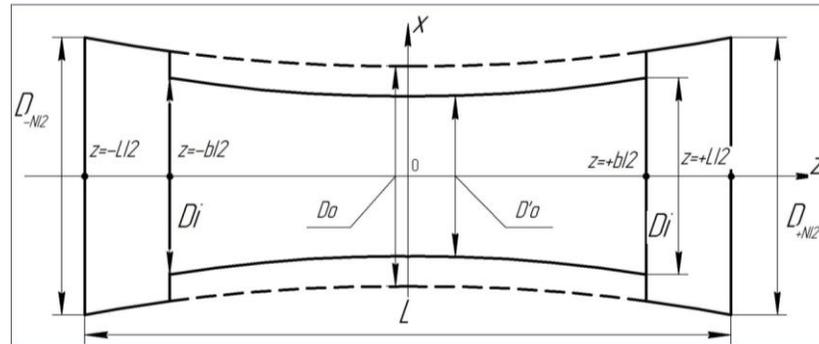


Рисунок 3.18 - Износ валка боковой (образующей) поверхности валка, имеющего форму однополостного гиперболоида

Уравнение меридианы для однополостного гиперболоида вращения имеет вид $\frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$ или $\frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$ в зависимости от выбора плоскости XOZ или YOZ. Рассмотрим плоскость XOZ. $\frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$. Определим коэффициенты a и c .

Уравнение однополостного гиперболоида вращения в системе координат xuz имеет вид:

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

Коэффициенты a и c меридианы бочки валка до начала процесса прокатки в отсутствии износа.

1) В точке $z = 0$; $x = y = \frac{D_0}{2}$.

$$\frac{x^2}{a^2} = 1; x^2 = a^2; a^2 = \frac{D_0^2}{4}; a = \frac{D_0}{2}.$$

$$z = 0; a = \pm \frac{D_0}{2}; a^2 = \frac{D_0^2}{4}.$$

2) В точке $z = \pm L/2$; $x = y = \pm D_{N/2}/2$.

$$\frac{D_{N/2}^2}{4D_0^2} + \frac{L^2}{4c^2} = 1;$$

$$\frac{D_{N/2}^2}{D_0^2} - 1 = \frac{L^2}{4c^2};$$

$$\frac{D_{N/2}^2 - D_0^2}{D_0^2} = \frac{L^2}{4c^2};$$

$$\frac{L^2}{4c^2} = \frac{D_0^2}{D_{N/2}^2 - D_0^2}; \quad c^2 = \frac{L^2 \cdot D_0^2}{4 \cdot (D_{N/2}^2 - D_0^2)};$$

$$c = \pm \frac{L \cdot D_0}{2\sqrt{D_{N/2}^2 - D_0^2}} = \frac{L}{2\sqrt{(N_D^2 - 1)}}, \text{ где } N_D = \frac{D_{N/2}}{D_0}, N_D > 1. c = \pm \frac{L}{2\sqrt{(N_D^2 - 1)}}.$$

Уравнение меридианы бочки рабочего валка, которая имеет форму гиперболы до износа:

$$\frac{4x^2}{D_0^2} - \frac{z^2 \cdot 4(D_{N/2}^2 - D_0^2)}{L^2 \cdot D_0^2} = 1;$$

$$\frac{4y^2}{D_0^2} - \frac{z^2 \cdot 4(D_{N/2}^2 - D_0^2)}{L \cdot D_0^2} = 1.$$

Уравнение боковой (образующей) поверхности валка:

$$\frac{x^2 + y^2}{D_0^2} - \frac{z^2 \cdot (N_D^2 - 1)}{L^2} = \frac{1}{4},$$

где: $N_D = \frac{D_{N/2}}{D_0}$.

Меридианы боковой (образующей) поверхности валка:

$$\frac{x^2}{D_0^2} - \frac{z^2(N_D^2 - 1)}{L^2} = \frac{1}{4}.$$

Перемещение x^2, y^2 в полученных уравнениях:

$$\frac{x^2}{D_0^2} = \frac{y^2}{D_0^2} = \frac{1}{4} + \frac{z^2(N_D^2 - 1)}{L^2} = \frac{L^2 + 4z^2(N_D^2 - 1)}{4L^2};$$

$$x^2 = y^2 = \frac{D_0^2[L^2 + 4z^2(N_D^2 - 1)]}{4L^2}.$$

В процессе прокатки полосы износ рабочего валка может происходить как равномерно по меридиану, так и неравномерно в зависимости от распределения усилия обжатия по ширине b . В результате износ валка производится только по ширине полосы b в центре длины бочки валка или на расстоянии $\pm b/2$ от точки «0» – центра бочки. После прокатки меридиана зона износа, где $-\frac{b}{2} < z < +\frac{b}{2}$, может иметь формулу гиперболы такой же кривизны при равномерном износе или другой кривизны, при неравномерном износе, или форму прямой линии, параллельной оси OZ, или форму эллипса.

После прокатки меридиана зоны износа представляет собой гиперболу. Возможны два случая, когда $D_0 - D'_0 = D_i - D'_i$ – равномерный износ и $D_0 - D'_0 \neq D_i - D'_i$ – неравномерный износ.

Пусть уравнение меридианы после износа представляет собой гиперболу с параметрами D'_0 и D'_i , где D'_0 - диаметр рабочего валка в центре «0», D'_i - диаметр валка на расстояниях $z = \pm b/2$ от центра «0».

Определим значения диаметра рабочего валка до износа D_i на расстояниях $\pm b/2$ от центра валка «0». Воспользуемся уравнением гиперболы при $z^2 = b^2/4$.

$$x^2 = y^2 = \frac{D_i^2}{4} = \frac{D_0^2[L^2 + 4b^2/4 \cdot (N_D^2 - 1)]}{4L^2} = \frac{D_0^2[L^2 + b^2 \cdot (N_D^2 - 1)]}{4L^2};$$

$$D_i^2 = \frac{D_0^2[L^2 + b^2 \cdot (N_D^2 - 1)]}{L^2};$$

$$D_i^2 = \frac{D_0}{L} \sqrt{L^2 + b^2 \cdot (N_D^2 - 1)}.$$

Уравнение меридианы после прокатки $\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$.

Коэффициенты a' и c' .

При $z = 0$; $x'^2 = \frac{(D'_0)^2}{4}$; $(a')^2 = \frac{D_0^2}{4}$; $a' = \frac{D_0}{2}$.

При $z = b/2$; $(x')^2 = \frac{(D'_i)^2}{4}$

$$\frac{4(D'_i)^2}{D_0^2 4} - \frac{b^2}{4c'^2} = 1;$$

$$\frac{(D'_i)^2}{D_0^2} - 1 = \frac{b^2}{4c'^2}; \rightarrow \frac{(D'_i)^2 - (D'_0)^2}{(D'_0)^2} = \frac{b^2}{4c'^2};$$

$$\frac{4c'^2}{b^2} = \frac{(D'_0)^2}{(D'_i)^2 - (D'_0)^2}; \rightarrow c'^2 = \frac{b^2 \cdot (D'_0)^2}{4[(D'_i)^2 - (D'_0)^2]}.$$

Уравнение меридианы зоны износа после прокатки имеет вид:

$$\frac{4 \cdot x'^2}{D_0'^2} - \frac{z^2 \cdot 4[(D'_i)^2 - (D'_0)^2]}{b^2 D_0'^2} = 1.$$

Обозначим $\frac{D'_i}{D'_0} = N'_{Di}$, тогда $\frac{x'^2}{D_0'^2} - \frac{z^2 \cdot (N'_{Di} - 1)}{b^2} = \frac{1}{4}$.

Выразим $(x')^2$:

$$\frac{(x')^2}{D_0'^2} = \frac{1}{4} + \frac{(N_{Di}'^2 - 1)z^2}{b^2},$$

получим

$$(x')^2 = \frac{b^2 D_0'^2 + 4 D_0'^2 \cdot (N_{Di}'^2 - 1)z^2}{4b^2} = \frac{D_0'^2 [b^2 + 4 \cdot (N_{Di}'^2 - 1)z^2]}{4b^2}.$$

Уравнение $(x)^2$ имеет вид:

$$x^2 = \frac{D_0^2 [L^2 + 4(N_D^2 - 1) \cdot z^2]}{4L^2}.$$

Объем износа боковой (образующей) поверхности валка ΔV , который произошел в результате прокатки.

$$\begin{aligned} \Delta V &= V - V' = 2\pi \int_0^{b/2} [x^2 - x'^2] dz; \\ \Delta V &= 2\pi \int_0^{b/2} \frac{[L^2 + 4(N_D^2 - 1) \cdot z^2]}{4L^2} - 2\pi \int_0^{b/2} dz \frac{D_0'^2 [b^2 + 4(N_{Di}'^2 - 1) \cdot z^2]}{4b^2} dz; \\ \Delta V &= 2\pi \int_0^{b/2} dz \left(\frac{D_0^2 L^2}{4L^2} - \frac{D_0'^2 b^2}{4b^2} \right) + \\ &+ 2\pi \int_0^{b/2} \left[\frac{D_0^2 \cdot 4(N_D^2 - 1)}{4L^2} - \frac{D_0'^2 \cdot 4(N_{Di}'^2 - 1)}{4b^2} \right] z^2 dz. \end{aligned}$$

После решения уравнения с последующим преобразованием, получим выражения для определения объема

$$\Delta V = \frac{\pi \cdot b}{4} (D_0^2 - D_0'^2) \cdot (D_0^2 + D_0'^2) + \frac{\pi \cdot b}{12} \left[\frac{b^2}{L^2} D_0^2 (N_D^2 - 1) - D_0'^2 (N_{Di}'^2 - 1) \right],$$

где $N_D = \frac{D_{N/2}}{D_0}$, $N_{Di}' = \frac{D_i'}{D_0'}$.

Окончательное выражение:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{\pi \cdot b}{12} \cdot [3(D_0 - D_0') \cdot (D_0 + D_0')] + \\ &+ \left[\frac{b^2}{L^2} (D_{L/2} - D_0) \times (D_{L/2} + D_0) - (D_{b/2}' - D_0') \times (D_{b/2}' + D_0') \right]. \end{aligned} \quad (3.55)$$

Полученную формулу (3.55) рекомендовано использовать в случае равномерного износа: $\Delta D_0 = \Delta D_i$ и неравномерного износа: $\Delta D_0 \neq \Delta D_i$. Однако

должно выполняться условие сохранения меридианы как гиперболы $D'_0 < D'_{b/2} = D'_{-b/2}$ в зоне износа рабочего валка.

Таким образом, по результатам разработанного алгоритма можно сделать следующие выводы.

Предложен и реализован алгоритм, позволяющий аналитически определять объем изношенной поверхности рабочего валка, и учитывающий различные формы профилировок рабочих валков: цилиндрическую, выпуклую и вогнутую.

1. Для определения объема изношенного материала рабочих валков получены аналитические зависимости, отличающиеся от известных подходов тем, что позволяют определять объем изношенного материала путем замера только по двум контрольным точкам: диаметр бочки валка в центре (D_0) и диаметру бочки валка на расстоянии $z=\pm b/2$.

2. Предложенный алгоритм позволяет учитывать влияние равномерного и неравномерного износа бочки рабочего валка.

Численная реализация предложенного алгоритма определения величины износа рабочих валков

Для численной реализации предложенного алгоритма был реализован промышленный эксперимент на стане 2000 горячей прокатки ПАО «ММК». Исследовалось влияние режимов подачи СМ для первых трех клетях (клетки №№ 7-9) стана, на которых установлена система подачи жидких СМ.

При реализации эксперимента выбирались однородные монтажные партии, соответствующие разным группам выкатываемости (σ_i , МПа). Для выбранного монтажа был определен режим подачи СМ, соответствующий выданным рекомендациям (см. п. 2.3.). После прокатки и вывалки рабочих валков производились соответствующие измерения линейных размеров при помощи прибора профилометра («пассометр»). Было обработано более 150

рабочих валков. Полученные расчетные данные систематизированы и сведены в таблицу 3.13 [189,190].

Таблица 3.13 - Значения объема изношенного материала рабочих валков с применением СМ и без применения СМ

Клетки	Положение валка	$\sum_{n=1}^5 \Delta V_n \rho / n$, кг с подачи СМ	$\sum_{n=1}^5 \Delta V_n \rho / n$, кг без подачи СМ	%
Режим 1. Расход СМ=0,09-0,24•10⁶ мм³/мин				
7-ая клетка	Верхний	1,33	1,43	6,99
	Нижний	1,24	1,35	8,15
8-ая клетка	Верхний	1,45	1,52	4,61
	Нижний	1,27	1,47	13,61
9-ая клетка	Верхний	2,35	2,80	16,07
	Нижний	2,75	3,20	14,06
Режим 2. Расход СМ=0,12-0,20•10⁶ мм³/мин				
7-ая клетка	Верхний	1,09	1,23	11,06
	Нижний	1,15	1,25	8,00
8-ая клетка	Верхний	1,42	1,52	6,38
	Нижний	1,62	1,92	15,63
9-ая клетка	Верхний	2,12	2,50	15,20
	Нижний	2,35	2,80	16,07
Режим 3. Расход СМ=0,05-0,13•10⁶ мм³/мин				
7-ая клетка	Верхний	0,99	1,03	3,88
	Нижний	1,68	1,80	6,67
8-ая клетка	Верхний	1,65	1,90	13,16
	Нижний	1,79	2,02	11,39
9-ая клетка	Верхний	2,25	2,70	16,67
	Нижний	1,89	2,29	17,47
Режим 4. Расход СМ=0,04-0,12•10⁶ мм³/мин				
7-ая клетка	Верхний	1,85	2,01	7,91
	Нижний	1,90	2,05	7,32
8-ая клетка	Верхний	1,86	2,02	7,92
	Нижний	2,22	2,62	15,27
9-ая клетка	Верхний	1,82	2,19	16,89
	Нижний	1,87	2,20	15,00
Режим 5. Расход СМ=0,03-0,12•10⁶ мм³/мин				
7-ая клетка	Верхний	2,17	2,37	8,44
	Нижний	2,69	2,89	6,92
8-ая клетка	Верхний	2,22	2,92	23,97
	Нижний	2,15	2,42	11,16
9-ая клетка	Верхний	3,00	3,50	14,29
	Нижний	3,30	3,90	15,38
Примечание: ρ -плотность металла валка, кг/м ³ ; n-число экспериментальных замеров профиля рабочего валка				

Анализ полученных результатов показывает, что применение СМ оказывает положительное влияние на снижение износа рабочих валков чистовой группы клетей стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК». В зависимости от режимов подачи СМ снижение составляет 3,88...16,67% [191,192,193,194,195].

Объем изношенного материала (ΔV) рабочего валка является относительным параметром, поскольку не учитывает характер нагружения и режим работы валков в процессе прокатки. Критерием оценки влияния СМ на снижение износа рабочих валков является энергетический показатель изнашивания ($J^{\text{эн}}$), характеризующий отношение объема изношенного материала (ΔV , мм³) к работе на преодоление сил трения ($A_{\text{тр}}$, Дж):

$$J^{\text{эн}} = \Delta V / A_{\text{тр}} \quad (56)$$

Определение показателя изнашивания ($J^{\text{эн}}$) рабочих валков листового стана горячей прокатки

Поскольку показатель изнашивания ($J^{\text{эн}}$) определяется с учетом времени эксплуатации рабочего валка, в течение которого он потерял этот изношенный объем, в литературе его называют энергетическим показателем изнашивания. Определение энергетического показателя изнашивания производится по результатам экспериментальных данных (из систем цехового учета данных), которые помимо измеренных линейных размеров рабочих валков, включали также технологические режимы прокатки.

Величина энергетического показателя изнашивания для рабочего валка была определена, согласно выражению:

$$J^{\text{эн}} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \frac{\Delta V_i}{A_{\text{тр}i}} \quad (3.57)$$

где $i=1-5$ – номер рабочего валка одного типоразмера.

Работа на преодоление сил трения, Дж:

$$A_{\text{тр } ij} = \sum F_{\text{тр } ij} \cdot L_{\text{тр } ij}, \quad (3.58)$$

$$\sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=7} F_{\text{тр}} = F_{\text{тр}}^{p-o} + F_{\text{тр}}^{p-п}, \quad (3.59)$$

де $F_{\text{тр } ij}$ – суммарная сила трения в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса», Н;

$F_{\text{тр } ij}^{p-o}$ – сила трения для системы «опорный валок – рабочий валок», Н;

$F_{\text{тр } ij}^{p-п}$ – сила трения для системы «рабочий валок – полоса», Н;

$L_{\text{тр } ij}$ – путь трения, под которым понимается расстояние, пройденное в каждой точке поверхности j -ого валка в рамках одного монтажа, м.

Фрикционные параметры для системы «рабочий валок – опорный валок» определяли по методики В.П. Полухина [27], согласно которой силы трения в контакте «рабочий валок – опорный валок» можно определить:

$$F_{\text{тр}}^{p-o} = \frac{M_{\text{пр}}^{p-o}}{R_{on}} = \frac{M_{\text{дв}} - M_{\text{пр}} - M_{\text{xx}} - M_{\text{пр.п}}}{R_{on}}. \quad (3.60)$$

Момент прокатки ($M_{\text{пр}}$), необходимый для вращения валков, равен [75]:

$$M_{\text{пр}} = 2P \times \psi \times l_d, \quad (3.61)$$

P_1 – сила, действующая на валки (усилие прокатки), Н

$\psi = a / l_d$ – коэффициент плеча приложения равнодействующей P ;

l_d – длина дуги очага деформации, мм;

$M_{\text{пр}}$ – момент прокатки, Н×м.

Для определения силы трения для системы «рабочий валок – полоса» ($F_{\text{тр } ij}^{p-п}$ Н), входящей в выражение (3.58), использовали известный подход проф. Э.А. Гарбера, основанный на упруго-пластической модели очага деформации [76,116,118].

Неизвестную величину коэффициента (ψ), входящего в выражение (3.61), определили с помощью регрессионного анализа экспериментальных данных. Полученное уравнение (3.61) позволяет определять параметр ψ для условий горячей прокатки чистовой группы клетей (№№7-9) как с отсутствием, так и с применением СМ. Расчет исследуемых параметров был реализован в программе «Математическое моделирование процесса изнашивания и прогнозирование срока службы рабочих валков клетки кварто при подаче СМ в условиях НШСГП» [196]. Для каждой из клетей определены соответствующие коэффициенты, приведенные в таблице 3.14.

$$\Psi_{i,j} = b_1 - a_1 \times P_i - a_2 \times Z_{см(0;1)} + a_3 \times p_{ср_i} - a_3 \times h_{н_i} + a_5 \times \Delta h_i - a_6 \times l_{\partial_i} - a_7 \times R_{раб_i} + a_8 \times \sigma_i + a_9 \times v_i; (R^2 = 0,86; F_{0,95}^{расч} = 1456 \geq F^{табл} = 3,94), \quad (3.62)$$

где P - усилие прокатки, МН; $Z_{см}$ - коэффициент СМ: 1 - наличие, 0 - отсутствие; $p_{ср}$ - среднее контактное напряжение, МПа; $h_{н}$ - толщина полосы в нейтральном сечении, мм; Δh - абсолютное обжатие, мм; l_{∂} - длина дуги очага деформации, мм; $R_{раб}$ - радиус рабочего валка, мм; σ - сопротивление деформации, МПа; v - скорость прокатки, м/с. Коэффициенты a_1 - a_9 , полученные по результатам статической обработки и зависящие от режимов прокатки, приведены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 - Численное значение коэффициентов, входящих в регрессионное уравнение коэффициента плеча ψ для первых трех клетей (клетки №№7-9) стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК», при различных режимах подачи СМ.

Коэффициенты	b_1	$a_{1 \times 10^{-2}}$	$a_{2 \times 10^{-3}}$	$a_{3 \times 10^{-3}}$	$a_{4 \times 10^{-2}}$	$a_{5 \times 10^{-2}}$	$a_{6 \times 10^{-2}}$	$a_{7 \times 10^{-1}}$	$a_{8 \times 10^{-2}}$	$a_{9 \times 10^2}$	$F_{\text{табл}} [0,05;5] = 2,4.$
Режим 1. Расход СМ=0,09-0,24•10⁶ мм³/мин											
7-ая клеть	15	406	768	764	257	369	398	895	245	694	$F_p = 45,18$
8-ая клеть	12	394	567	324	253	789	455	130	892	215	$F_p = 55,37$
9-ая клеть	16	256	456	345	125	259	169	962	235	854	$F_p = 68,54$
Режим 2. Расход СМ=0,12-0,20•10⁶ мм³/мин											
7-ая клеть	32	345	435	465	698	166	125	569	816	369	$F_p = 32,25$
8-ая клеть	43	456	546	815	163	188	159	136	155	694	$F_p = 58,598$
9-ая клеть	15	786	865	356	138	196	785	126	123	158	$F_p = 98,45$
Режим 3. Расход СМ=0,05-0,13•10⁶ мм³/мин											
7-ая клеть	16	638	754	871	132	248	695	638	348	456	$F_p = 69,45$
8-ая клеть	26	976	567	345	258	365	298	819	918	354	$F_p = 45,39$
9-ая клеть	34	889	245	688	789	754	894	210	245	503	$F_p = 49,58$
Режим 4. Расход СМ=0,04-0,12•10⁶ мм³/мин											
7-ая клеть	17	993	258	324	264	456	458	356	692	369	$F_p = 96,67$
8-ая клеть	35	456	364	985	329	169	369	320	360	927	$F_p = 36,98$
9-ая клеть	65	567	28	568	751	445	222	532	529	681	$F_p = 45,69$
Режим 5. Расход СМ=0,03-0,12•10⁶ мм³/мин											
7-ая клеть	34	764	159	167	658	789	125	320	238	965	$F_p = 25,98$
8-ая клеть	64	865	351	156	148	665	888	106	132	820	$F_p = 48,96$
9-ая клеть	32	976	354	156	169	182	269	860	690	351	$F_p = 74,21$

В результате проведенных исследований получены численные значения энергетического показателя изнашивания ($J_{0,1}^{\text{ЭН}}$) для чистой группы клетей стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК» в зависимости от режимов подачи СМ: с применением СМ с различным расходом и без подачи СМ. Результаты исследований приведены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 - Расчётные значения энергетического показателя изнашивания

№ клетки	Положение валка	$J_0^{ЭН} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot 10^{-9}$ без подачи СМ	$J_1^{ЭН} \text{ мм}^3/\text{Нм}\cdot 10^{-9}$ с подачей СМ
Режим 1. Расход СМ=0,09-0,24•10⁶ мм³/мин			
7-ая клетка	верхний	6,35...6,37	5,17...5,19
	нижний	6,52...6,54	5,19...5,12
8-ая клетка	верхний	5,31...5,32	3,74...3,79
	нижний	4,55...4,57	3,87...3,89
9-ая клетка	верхний	6,24...6,25	4,02...4,08
	нижний	5,42...5,44	5,15...5,16
Режим 2. Расход СМ=0,12-0,20•10⁶ мм³/мин			
7-ая клетка	верхний	5,55...5,56	3,88...3,91
	нижний	5,54...5,55	3,79...3,85
8-ая клетка	верхний	5,31...5,33	3,94...3,99
	нижний	4,18...4,21	3,92...3,95
9-ая клетка	верхний	6,01...6,06	3,98...3,99
	нижний	6,83...6,89	5,67...5,69
Режим 3. Расход СМ=0,05-0,13•10⁶ мм³/мин			
7-ая клетка	верхний	5,06...5,08	3,93...3,93
	нижний	5,12...5,15	3,48...3,50
8-ая клетка	верхний	5,04...5,09	3,95...3,99
	нижний	3,89...3,92	3,87...3,89
9-ая клетка	верхний	5,87...5,89	3,51...3,55
	нижний	5,34...5,39	5,34...5,37
Режим 4. Расход СМ=0,04-0,12•10⁶ мм³/мин			
7-ая клетка	верхний	5,45...5,49	3,78...3,79
	нижний	5,89...5,91	3,48...3,50
8-ая клетка	верхний	4,97...4,99	3,82...3,85
	нижний	4,12...4,15	3,87...3,89
9-ая клетка	верхний	5,56...5,60	3,98...4,01
	нижний	6,97...6,99	5,32...5,35
Режим 5. Расход СМ=0,03-0,12•10⁶ мм³/мин			
7-ая клетка	верхний	4,43...4,45	3,78...3,79
	нижний	4,15...4,17	3,75...3,77
8-ая клетка	верхний	5,32...5,35	4,90...4,93
	нижний	5,89...5,91	4,55...4,57
9-ая клетка	верхний	5,45...5,47	4,45...4,46
	нижний	6,13...6,18	4,97...4,99

Выводы по результатам моделирования.

Определение показателей эффективности $J^{эф}$, $M_{пр}^{эф}$.

1. Для системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» разработана и численно реализована математическая модель процесса изнашивания рабочих валков.

2. Экспериментально-аналитическим путем определены показатели интенсивности изнашивания рабочих валков при отсутствии СМ: $J_0^{эн}=(4,18...6,13 \times 10^{-9})$ мм³/Нм, и при его применении $J_1^{эн}=(3,48...4,12 \times 10^{-9})$ мм³/Нм.

3. На основе промышленных исследований определены предложенные показатели эффективности (\mathcal{E}_i), описывающие применение жидких СМ: $M_{np(i,j)}^{эф}$ и $J_{раб(i,j)}^{эф.пром}$. Полученные результаты систематизированы и приведены в таблице

3.16. Анализ результатов показывает, что при использовании СМ обеспечивается снижение параметра $M_{пр}$ (Н*м) на 6...15% и снижение интенсивности изнашивания рабочих валков в среднем на 15...18 %.

Таблица 3.16 - Расчетное значение показателя эффективности (\mathcal{E}), полученного на основе промышленных исследований

Непрерывная чистовая группа клетей	Показатели эффективности (\mathcal{E}_i), полученные на основе промышленных исследований		
	Момент прокатки		Показатель изнашивания
	$M_{np(i,j)} \times 10^6$	$M_{np(i,j)}^{эф} = \frac{M_{np(i,j)}^0}{M_{np(i,j)}^1}$	$J_{раб(i,j)}^{эф.пром} = \frac{J_{раб(i,j)}^0}{J_{раб(i,j)}^1}$
Режим 1. Расход СМ=0,09-0,24•10⁶ мм³/мин			
7-ая клеть	$\frac{1,22...1,25}{1,20...1,24}$	1,08..1,12	1,17...1,17
8-ая клеть	$\frac{1,27...1,30}{1,21...1,25}$	1,07..1,13	1,33...1,33
9-ая клеть	$\frac{1,33...1,39}{1,25...1,29}$	1,06..1,14	1,57...1,57

Непрерывная чистовая группа клетей	Показатели эффективности (Ξ_i), полученные на основе промышленных исследований		
	Момент прокатки		Показатель изнашивания
	$M_{np(i,j)} \times 10^6$	$M_{np(i,j)}^{эф} = \frac{M_{np(i,j)}^0}{M_{np(i,j)}^1}$	$J_{раб(i,j)}^{эф.пром} = \frac{J_{раб(i,j)}^0}{J_{раб(i,j)}^1}$
Режим 2. Расход СМ=0,12-0,20•10⁶ мм³/мин			
7-ая клеть	$\frac{1,25...1,29}{1,23...1,26}$	1,07...1,11	1,03...1,03
8-ая клеть	$\frac{1,28...1,31}{1,20...1,24}$	1,06...1,12	1,51...1,51
9-ая клеть	$\frac{1,30...1,33}{1,23...1,29}$	1,06...1,12	1,20...1,20
Режим 3. Расход СМ=0,05-0,13•10⁶ мм³/мин			
7-ая клеть	$\frac{1,31...1,33}{1,24...1,28}$	1,05...1,10	1,43...1,43
8-ая клеть	$\frac{1,31...1,32}{1,20...1,22}$	1,07...1,13	1,46...1,46
9-ая клеть	$\frac{1,29...1,31}{1,22...1,24}$	1,05...1,14	1,35...1,35
Режим 4. Расход СМ=0,04-0,12•10⁶ мм³/мин			
7-ая клеть	$\frac{1,27...1,32}{1,22...1,26}$	1,08...1,11	1,29...1,29
8-ая клеть	$\frac{1,31...1,33}{1,23...1,27}$	1,08...1,11	1,47...1,47
9-ая клеть	$\frac{1,32...1,35}{1,27...1,23}$	1,09...1,13	1,28...1,28
Режим 5. Расход СМ=0,03-0,12•10⁶ мм³/мин			
7-ая клеть	$\frac{1,31...1,34}{1,21...1,26}$	1,11...1,13	1,44...1,44
8-ая клеть	$\frac{1,26...1,30}{1,20...1,23}$	1,09...1,14	1,69...1,69
9-ая клеть	$\frac{1,29...1,31}{1,22...1,24}$	1,09...1,15	1,30...1,30
Примечание:			
- в числителе приведены данные результатов лабораторных экспериментов с учетом определенного коэффициента подобия;			
- в знаменателе данные рассчитанные по результатам промышленного эксперимента согласно работам [161], согласно методике [56]			

3.4 Методология комплексного функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» и совершенствование технологии для смазывания валков листовых станов горячей прокатки

Теоретические, экспериментальные и промышленные исследования, а также лабораторное моделирование процессов контактного взаимодействия для системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» позволили разработать методологию (рисунок 3.19), реализация которой направлена на разработку и внедрение эффективных режимов подачи СМ при листовой горячей прокатке.

Методология реализуется как комплекс эффективных технических и технологических методов и средств, направленных на развитие технологии и совершенствование оборудования, обеспечивающих получение продукции заданного уровня свойств при одновременном снижении ресурсоёмкости при производстве ЛПП.

В основу построения и реализации методологии заложен комплексный подход, основанный на последовательном проведении компьютерного моделирования, а также апробации результатов на лабораторном стенде «Машина трения» для условия применения технологии подачи жидких СМ.

С целью снижения ресурсоёмкости при производстве листового горячекатаного проката предложена методология, позволяющая на различных этапах исследования, с учетом предложенных критериев (Ξ_i), назначать эффективные режимы подачи СМ.

Использование предложенной методики позволяет уменьшить энергозатраты (токовые нагрузки главных приводов) на 7...10% и снизить износ рабочих валков в 1,10...1,15 раза [197,198,199,200,201,202,203]. Результаты исследования систематизированы и приведены в таблице 3.17.



Рисунок 3.19 - Методология исследования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» при применении технологии подачи СМ в четырехвалковых клетях «кварто»

Таблица 3.17 - Рассчитанные относительные показатели эффективности (Θ_i)

Непрерывная чистовая группа клетей	Показатели эффективности (Θ_i), полученные на основе исследований					
	лабораторных				Промышленных	
	Момент		Износ		Изнашивание	Сила тока
	Трения	Прокатки	$\Theta = \frac{J_{\text{раб}(i,j)}^0}{J_{\text{раб}(i,j)}^1}$	$\Theta = \frac{J_{\text{оп}(i,j)}^0}{J_{\text{оп}(i,j)}^1}$	$J_{\text{раб}(i,j)}^{\text{эф.пром}}$	$I_{(i,j)}^{\text{эф.пром}}$
	$M_{\text{тр}(i,j)}^{\text{эф}(оп-раб)}$	$M_{\text{пр}(i,j)}^{\text{эф}}$				
Режим 1. Расход $CM=0,09-0,24 \cdot 10^6$ мм³/мин						
7-ая клеть	1,07...1,11	1,08...1,12	1,03...1,06	1,06...1,09	1,17...1,17	1,08...1,12
8-ая клеть	1,06...1,12	1,07...1,13	1,05...1,08	1,05...1,12	1,33...1,33	1,06...1,11
9-ая клеть	1,06...1,12	1,06...1,14	1,09...1,11	1,10...1,15	1,57...1,57	1,08...1,13
Режим 2. Расход $CM=0,12-0,20 \cdot 10^6$ мм³/мин						
7-ая клеть	1,05...1,10	1,07...1,11	1,04...1,08	1,05...1,09	1,03...1,03	1,07...1,11
8-ая клеть	1,07...1,13	1,06...1,12	1,08...1,10	1,06...1,12	1,51...1,51	1,06...1,12
9-ая клеть	1,05...1,14	1,06...1,12	1,09...1,12	1,09...1,12	1,20...1,20	1,08...1,12
Режим 3. Расход $CM=0,05-0,13 \cdot 10^6$ мм³/мин						
7-ая клеть	1,08...1,11	1,05...1,10	1,02...1,09	1,06...1,09	1,43...1,43	1,08...1,11
8-ая клеть	1,08...1,11	1,07...1,13	1,07...1,09	1,06...1,11	1,46...1,46	1,07...1,12
9-ая клеть	1,09...1,13	1,05...1,14	1,07...1,10	1,07...1,12	1,35...1,35	1,07...1,13
Режим 4. Расход $CM=0,04-0,12 \cdot 10^6$ мм³/мин						
7-ая клеть	1,11...1,13	1,08...1,11	1,06...1,08	1,02...1,09	1,29...1,29	1,08...1,12
8-ая клеть	1,09...1,14	1,08...1,11	1,07...1,08	1,06...1,10	1,47...1,47	1,06...1,11
9-ая клеть	1,09...1,15	1,09...1,13	1,07...1,11	1,07...1,13	1,28...1,28	1,08...1,13
Режим 5. Расход $CM=0,03-0,12 \cdot 10^6$ мм³/мин						
7-ая клеть	1,09...1,12	1,11...1,13	1,05...1,07	1,08...1,89	1,44...1,44	1,07...1,11
8-ая клеть	1,08...1,11	1,09...1,14	1,06...1,09	1,08...1,11	1,69...1,69	1,06...1,12
9-ая клеть	1,08...1,13	1,09...1,15	1,08...1,10	1,09...1,12	1,30...1,30	1,07...1,12

Выводы по третьей главе

1. Предложены методы оценки эффективности применения СМ в технологии листовой горячей прокатки в виде показателей эффективности $\varepsilon_i = \frac{\Pi_i^0}{\Pi_i^1}$. Определены параметры для оценки показателей эффективности: момент трения ($M_{\text{тр}}^{\text{эф}}$), момент прокатки ($M_{\text{пр}}^{\text{эф}}$), износ (U), сила тока (I), показатель изнашивания ($J^{\text{эф}}$).

2. Для исследуемой системы «опорный валок – рабочий валок» с использованием методов физического и математического моделирования проведены лабораторные исследования влияния режимов подачи СМ.

3. С использованием теории планирования эксперимента, реализован полнофакторный эксперимент. Установлены аналитические зависимости, теоретически описывающие влияние СМ на снижение ресурсоёмкости при производстве ЛГП.

3. По результатам реализованного эксперимента определены оптимальные режимы подачи СМ, при которых наблюдается снижение износа валков в 1,15...1,25 раза: внешняя нагрузка $P = 350...500$ Н; угловая скорость $\omega = 850...950$ об/мин, расход СМ $Q = 0,11...0,45$ мм³/мин.

4. С учетом обоснованных оптимальных режимов смазывания, разработана и численно реализована математическая модель процесса изнашивания для систем «опорный валок – рабочий» и «рабочий валок – полоса». Проведена апробация математической модели 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. При расчете фрикционных параметров на контакте «рабочий валок – полоса», определен коэффициент плеча ψ . Для оценки коэффициента плеча ψ

был выполнен множественный регрессионный анализ. Получено регрессионное уравнение, позволяющее определять параметр ψ как с отсутствием СМ, так и с применением СМ для клеток чистой группы листового стана горячей прокатки.

6. Разработана методология функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса», как комплекс эффективных технических и технологических методов и средств, направленных на развитие технологии и совершенствование оборудования, и обеспечивающих получение продукции заданного уровня свойств при одновременном снижении ресурсоёмкости при производстве ЛГП.

7. Для технологии листовой горячей прокатки получены численные значения параметров оценки эффективности применения режимов подачи СМ: $M_{\text{тр}}^{\text{эф1}} = 1,08 \dots 1,13$; $M_{\text{пр}}^{\text{эф}} = 1,05 \dots 1,07$; $U^{\text{эф}} = 1,05 \dots 1,12$; $\Gamma^{\text{эф}} = 1,07 \dots 1,12$; $J^{\text{эф}} = 1,12 \dots 1,23$ раз.

8. Предложенная методология позволяет на различных этапах исследования, с учетом предложенных критериев (\mathcal{E}_i), назначать эффективные режимы подачи СМ. Эффективность режимов подачи СМ в системе «опорный валок – рабочий валок – полоса» обеспечивается при соблюдении следующих условий: $\mathcal{E}_i > 1$ и $\mathcal{E}_i \rightarrow \mathbf{max}$. Использование предложенной методики позволяет уменьшить энергозатраты (токовые нагрузки главных приводов) на 7...10% и снизить износ рабочих валков в 1,10...1,15 раза.

4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ «РАБОЧИЙ ВАЛОК – ПОЛОСА»

Особенностью современных листовых станов горячей прокатки является внедрение «форсированных» режимов работы, позволяющее увеличить объемы прокатываемого металла при одновременном ужесточении требований к качеству проката [30,34,39,73]. В связи с этим необходимо решать вопросы заданной эксплуатационной стойкости, контроля и регулирования теплового состояния формообразующего инструмента – рабочих валков. Несоблюдение теплового режима инструмента, валка, приводит к его локальному перегреву и преждевременному выходу его из работоспособного состояния с одновременной потерей качества производимой продукции [92,127,128].

Одним из путей решения проблемы является реализация комплексного научно-технического подхода, основанного на исследовании теплового состояния системы «рабочий валок – полоса» с применением методов математического моделирования. Практическим результатом таких исследований обычно являются разработанные и внедренные рекомендации, а также новые технические и технологические решения, направленные на стабилизацию теплового состояния рабочих валков и улучшение температурных условий их эксплуатации.

Для проведения исследований теплового состояния в системе «рабочий валок – полоса» в представленном разделе диссертации ставились и последовательно решались следующие научно-практические задачи.

1. Теоретическое и экспериментальное исследование основных закономерностей формирования температурных условий процесса листовой горячей прокатки одновременно учитывающие: теплообмен полосы с валками; объемное тепловыделение при пластической деформации полосы; изменение

теплового состояния полосы с учетом работы технологических систем: гидроудаления окалины, межклетевого охлаждения, а также принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации.

2. Для непрерывной черновой и чистовой групп клетей листовых станов горячей прокатки необходимо решить следующие практические задачи:

- разработать и численно реализовать математическую модель управления принудительным охлаждением рабочих валков и полосы;
- разработать рекомендации для управления и стабилизации теплового состояния рабочих валков.

Математическая модель управления принудительным охлаждением для системы «рабочий валок – полоса» включает в себя несколько взаимосвязанных расчетных блоков.

Блок 1: «Моделирование теплового состояния для элемента системы – полоса». Производится последовательное решение задачи определения теплового состояния прокатываемой заготовки с учетом технологических особенностей: 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.

Блок 2: «Расчет теплового состояния для элемента системы – рабочий валок», в котором производится определение основных теплофизических параметров для формоизменяющего инструмента (рабочий валок) с учетом системы принудительного охлаждения.

Блок 3: «Разработка принципов совершенствования оборудования и применения технологии эффективного охлаждения для системы «рабочий валок – полоса». В качестве выходных параметров математическая модель выдает рекомендации для управления и стабилизации теплового состояния рабочих

валков для непрерывной группы клетей (черновой или чистовой) листовых станов горячей прокатки, включающие в себя:

1. назначение расхода охладителя ($\text{м}^3/\text{ч}$) по длине бочки валка;
2. распределение охладителя по валкам клетей стана для каждого монтажа в отдельности с учетом технологических особенностей прокатываемого монтажа;
3. определение местоположения коллекторов охлаждения для достижения максимального эффекта теплосъема с рабочей поверхности валка;
4. рекомендации по выбору типа форсунок для коллекторов системы охлаждения.

4.1 Математическое моделирование теплового состояния прокатываемой полосы

Согласно многочисленным исследователям [131,132,136,137,138], математическое моделирование теплового состояния прокатываемой полосы основано на численном решении дифференциального уравнения теплопроводности (уравнения теплового состояния). Моделирование температурного поля прокатываемой заготовки основано на решении двумерной задачи теплопроводности (4.1). Расчетная схема для решения задачи приведена на рисунке 4.1.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.1)$$

Поскольку скорость перемещения прокатываемой заготовки больше скорости распространения тепла в рабочем валке [136], двумерная задача моделирования с целью упрощения решения сводится к одномерной:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.2)$$

где отношение $\frac{\lambda}{c\rho} = \alpha$ - коэффициент температуропроводности;

λ – коэффициент теплопроводности стали, Вт/м·°С;

c – удельная теплоёмкость стали, Дж/кг·°С;

ρ – плотность стали, кг/м³.

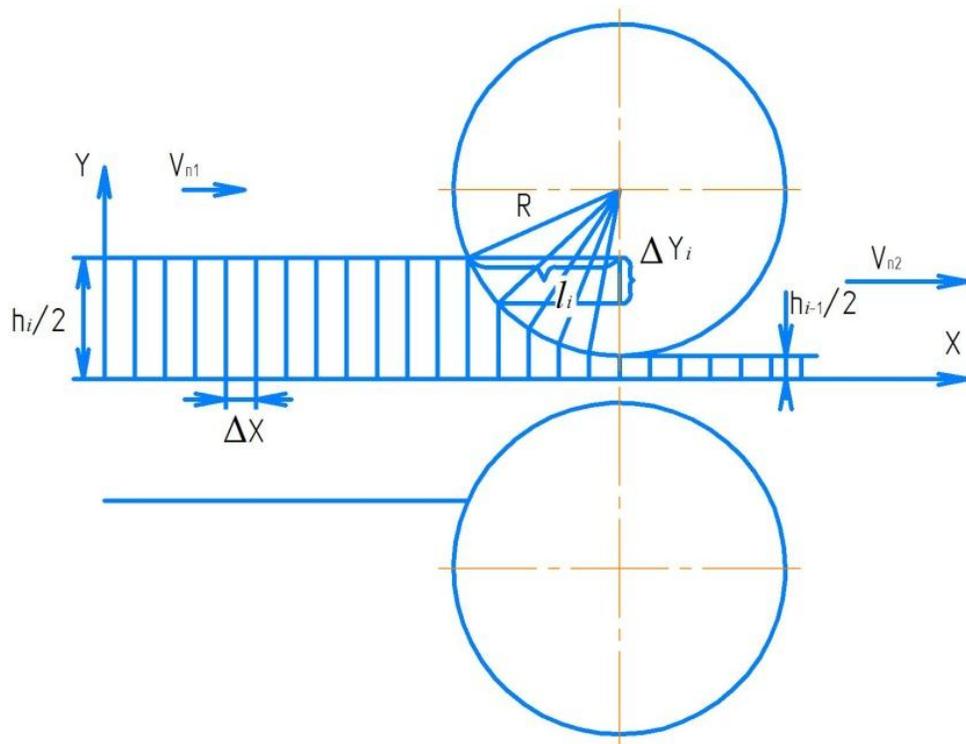


Рисунок 4.1 - Расчетная схема моделирования теплового состояния прокатываемой полосы

Считаем, что $v = \frac{\partial x}{\partial \tau}$, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$, запишем:

$$v \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4.3)$$

В работе будем учитывать, что в процессе деформации прокатываемая заготовка движется с ускорением. Поэтому каждый шаг Δx_i по координате x будет характеризоваться своей скоростью v_i , которую можно найти по формуле:

$$v_i = \frac{v_{i-1} h_{i-1}}{h_i}; \quad (4.4)$$

$$\Delta y_i = \sqrt{R^2 - (l_i - \Delta x)^2} - \sqrt{R^2 - l_i^2}; \quad (4.5)$$

$$l_i = \sqrt{R^2 - (R - \frac{1}{2} h_i (1 - \varepsilon))^2}, \quad (4.6)$$

где R – радиус рабочих валков, мм;

l – длина дуги очага деформации, мм;

ε – величина обжатия при прокатке i -полосы в j -ой клетки, определяется:

$$\varepsilon_{(i,j)} = \frac{h_{i-1}}{h_i}. \quad (4.7)$$

Для каждого из зон теплообмена прокатываемой полосы будем использовать следующие уравнения:

– при конвективном охлаждении воздуха, которое в зависимости от характера движения (ламинарного или турбулентного) определяется согласно расчетному значению числа Нуссельта [204,205]:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,33X^{-0,5} \text{Re}_{\text{ж}}^{0,5} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,33} (\text{Pr}/\text{Pr}_c)^{0,25}; \quad (4.8)$$

$$\text{Re}_{\text{кр}} = vX_{\text{кр}}/\nu = 5 \cdot 10^5;$$

– при теплообмене излучением [37,206,207]:

$$q_{(i)} = \varepsilon_q(T_n)\sigma[(T_n + 273)^4 - (T_g + 273)^4] \quad (4.9)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана;

T_a – температура окружающей среды (воздуха)

$\varepsilon(T_p)$ – коэффициент теплообмена излучением между полосой и окружающей средой (воздухом) для стали согласно работам [37,206,207] определяется:

$$\varepsilon(T_p) = 1,1 + \frac{T_p}{1000} \left(0,125 \frac{T_p}{1000} - 0,38 \right) \quad (4.9.1.)$$

– при повышении температуры за счет деформации полосы [37,208]:

$$\Delta T_{(i;j)} = \frac{\sigma_{s(i)} \ln \varepsilon_{(i;j)}}{\rho_i c_i}, \quad (4.10)$$

где $\sigma_{s(i)}$ – сопротивление деформации прокатываемой i -ой заготовки МПа. Для определения сопротивления деформации использовали формулу Л.В. Андреюка, с учетом значений температуры полосы в очаге деформации [86].

– при передаче тепла от полосы к рабочему валку (теплообмен в системе «полоса – валок»), в j -ой клетки, согласно работам [37,209]:

$$q_{(i;j)}^{П-В} = \frac{\lambda(T_{П} - T_{В})}{\sqrt{\pi a \tau}}, \quad (4.11)$$

где $T_{В}$ – максимальное значение температуры рабочего валка, принимается в центре бочки, $^{\circ}\text{C}$.

Для учета теплофизических свойств воздуха были использованы данные, описанные в работе [204,205]. Численные значения числа Рейнольдса, числа Прандтля, зависимости кинетической вязкости и теплопроводности от температуры оценивались с использованием данных работ [204,205].

4.1.1 Численная реализация математической модели и исследование теплового состояния прокатываемой полосы

Численная реализация математической модели теплового состояния прокатываемой полосы была реализована в программном коде в виде программы для ЭВМ, на которую было получено свидетельство о регистрации [210]. Программа написана на языке Delphi версии 7.0. В ходе выполнения программы автоматически создаются файлы Rez.txt, которые содержат результаты выполнения программы. Рабочее окно программы представлено на рисунке 4.2.

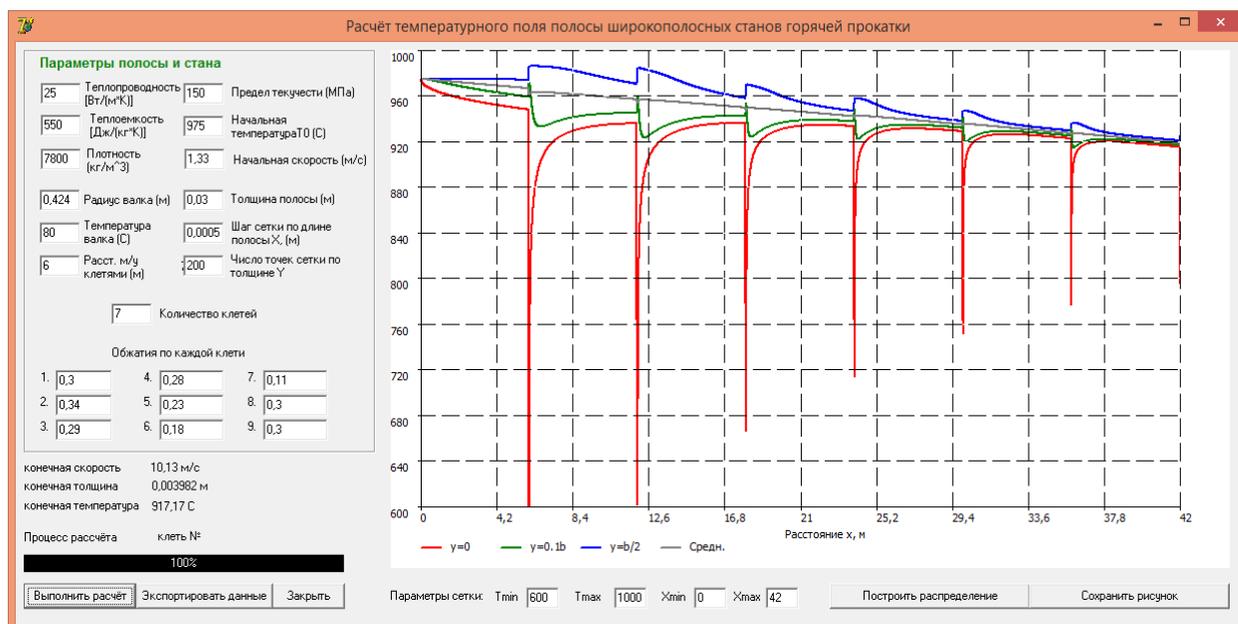


Рисунок 4.2 - Окно программы для реализации математической модели теплового состояния прокатываемой полосы

Разработанный программный продукт является универсальным и позволяет производить расчет и анализ теплового состояния полосы непрерывной группы клетей (черновой или чистовой) для листовых станов горячей прокатки.

Для расчета необходимо ввести параметры стана и полосы. К параметрам стана относятся: «Радиус валка», «Температура валка», «Расстояние между клетями», «Количество клетей» (максимальное количество клетей), «Обжатия по каждой j-ой клетки». К параметрам полосы относятся: теплофизические свойства («Теплопроводность», «Теплоемкость»), механические характеристики прокатываемой полосы («Предел текучести», «Плотность»), начальная температура, начальная скорость, толщина. Параметры «Шаг сетки по длине полосы X» и «Число точек по толщине Y» являются характеристиками расчетной сетки, уменьшение которых повышает точность математического расчета.

После заполнения всех необходимых полей при нажатии кнопки «Выполнить расчет» программа производит расчет и построение графика распределения температурного поля полосы. Результат расчета в виде графиков отображается в основном окне программы, представленном на рисунке 4.2.

Результаты расчетов позволяют построить графическое распределение температуры в направлении движения листа для контактной поверхности полосы ($y=0$ или $y=h$), а также по толщине полосы: на расстоянии 10% от поверхности ($y=0,1h$), 25% от поверхности ($y=0,25h$), 50% от поверхности ($y=0,5h$), а также среднее (среднеинтегральное) значение.

В работе проведено теоретическое исследование распределения температуры в прокатываемой полосе. В качестве объекта исследования был принят стан 2000 г.п. ПАО «ММК». Материал прокатываемой заготовки – сталь марки СтЗкп ГОСТ 380-94. Характеристики прокатываемой заготовки определены согласно данным работ [211,212]. На рисунках 4.3–4.4 приведены результаты исследования.

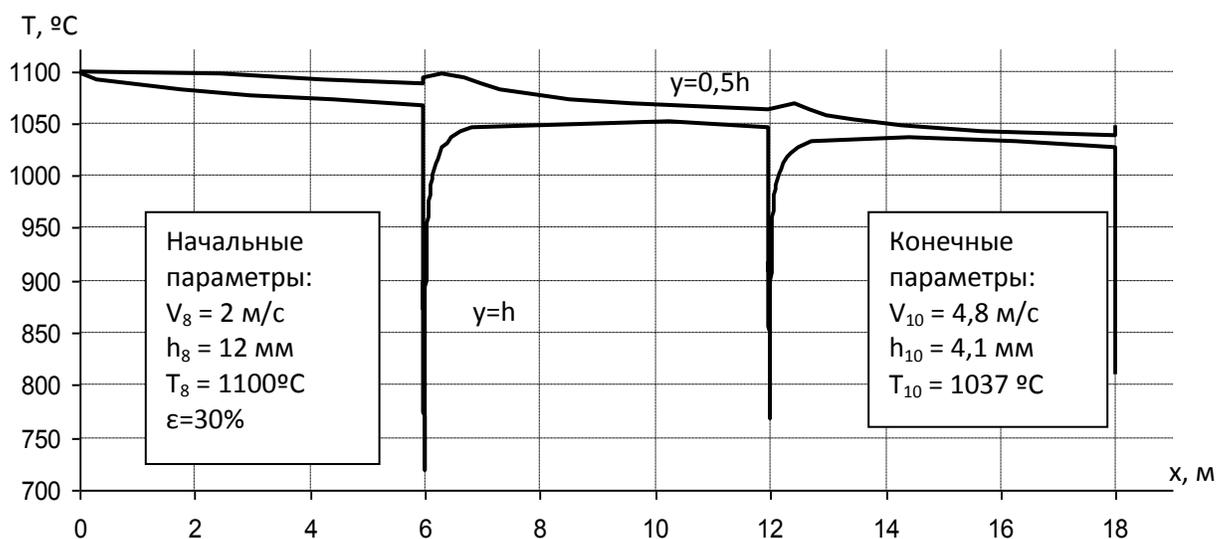


Рисунок 4.3 - Распределение температуры в полосе при прокатке между клетями №8-10

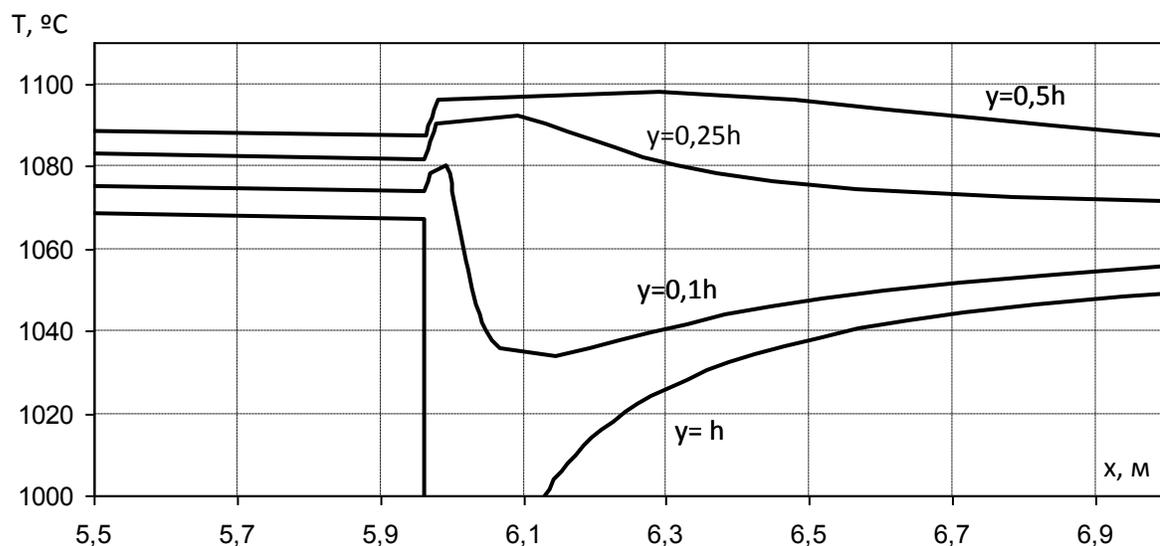


Рисунок 4.4 - Распределение температуры в полосе при прокатке в клетки №8

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что при контакте полосы с рабочими валками происходит резкое падение температуры на ее поверхности ($y=h$), что объясняется эффектом максимального теплосъема (теплопередачи) с полосы на рабочую поверхность инструмента. При прохождении последующих клеток (рисунок 4.3) падение температуры на поверхности ($y=h$) уменьшается. Это объясняется тем, что скорость прокатываемой заготовки в результате обжатия увеличивается, при этом время контакта поверхности полосы с валками уменьшается. Несмотря на то, что полоса отдает часть своего тепла рабочим валкам, наблюдается повышение (всплеск) температуры в более глубоких слоях полосы в момент пластической деформации. Выделяющаяся при деформации теплота равномерно распределяется по всему объему, это приводит к увеличению средней температуры (деформационный всплеск) на 20...50⁰C. Полученные результаты хорошо коррелируются с аналогичными исследованиями авторов [137,206,207].

Для достижения заданных эксплуатационных свойств в непрерывной группе клеток полоса подвергается воздействиям дополнительных технологических систем гидроудаления окалины, межклетевого охлаждения, а

также принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации. Влияние вышеуказанных систем необходимо учитывать в процессе моделирования.

4.1.2 Математическое моделирование теплового состояния прокатываемой полосы с учетом дополнительных технологических систем

Для уточнения разработанной математической модели теплового состояния прокатываемой полосы реализованы дополнительные этапы реализации моделирования, включающие в себя теоретическое и экспериментальное исследование основных закономерностей формирования температурных условий процесса листовой горячей прокатки с учетом воздействия на изменение теплового состояния полосы работы технологических систем гидроудаления окалины, межклетевого охлаждения, а также принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации.

Для решения частных теплофизических задач исследователи преимущественно используют два основных направления решения температурной задачи состояния полосы. Первое решение базируется на теоретических зависимостях процесса теплопередачи, второе решение основано на статистическом анализе результатов экспериментальных исследований температуры прокатываемой полосы.

Теоретический анализ предусматривает составление уравнения суммарного теплового баланса, включающего потери тепла полосой вследствие её контакта с рабочими валками, потери тепла излучением и конвективные потери за время пауз между проходами, потери тепла из-за попадания на полосу воды от охлаждающих рабочих элементов клетки и притока тепла вследствие перехода энергии работы деформации металла в тепловую.

Для достижения поставленной цели исследования в работе был реализован синтез известных теоретических и практических (статистических) подходов.

Для исследования теплового состояния полосы с учетом дополнительных технологических систем необходимо рассмотреть физику протекающих процессов при струйном охлаждении. Связующим звеном в исследуемых процессах является механизм взаимодействия струи жидкости под давлением (высоконапорной) с поверхностью полосы. Принципиальное отличие рассматриваемых систем будет заключаться в геометрии расположения коллекторов, геометрии сопел, а также величине напора струй.

Рассмотрим влияние дополнительных технологических систем на тепловое состояние прокатываемой полосы: гидроудаление окалины, межклетевое охлаждение, а также принудительное охлаждение полосы перед входом ее в очаг деформации.

Влияние системы гидроудаления окалины и системы принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации на тепловое состояние полосы.

При решении частных теплофизических задач необходимо отметить, что в непрерывных группах клеток листовых станов горячей прокатки применяемые конструктивные решения для удаления окалины имеют приблизительно одинаковую техническую реализацию. Необходимо отметить, что в черновой непрерывной группе клеток системами гидроудаления окалины оснащена каждая клеть. В чистовой непрерывной группе клеток система гидроудаления окалины установлена только перед первой клетью.

Принципиальное отличие исследуемых систем заключается в геометрии расположении коллекторов, геометрии сопел, а также в величине напора струй. В дальнейшем принимаем, что учет теплофизических потерь полосы будет производиться по общей методике, которая учитывает особенности процесса.

Для исследуемых систем принимаем следующие условия:

- скоростью распространения тепла по направлению прокатки и по ширине можно пренебречь;
- температура после выхода из клетки равномерно распределена по толщине полосы, внутренние источники теплоты на участке работы рассматриваемых дополнительных технологических систем отсутствуют.

Решения поставленных теплофизических задач базируются на исходном уравнении теплопроводности (4.2.) для исследуемых технологических систем при взаимодействии полосы со струями охладителя. Потери теплоты поверхностью (полосой) можно определить по следующим формулам:

- потери на излучение [213,214]:

$$q_{И} = \varepsilon_{П} C_0 \left[\left(\frac{T_{П}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_C}{100} \right)^4 \right], \quad (4.12)$$

где $T_{П}$ и T_C – температуры полосы и окружающей среды, соответственно, °С;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела;

$\varepsilon_{П}$ – коэффициент излучательной способности определяется согласно выражению [215]:

$$\varepsilon_{П} = \left(\frac{t_{П}}{1000} \right) \cdot (0,125t_{П} - 0,38) + 1,1; \quad (4.13)$$

- конвективные потери на воздухе (согласно работам А.П. Колбурн [217]):

$$q_K = \alpha_B (T_{П} - T_B); \quad (4.14)$$

где, α_B – коэффициент теплоотдачи конвекцией для движущейся полосы [217], определяется:

$$\alpha_B = \frac{\lambda_B}{L} 0,0036 \left(\frac{L \cdot V_{П}}{v_B} \right)^{0,8} \text{Pr}^{1/3}, \quad (4.15)$$

где λ_B – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м×К);

L – длина прокатываемой полосы, м;

V_{Π} – скорость полосы, м/с;

ν_B – кинематическая вязкость воздуха, м²/с;

Pr – число Прандтля;

– конвективные потери при плёночном кипении (согласно работам Натсуо Хатта [216]):

$$q_K = \alpha_{\Pi}(T_{\Pi} - T_O), \quad (4.16)$$

где T_O – температура охлаждающей воды, °С;

α_{Π} – коэффициент теплоотдачи при плёночном кипении [216], который определяется:

$$\alpha_{\Pi} = 200 \frac{2420 - 21,7T_{B.\Pi.}}{(T_{\Pi} - T_{H.B.})}, \quad (4.17)$$

где $T_{B.\Pi.}$ – температура воды на поверхности полосы, °С;

T_{Π} – температура поверхности полосы, °С;

$T_{H.B.}$ – температура насыщения воды, °С.

– конвективные потери на гидросбиве (согласно работам Янаги [208]):

$$q_G = 5,4 \times 10^3 \times W^{0,7} \times \left(\frac{t_B}{26} \right)^{-0,54}, \quad (4.18)$$

где W – расход воды на единицу площади, л/мин;

t_B – температура воды в коллекторе, °С;

q_G – тепловой поток на поверхности при охлаждении струями гидросбива, ккал/м²·ч.

Влияние системы межклетевого охлаждения на тепловое состояние полосы

Для наиболее характерного режима работы системы межклетевого охлаждения (сильное переохлаждение поступающего охладителя и высокая температура поверхности) принимаем следующие условия [219]:

– в зоне столкновения струй жидкости с полосой теплообмен происходит в режиме переходного кипения недогретой жидкости;

– вне зоны столкновения на верхней поверхности полосы осуществляется теплообмен при пленочном кипении.

Таким образом, для системы межклетевого (струйного) охлаждения полосы можно выделить следующие основные механизмы теплопередачи [220]:

- а) охлаждение в зоне столкновения струи с листом в условиях переходного кипения жидкости;
- б) теплопередача в зоне пленочного кипения жидкости;
- в) теплообмен в зоне конвективного и радиационного охлаждения на воздухе.

Указанные механизмы теплопередачи могут существовать одновременно на поверхности полосы. Расчетная схема приведена на рисунке 4.5.

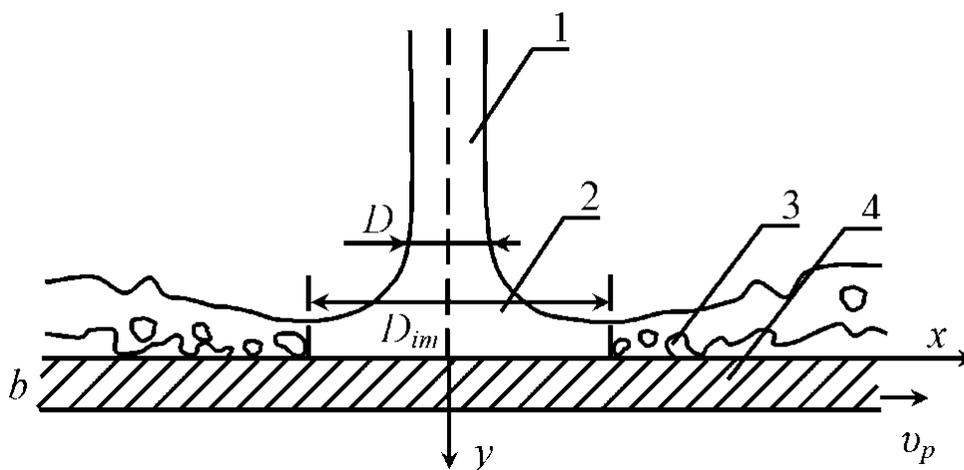


Рисунок 4.5 - Схема взаимодействия струи охладителя с полосой:
1 – струя охладителя, 2 – зона переходного кипения, 3 – зона пленочного кипения, 4 – полоса

Теплообмен в зоне столкновения

Экспериментальные данные работы [221] позволяют получить уравнение, описывающее давление в области натекания круглой струи охладителя:

$$P^*(x) = \frac{P - P_0}{P_s - P_0} = 1 - 0,61 \left(\frac{x}{D} \right)^2, \quad (4.19)$$

где P_s – давление в критической точке, МПа;

P_0 – атмосферное давление, МПа;

x – расстояние от оси струи, мм;

D – диаметр натекающей струи, мм.

Распределение давления на поверхности полосы для случая натекания плоской струи определяется из условия [222]:

$$P^*(x) = \left(\frac{x}{1,75w} \right)^2 \left(\frac{2x}{1,75w} - 3 \right) + 1, \quad (4.20)$$

где w – ширина плоской струи, мм.

В данном соотношении $P^*(x)=0$ в точке $\bar{x} = x/w_c = 1,82$. Следует отметить, что уравнение (4.20) хорошо согласуется с результатом исследований других авторов [224].

Нормальная составляющая скорости потока определяется:

$$v_{im}(x) = v_s \sqrt{P(x)^*}, \quad (4.21)$$

где v_s – скорость потока вблизи критической точки струи (м/с), которая определяется:

$$v_s = \sqrt{v_0^2 \pm 2gH}, \quad (4.22)$$

Давление на расстоянии x от критической точки струи определяется:

$$p_{im}(x) = p_0 + \frac{1}{2} \rho_l v_s^2 P^* \quad (4.23)$$

Вводим условие, что по мере приближения струи к поверхности полосы ее диаметр или ширина (для плоской струи) изменяется. Из уравнения непрерывности определяем скорректированный диаметр струи:

$$d_c = d_0 \sqrt{v_0 / v_s}, \quad (4.23)$$

и скорректированную ширину плоской струи:

$$w_c = w_0 \frac{v_0}{v_s}. \quad (4.24)$$

Для расчета теплообмена в зоне столкновения решено использовать модель, предложенную японским исследователем Miyasaka [223], которая хорошо согласуется с известными работами. Согласно этой модели для переходного режима кипения под струей необходимо учитывать скорость натекания струи и ее начальную температуру.

На основе предложенной модели [225], а также ряда экспериментальных работ других авторов [221,224,225,226], получено следующее соотношение для локальной плотности теплового потока в зоне столкновения:

$$q_{im} = A \cdot 8,67 \times 10^7 \Delta T_{sat}^{-0,385} \left[1 + 0,4 \left(\frac{v_{im}}{100w} \right)^{0,4} \right], \quad (4.25)$$

$$A = \frac{q_c(\Delta T_{sub})}{q_c(80^\circ C)}, \quad (4.26)$$

$$q_c = 0,16r\rho_v \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{\frac{1}{4}} \times \left[1 + 0,112 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,8} \left(\frac{c_{pl} \Delta T_{sub}}{r} \right)^{1,13} \right], \quad (4.27)$$

где $\Delta T_{sat} = T_p - T_s$, T_p – температура поверхности листа, $^\circ C$;

T_s – температура насыщения воды, $^\circ C$;

$v_{im} = v_{im}(x)$ – вертикальная составляющая скорости струи в зоне столкновения, м/с;

q_c – критическая плотность теплового потока при кипении переохлажденной жидкости в свободном объеме;

ΔT_{sub} – переохлаждение воды;

r – теплота парообразования;

σ - коэффициент поверхностного натяжения;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

ρ_b, ρ_v - плотность охладителя (воды) и пара соответственно, кг/м³;

c_{pl} – удельная теплоемкость жидкости.

Теплообмен в зоне пленочного кипения

Расчет теплоотдачи между струями проведен с использованием аналитической модели пленочного кипения жидкости на движущейся горизонтальной поверхности [227]:

$$Nu_x = 0,0197 \frac{\mu_l}{\mu_v} \beta \left(\bar{u}_\infty - \bar{u}_s \right)^{0,6} \left(2\bar{u}_s + 7\bar{u}_\infty \right)^{0,2} Re_x^{0,8} Pr_l^{\frac{2}{3}} \quad (4.28)$$

$$Nu_x = \frac{q_f x}{\lambda_v (T_p - T_s)} Re_x = \frac{u_i x}{\nu_l} \beta = \frac{Pr_v c_{pl} (T_s - T_\infty)}{Pr_l c_{pv} (T_p - T_s)},$$

$$\bar{u}_s = \frac{\bar{u}_\infty + \beta Pr_l^{2/3} \bar{v}_p}{1 + \beta Pr_l^{2/3}} \quad \bar{u}_s = \frac{u_s}{u_i} \bar{u}_\infty = \frac{u_\infty}{u_i} \bar{v}_p = \frac{v_p}{u_i},$$

где μ_l, μ_v – динамическая вязкость жидкости и пара;

Pr_b, Pr_v – критерии Прандтля для жидкости и пара;

λ_v – теплопроводность пара;

ν_l – кинематическая вязкость жидкости;

c_{pl}, c_{pv} – удельная теплоемкость жидкости и пара;

u_s – скорость границы раздела фаз жидкость-пар;

u_i – максимальная скорость в системе;

q_f – плотность теплового потока в зоне пленочного кипения жидкости.

В зоне пленочного кипения учитывалось влияние теплообмена излучением и изменение температуры воды в основном потоке T_∞ .

Изменение температуры воды в параллельном потоке находилось из выражения:

$$\frac{dT_w}{dx} = \frac{2\alpha_f(T_p - T_{sat})}{\rho_l c_{pl} w_0 v_0}, \quad (4.29)$$

где w_0 , v_0 – начальная ширина (м) и скорость (м/с) струи.

Скорость движения воды в основном потоке u_∞ была принята равной скорости натекания струи.

4.1.3 Численная реализация модели теплового состояния полосы с учетом дополнительных технологических систем

На основе составленной физико-математической модели охлаждения полосы реализовано дополнительное приложение к разработанной программе расчета [210]. Окно программы, для ввода дополнительных исходных данных представлено на рисунке 4.6.

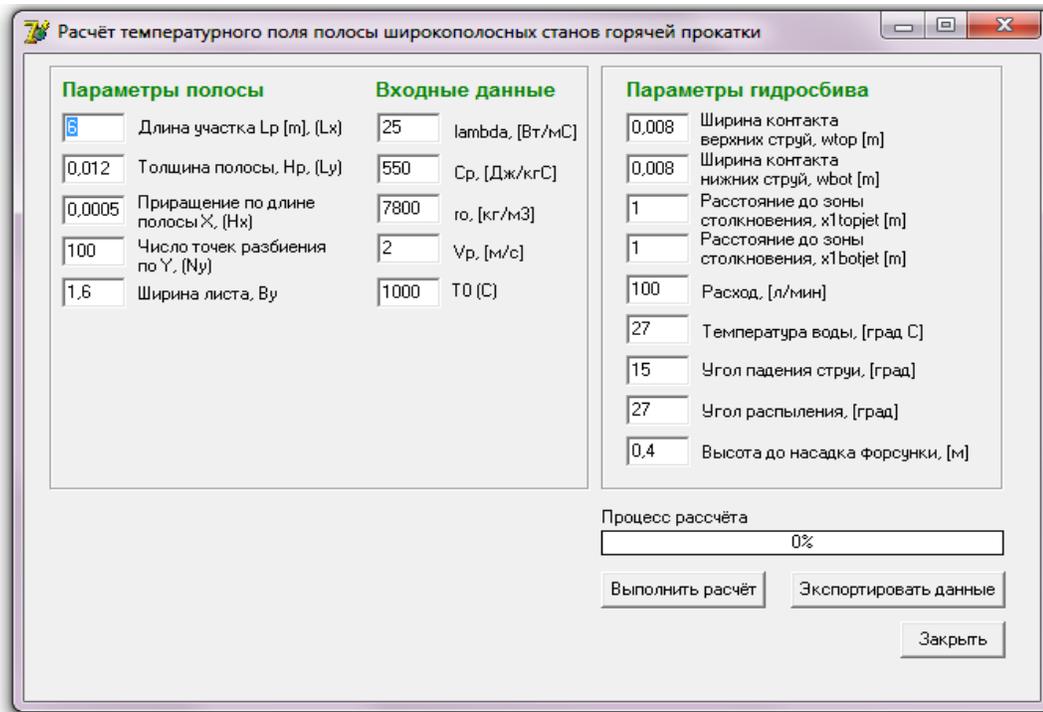


Рисунок 4.6 - Окно программы, для ввода дополнительных исходных данных для расчета теплового состояния прокатываемой полосы

Промежуточные результаты работы программы, позволяющие исследовать влияние дополнительных технологических систем на тепловое состояние прокатываемой полосы, приведены на рисунках 4.8-4.11.

На рисунках 4.8-4.11 приведены результаты расчета теплового состояния полосы при воздействии системы гидроудаления окалины [228,229,230,231]. В качестве примера произведен расчет для следующих параметров процесса листовой горячей прокатки:

- давление охладителя в коллекторах – 200 кПа;
- толщина полосы – 18 мм;
- материал прокатываемой заготовки – сталь марки СтЗкп ГОСТ 380-94.

Расчётная схема для определения пятна распыления форсунки системы гидросбива представлена на рисунке 4.7.

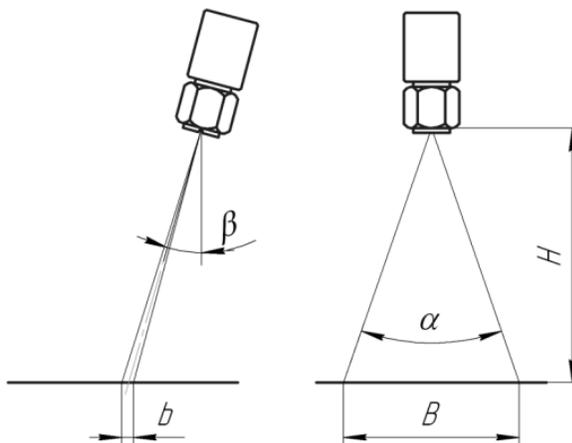


Рисунок 4.7 - Расчётная схема для определения пятна распыления:
 α - угол распыления; β - угол установки; B , b – длина и ширина участка столкновения; H – расстояние до обрабатываемой поверхности

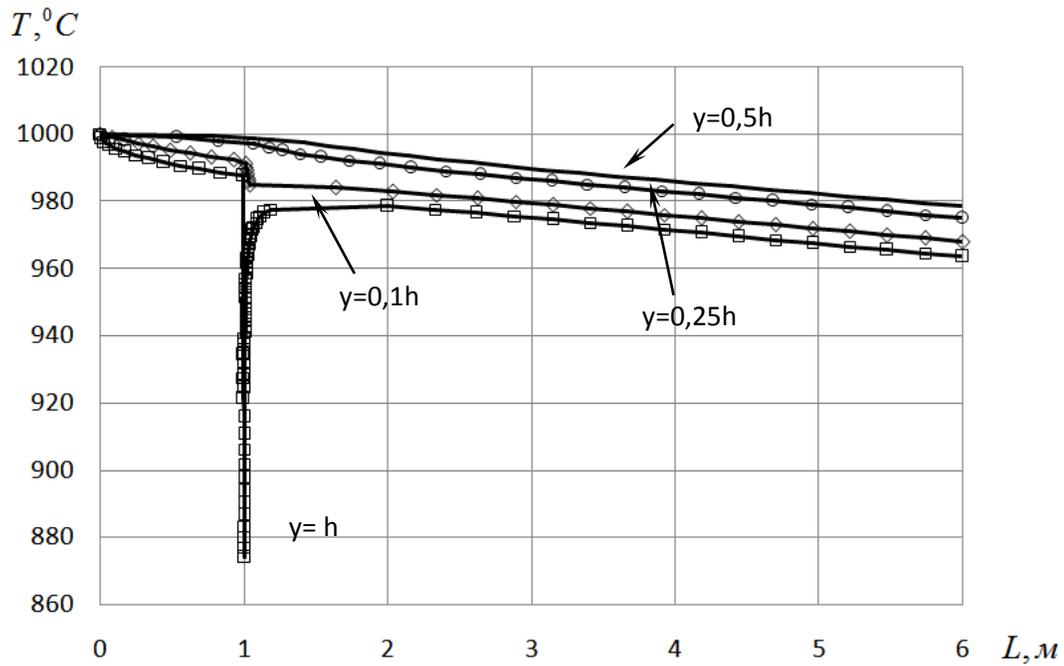


Рисунок 4.8 - Распределения температуры по толщине полосы с установленной системой гидроудаления окалины
 Скорость прокатки 2,5 м/с, расход охладителя 130 л/мин;
 характеристики форсунки: $d_{\phi} = 4,2\text{ мм}$; $b=8\text{ мм}$, $H=0,4\text{ м}$; $\alpha = 27^{\circ}$, $\beta = 15^{\circ}$.

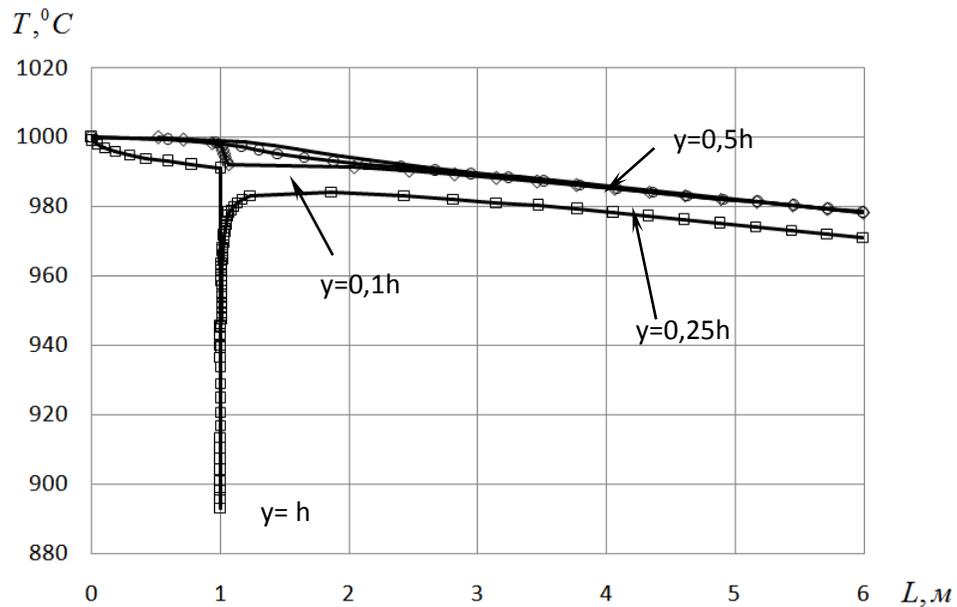


Рисунок 4.9 - Распределения температуры по толщине полосы с установленной системой гидроудаления окалины.
 Скорость прокатки 2,5 м/с, расход охладителя 130 л/мин;
 характеристики форсунки: $d_{\phi} = 6,0\text{ мм}$; $b=8\text{ мм}$, $H=0,4\text{ м}$; $\alpha = 27^{\circ}$, $\beta = 15^{\circ}$.

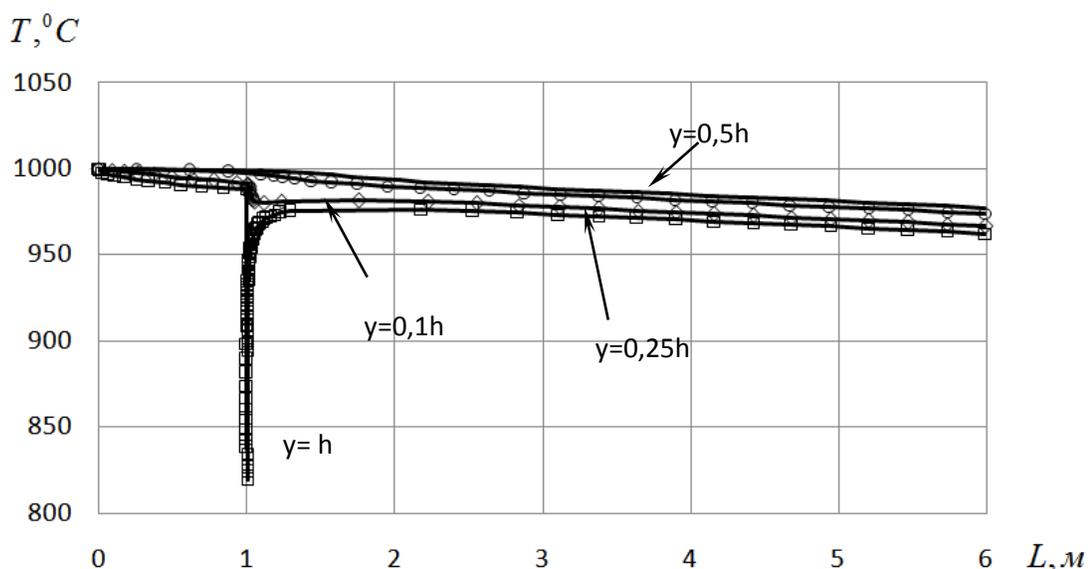


Рисунок 4.10 - Распределения температуры по толщине полосы с установленной системой гидроудаления окалины.

Скорость прокатки 2,8 м/с, расход охладителя 170 л/мин;
характеристики форсунки: $d_{\phi} = 6,0$ мм; $b = 8$ мм, $H = 0,4$ м; $\alpha = 27^{\circ}$, $\beta = 15^{\circ}$.

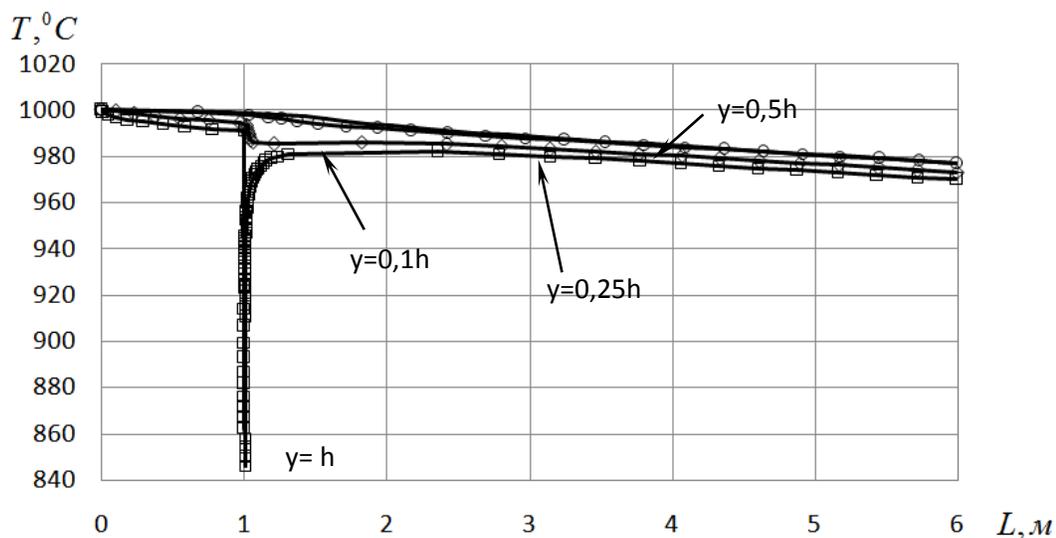


Рисунок 4.11 - Распределения температуры по толщине полосы с установленной системой гидроудаления окалины.

Скорость прокатки 2,8 м/с, расход охладителя 170 л/мин;
характеристики форсунки: $d_{\phi} = 4,2$ мм; $b = 8$ мм, $H = 0,3$ м; $\alpha = 27^{\circ}$, $\beta = 15^{\circ}$.

Результаты моделирования показывают, что в процессе работы исследуемых систем происходит восстановление температуры полосы приблизительно на расстоянии 1,0-1,5 м после участка гидроудаления окалины.

Анализ полученных результатов показывает, что на изменение теплового состояния полосы при воздействии технологических систем оказывает влияние ряд технологических факторов: скорость прокатки (м/с); количество воды на поверхности полосы (м^3); расстояние от сопел системы до обрабатываемой поверхности (H , мм); толщина полосы (мм); расход охладителя, подаваемого через форсунку ($\text{м}^3/\text{ч}$); пятно распыления охладителя (мм^2).

Для системы принудительного охлаждения полосы перед входом ее в клеть необходимо исключить попадание в очаг деформации охладителя, который оказывает негативный эффект на стойкость рабочих валков. Поэтому при выполнении дальнейших исследований необходимо предусмотреть систему «отсечки» охладителя, что также позволит добиться сокращения тепловых потерь на верхней поверхности полосы.

Обязательным элементом технологии листовой горячей прокатки является контроль температуры полосы после выхода ее из последней клетки стана (температура конца проката). Для управления и корректировки температуры конца прокатки применяют системы межклетевого охлаждения.

На рисунке 4.12. приведен пример расчета температурного поля полосы при воздействии системы межклетевого охлаждения. Анализ результатов показывает, что в зоне контакта струи происходит падение температуры на поверхности полосы. В дальнейшем, в точке поверхности, прошедшей зону столкновения, температура имеет тенденцию к восстановлению, при этом до следующей прокатной клетки снижение температуры происходит только за счет радиационных (излучением) и конвективных (охлаждение воздухом) потерь.

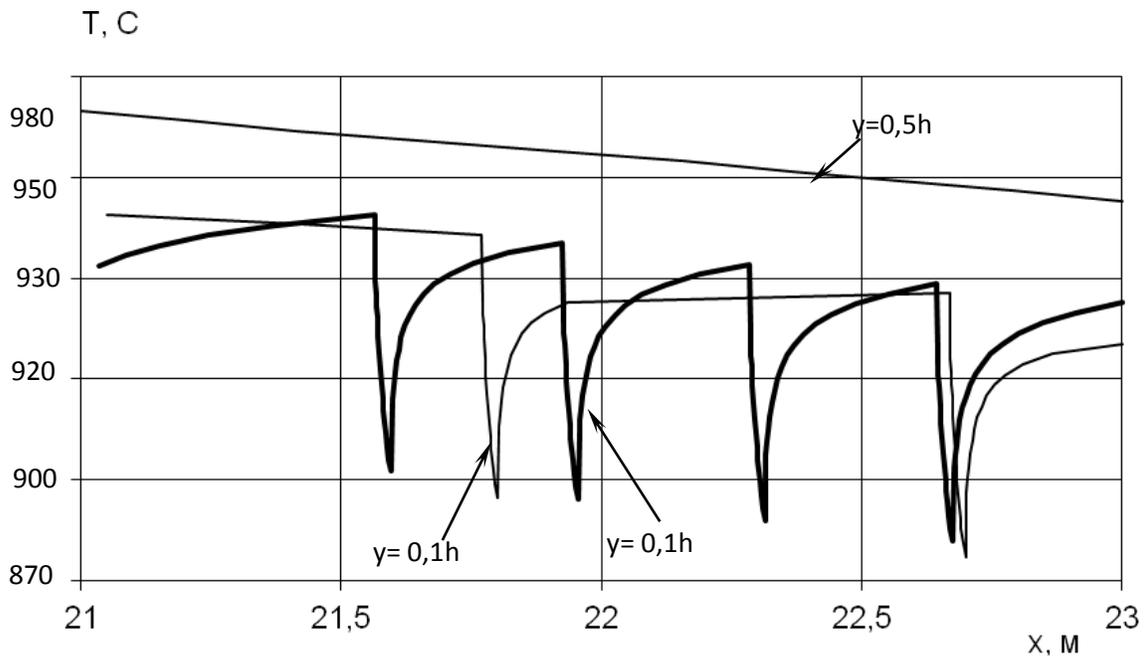


Рисунок 4.12 - Распределение температуры в направлении движения листа при воздействии системы межклетевого охлаждения.
 Скорость прокатки 2,8 м/с, расход охладителя 70 л/мин;
 характеристики форсунки: $d_{\phi} = 4,2 \text{ мм}$, $b = 10 \text{ мм}^2$, $H = 0,3 \text{ м}$; $\beta = 0^{\circ}$.

Полученные значения результатов исследований на основе теплового баланса позволили сформировать итоговую таблицу, описывающую вклад исследованных факторов в тепловое состояние горячекатаной полосы.

Результаты сведенного теплового баланса полосы на участке непрерывной черновой и чистовой группы клетей листового стана горячей прокатки приведены в таблице 4.1. В качестве примера рассматривалась прокатка стали марки СтЗкп ГОСТ 380-94.

Таблица 4.1 - Тепловой баланс при прокатке полосы на листовых станах горячей прокатки

Факторы:		Вклад исследованных факторов в тепловое состояние полосы (на 1кг)		
		%	°С	кДж
Прокатка полосы на стане 2500 г.п. ПАО «ММК» Размер прокатываемой полосы 1250×3,5 мм				
1	Суммарное тепловыделение при обжатии (деформационный разогрев)	9,67	25,00	24,00
2	Суммарные тепловые потери на нагрев валков (теплопередача валкам)	-18,75	-45,00	-27,00
3	Суммарные потери на гидросбивах	-10,42	-25,00	-15,00
4	Суммарные потери на межклетевом охлаждении	-16,67	-40,00	-24,00
5	Суммарные радиационные потери	-75,00	-180,00	-108,00
6	Суммарные конвективные потери	-2,08	5,00	3,00
7	Суммарные кондуктивные потери при контакте с роликами в межвалковом участке	-2,08	5,00	3,00
8	Итоговые общие тепловые потери	-108,333	-240	144
Прокатка полосы на стане 2000 г.п. ПАО «ММК» Размер прокатываемой полосы 1280×2,8 мм				
1	Суммарное тепловыделение при обжатии (деформационный разогрев)	7,86	23,00	33,60
2	Суммарные тепловые потери на нагрев валков (теплопередача валкам)	-20,99	-62,00	-37,20
3	Суммарные потери на гидросбивах	-12,41	-35,00	-21,00
4	Суммарные потери на межклетевом охлаждении	-14,18	-40,00	-24,00
5	Суммарные радиационные потери	-74,47	-210,00	-126,00
6	Суммарные конвективные потери	-1,42	4,00	2,40
7	Суммарные кондуктивные потери при контакте с роликами в межвалковом участке	-1,77	5,00	3,00
8	Итоговые общие тепловые потери	-106,383	-315	-189,00

Таким образом, оценка источников потерь тепла в технологии листовой горячей прокатки показала, что основной потерей тепла является теплоотдача излучением (радиационные потери), которые составляют до 75%. При взаимодействии заготовки с технологическими системами наблюдаются следующие потери тепла: на гидросбивах до 12%, кондуктивный теплообмен с валками – до 20%. Приращение тепла за счет протекающих процессов тепловыделения (деформационный разогрев) при пластической деформации составляет до 9%. Практически не оказывает влияние на тепловое состояние

прокатываемой полосы конвективная теплоотдача (менее 3%) и кондуктивные потери при контакте с роликами в межвалковом участке (менее 3%).

Итоговые результаты исследования были систематизированы и объединены в едином программном продукте. Результаты исследования теплового состояния прокатываемой заготовки полосы на примере стали марки СтЗкп по ГОСТ 380-94 представлены рисунках 4.13-4.14. На рисунках 4.13-4.14 точками отмечены характерные участки изменения температуры поверхности полосы при взаимодействии с различными технологическими системами:

- точка А – взаимодействие с системой гидроудаления окалины;
- точка В – взаимодействие с системой принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации;
- точка С – взаимодействия с рабочими валками;
- точка Д – взаимодействие с системой межклетевого охлаждения.

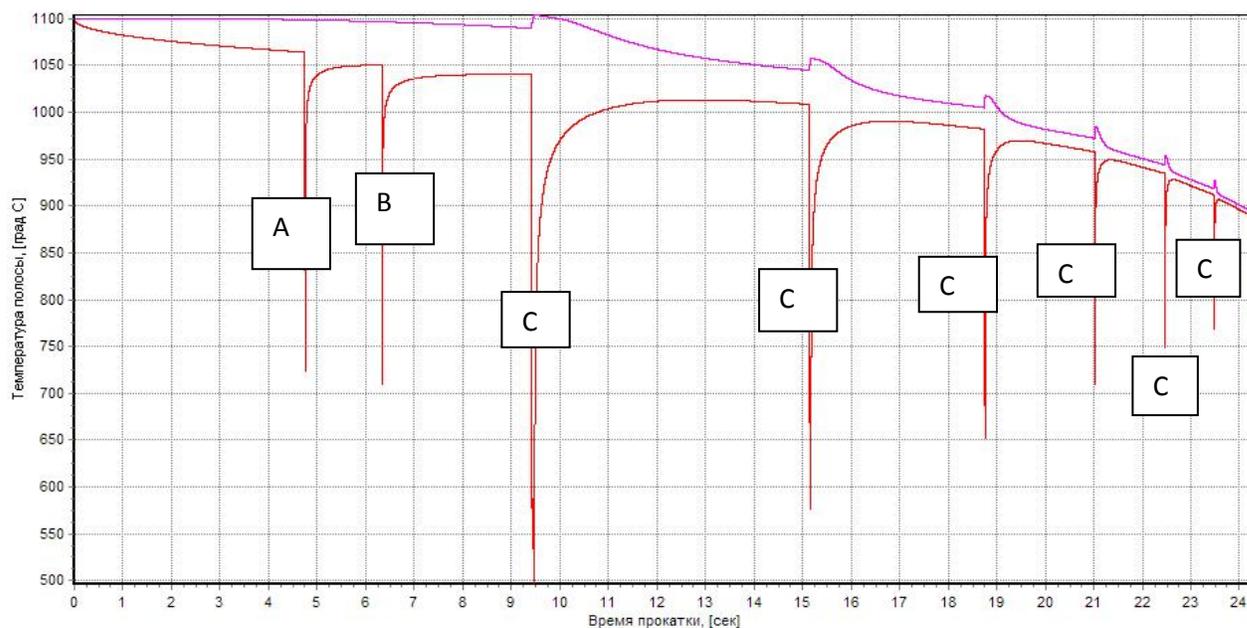


Рисунок 4.13 - Зависимость температуры прокатываемой заготовки от времени прокатки. Прокатываемая заготовка: СтЗкп ГОСТ 380-94.
Размер прокатываемой полосы 1250×3,5 мм

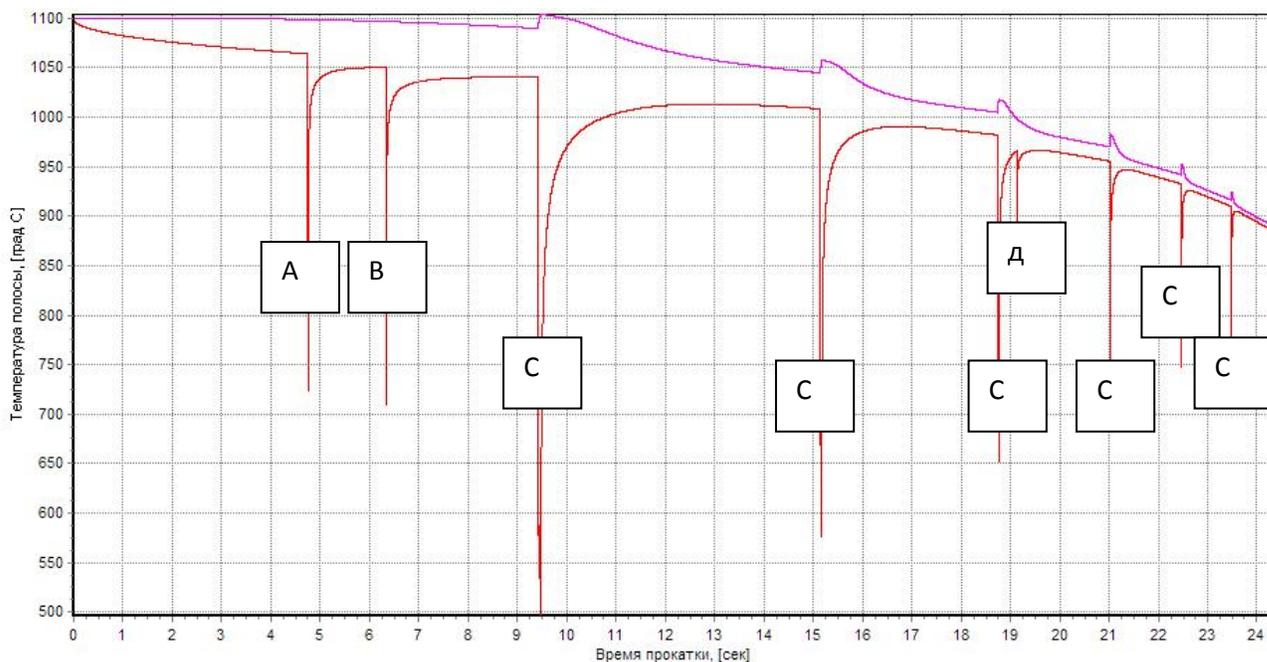


Рисунок 4.14 - Зависимость температуры прокатываемой заготовки от времени прокатки. Прокатываемая заготовка: СтЗкп ГОСТ 380-94.
Размер прокатываемой полосы 1280×2,8 мм

4.1.4 Оценка достоверности разработанной математической модели теплового состояния прокатываемой полосы

Проверка достоверности разработанной математической модели теплового состояния прокатываемой полосы производилась путем сравнения экспериментальных и расчетных данных.

Сравнительный анализ проводился на двух листовых станах горячей прокатки: 2500 и 2000 ПАО «ММК». В процессе анализа производилось сравнение результатов моделирования с результатами контрольных замеров, используемых на производстве:

- при выходе полосы из черновой группы клетей: T_3 (°C) – для стана 2500 г.п.; T_6 (°C) – для стана 2000 г.п.;
- при выходе полосы из чистовой группы клетей: T_{11} (°C)– для стана 2500 г.п.; T_{13} (°C) – для стана 2000 г.п.

Экспериментальные значения температур были получены из цеховых программ учета данных. Анализу было подвергнуто более 300 прокатанных горячекатаных полос. Часть результатов приведена в таблице 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2 - Сравнение результатов математической модели теплового состояния прокатываемой полосы с экспериментальными данными (на примере стана 2500 г.п. ПАО «ММК»)

Материал прокатываемой заготовки/ толщина, мм	Значения температуры прокатываемой заготовки				Расхождение, %	
	Черновая группа клетей		Черновая группа клетей		Чернов.	Чистов.
	Измеренная T_3 °С	Расчетная T_3 °С	Измеренная T_{11} °С	Расчетная T_{11} °С		
08КП, 08ПС h=2,0 мм	1080	1190	830	950	-10,19	-14,46
11кп, 08Ю h=3,2 мм	1065	1172	862	989	-10,05	-14,73
SAE1008 h=1,8 мм	1085	1184	820	950	-9,12	-15,85
16ГС h=6,2 мм	1100	1190	850	956	-8,18	-12,47
22ГЮ h=7,0 мм	1110	1280	800	910	-15,32	-13,75
10ХНДП h=3,2 мм	1095	1190	880	1000	-8,68	-13,64
30ХГСА h=3,50 мм	1100	1230	890	992	-11,82	-11,46
15ХГЮА h=3,5 мм	1150	1292	850	970	-12,35	-14,12

Анализ полученных результатов показывает, что диапазон расхождения между экспериментальными и теоретическими данными составляет 8...21%, что позволяет считать разработанную математическую модель теплового состояния прокатываемой полосы достоверной.

Таблица 4.3 - Сравнение результатов математической модели теплового состояния прокатываемой полосы с экспериментальными данными (на примере стана 2000 г.п. ПАО «ММК»)

Материал прокатываемой заготовки/ толщина, мм	значения температуры прокатываемой заготовки				Расхождение, %	
	Черновая группа клетей		Черновая группа клетей		Чернов.	Чистов.
	Измеренные T_6 °С	Расчетные T_6 °С	Измеренные T_{13} °С	Расчетные T_{13} °С		
SAE 1006-A (C≤0,03%) h=1,5 мм	1050	1170	795	880	-11,43	-10,69
SAE 1006, h=1,8 мм	1020	1190	835	950	-16,67	-13,77
Ст4сп h=1,8 мм	1050	1200	845	972	-14,29	-15,03
20пс h=10,01 мм	1150	1320	870	980	-14,78	-12,64
08Ю h=1,8 мм	1170	1360	835	950	-16,24	-13,77
09Г2С h=4,0 мм	1030	1190	810	920	-15,53	-13,58
12ГСБ h=8,0 мм	1020	1170	735	850	-14,71	-15,65
10Г2ФБЮ h=5,0 мм	1050	1180	755	851	-12,38	-12,72

4.1.5 Выводы по результатам моделирования теплового состояния прокатываемой полосы

1. Разработана и численно реализована математическая модель теплового состояния прокатываемой полосы. В реализованной математической модели учтено влияние следующих технологических особенностей процесса листовой горячей прокатки: теплообмен полосы с валками; объемное тепловыделение при пластической деформации полосы; изменение теплового состояния полосы с учетом работы технологических систем: гидроудаления окалины, межклетевого охлаждения, а также принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации [210].

2. Проведены теоретическое и экспериментальное исследования основных закономерностей формирования температурных условий процесса листовой горячей прокатки. На основе метода теплового баланса исследован вклад внешних и внутренних факторов в тепловое состояние прокатываемой полосы. Для технологии листовой горячей прокатки произведена оценка внешних и внутренних факторов в тепловое состояние прокатываемой полосы:

– влияние внешних факторов на потери тепла: теплоотдача излучением (радиационные потери) до 75%; на гидросбивах до 12%; кондуктивный теплообмен с валками до 20%. Практически не оказывает влияние тепловое состояние прокатываемой полосы конвективная теплоотдача (менее 3%) и кондуктивные потери при контакте с роликами в межвалковом участке (менее 3%);

– влияние внутренних факторов: наблюдается приращение тепла за счет протекающих процессов тепловыделения (деформационный разогрев) при пластической деформации, которое составляет до 9%.

3. Оценка достоверности разработанной математической модели производилась путем сравнения экспериментальных и расчетных данных на примере двух листовых станах горячей прокатки: 2500 и 2000 ПАО «ММК». Результаты сравнительного анализа показали, что диапазон расхождения между экспериментальными и теоретическими данными составляет 8...21%.

Результаты математического моделирования теплового состояния прокатываемой полосы необходимо использовать для решения второй поставленной задачи – расчет теплового состояния для элемента системы – рабочий валок.

4.2 Моделирование теплового состояния рабочих валков листовых станов горячей прокатки

Математическое моделирование теплового состояния рабочих валков листовых станов горячей прокатки было реализовано путем решения задачи определения нестационарного двухмерного температурного поля.

Тепловое состояние рабочего валка описывается уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат [129,130,232,233,235,236,237,238,239,240]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (4.30)$$

где $T(r, \varphi, z, \tau)$ – температура;

τ - время;

r, φ, z – цилиндрические координаты;

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$ - коэффициент температуропроводности.

Время распространения тепла по угловой координате φ можно записать в виде выражения: $\tau = \frac{R^2}{a}$.

Анализ известных работ [129,130,232,233,234] показывает, что для действующих станов горячей прокатки радиус валка составляет порядка $R \sim 10^2$ см, а значение коэффициента температуропроводности $a \approx 0,1$ см²/с [235,236]. Время распространения тепла по угловой координате φ будет составлять $\approx 10^4$, что позволяет пренебречь в уравнении (4.30) членом суммы $\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}$.

Выражение для определения теплового состояния рабочих валков листовых станов горячей прокатки можно записать [237,238]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (4.31)$$

Краевые условия для уравнения (4.31):

– начальные условия характеризуют распределение температуры в валке в начальный момент времени;

$$T(r, z, 0) = T_0; \quad (4.32)$$

– условие симметрии на оси цилиндра $r=0, z=0 \dots L/2$:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (4.33)$$

– для середины бочки рабочего валка $Z=0, r=0 \dots R$:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad (4.34)$$

– на торцевой поверхности цилиндра $Z=L/2, r=0 \dots R$:

$$\bar{\alpha}_{ж} (T(r, L) - t_{ж}) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}; \quad (4.35)$$

– граничные условия 3-го рода для боковой поверхности валка ($r=R, z=0 \dots L/2$):

$$\alpha(z, \tau) (T_1(z) - T_{cp}(z, \tau)) = -\lambda \frac{\partial T(r, z)}{\partial r}, \quad (4.36)$$

где $T_{cp}(z, \tau)$ - температура окружающей жидкости по длине бочки в зависимости от времени;

T_1 - температура поверхности по длине бочки ($r=R$);

$\alpha(\tau)$ - коэффициент теплоотдачи по длине бочки в зависимости от времени.

Поставленная задача сводится к тому, что для исследуемого объекта – цилиндра (рабочего валка), решается двухмерная задача теплопроводности при условии, что на поверхности объекта ($r=R, z=0 \dots B/2$) граничные условия периодически меняются во времени. На рисунке 4.15 приведена расчетная схема разбиения рабочего валка на зоны. Окружность

валка разбивается на 8 зон, соответствующим центральным углам $\varphi_1 - \varphi_8$. Угол φ_1 соответствует очагу деформации. Углы φ_2 и φ_8 определяются положением отсекающих охладителя (воды). Параметры граничных условий 3-го рода на поверхности валка в зависимости от времени приведены в таблице 4.4.

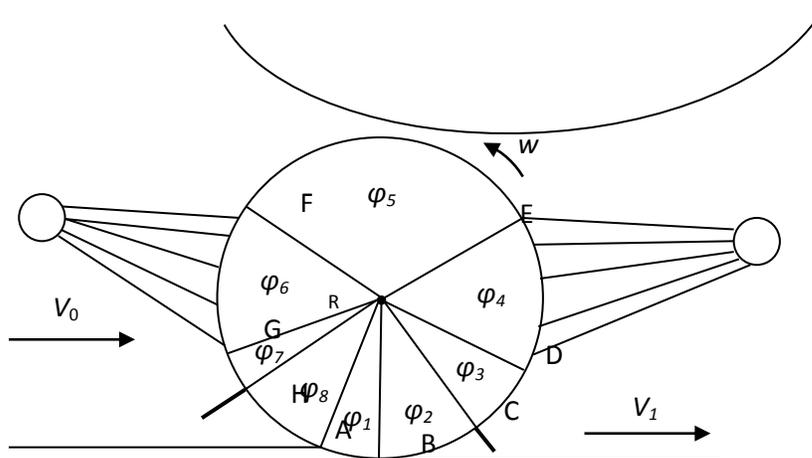


Рисунок 4.15 - Расчетная схема разбиения валка на зоны

Таблица 4.4 - Параметры граничных условий 3-го рода на поверхности валка в зависимости от времени.

Время, τ	Сектор	α_i	$T_{cp}(\tau)$	Примечание
$\tau_A \div \tau_B$	φ_1	α_1	T_{cp1}	Нагрев от горячего металла
$\tau_B \div \tau_C$	φ_2	α_2	T_{cp2}	Охлаждение воздухом Нагрев излучением
$\tau_C \div \tau_D$	φ_3	α_3	T_{cp3}	Охлаждение воздухом
$\tau_D \div \tau_E$	φ_4	α_4	T_{cp4}	Охлаждение струями воды
$\tau_E \div \tau_F$	φ_5	α_5	T_{cp5}	Охлаждение воздухом
$\tau_F \div \tau_G$	φ_6	α_6	T_{cp6}	Охлаждение струями воды
$\tau_G \div \tau_H$	φ_7	α_7	T_{cp7}	Охлаждение воздухом
$\tau_H \div \tau_A$	φ_8	α_8	T_{cp8}	Охлаждение воздухом Нагрев излучением

Моделирование процесса теплоотдачи при охлаждении рабочего вала.

Условия моделирования:

– охлаждение поверхности вала **струями воды**, при котором коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ определяется по критериальному уравнению [140,241,242]:

$$Nu = \frac{\bar{\alpha}_{ж} 2R}{\lambda_{ж}} = 28,8 \left\{ \left[Re_{об}^2 \left(\frac{h}{h_0} \right)^3 + 0,8 \cdot 10^{-4} Re_{вр}^2 \right] Pr \right\}^{0,103}, \quad (4.37)$$

где $Re_{об} = \frac{2RW_c}{v_{ж}}$ - число Рейнольдса, определяемое скоростью воды из сопел;

$Re_{вр} = \frac{2RV}{v_{ж}}$ - число Рейнольдса, определяемое скоростью вращения вала;

$h = \frac{\pi D_c^2 n}{4L}$ - приведенная характеристика коллектора охлаждения, где:

n – количество сопел (шт.) с диаметром проходного отверстия D_c (мм);

L – длина коллектора, мм;

W_c – скорость истечения жидкости из сопла:

$$W_c = \psi_{ж} \sqrt{\frac{2\Delta P_{ж}}{\rho_{ж}}}, \quad (4.38)$$

где $\psi_{ж} \approx 0,8 \div 0,9$ – коэффициент скорости истечения охладителя;

$\Delta P_{ж}$ – избыточное (манометрическое) давление в коллекторе системы охлаждения, МПа;

– число Прандтля, при расчетной температуре определяется:

$$t' = (T_{нов} + t_{ж}) / 2. \quad (4.39)$$

– охлаждение поверхности вала **воздухом** определяется с учетом коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_{возд}$. Согласно литературным данным

[129,130,232,233] коэффициент теплоотдачи α_i находится в интервале от 5000

до 20000 Вт/(м² град). Численное значение коэффициент теплоотдачи α_i определим по зависимости [243,244]:

$$\bar{\alpha}_{\text{возд}} = 4,043 \cdot 10^{-4} t^2 + 4,713 \cdot 10^{-2} t + 8,848. \quad (4.40)$$

Численные значения коэффициент теплоотдачи α_i приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией в зависимости от температуры поверхности, °С

Температура поверхности, °С	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² град)	Температура поверхности, °С	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² град)
24	8,8	140	16,8
30	9,64	160	18
40	10,44	180	19,24
40	11,34	200	20,4
60	12,1	240	23,4
70	12,74	300	26,4
80	13,34	340	31
90	14	400	34,4
100	14,6	440	40,24
120	14,8	400	44,8

Тепловое состояние валка во многом определяется временем прохождения угла ϕ_i выделенных зон валка, которое зависит от ритма прокатки. Поэтому в технологии горячей прокатки принимается, что контакт с горячим металлом не постоянный, а периодический.

– ритм прокатки определяется [245,246]:

$$P_{\text{итм}} = \frac{\tau_{\text{сл}}}{\tau_{\text{сл}} + \tau_n} \quad (4.41)$$

где $\tau_{\text{сл}}$ - время прокатки j -ой полосы;

τ_n - среднее время паузы между прокатываемыми полосами.

Время прокатки j -ой полосы определяется исходя из его массы и технологических параметров прокатки:

$$\tau_{сн} = \frac{1000m}{\rho h_1 B V} \quad (4.42)$$

где m – масса j -ой полосы, т.

Определение дополнительных характеристик

– средняя температура по объему и по радиусу рабочего валка определяется:

$$\bar{T} = \frac{6}{R^3 L} \int_0^{L/2} \int_0^R T(r, z) r^2 dr dz; \quad (4.43)$$

$$\bar{T}(z) = \frac{3}{R^3} \int_0^R T(r, z) r^2 dr. \quad (4.44)$$

Определив среднюю температуру валка можно рассчитать следующие характеристики:

– средний тепловой поток, усвоенный валком за время $\Delta\tau$:

$$\bar{q} = \frac{cR\rho}{2\Delta\tau} (\bar{T}(\tau + \Delta\tau) - \bar{T}(\tau)), \text{ Вт/м}^2; \quad (4.45)$$

– количество теплоты, усвоенной единицей площади валка за время прокатки:

$$Q_{usz} = \frac{cR\rho}{2} (\bar{T}(\tau) - T_0), \text{ Дж/м}^2; \quad (4.46)$$

– абсолютное увеличение радиуса валка за счет теплового расширения:

$$\Delta R(z) = \beta R (\bar{T}(z) - T_0); \quad (4.47)$$

– тепловой профиль валка, считая, что максимальный градиент температур наблюдается между серединой валка и торцом:

$$\Delta R_T = \Delta R(0) - \Delta R(L/2) = \beta R [\bar{T}(0) - \bar{T}(L/2)]. \quad (4.48)$$

– Относительное изменение радиуса валка

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R_0} 100\% = \beta (\bar{T} - T_0). \quad (4.49)$$

4.2.1 Численная реализация математической модели и исследование теплового состояния рабочих валков

Для численной реализации математической модели в разрабатываемый алгоритм были дополнительно введены следующие допущения.

1. Валок имеет цилиндрическую форму, сплошной без внутреннего охлаждения.

2. На формирование нестационарного температурного поля валка влияет процесс поверхностного теплообмена валка:

– на боковой поверхности:

- с полосой металла по дуге захвата в очаге деформации;
- с охлаждающей жидкостью в виде струй воды;
- с окружающим воздухом;

– на торцевой поверхности:

- с окружающим воздухом.

3. Теплоотдача от рабочего валка опорному валку мала, и ее можно не учитывать.

4. Количеством тепла, поступающего в валок при трении между полосой и валком, можно пренебречь.

5. При моделировании теплового состояния валка его геометрические размеры считаем постоянными на протяжении всего процесса прокатки.

Численная реализация модели теплового состояния рабочих валков производилась методом независимых потоков.

Метод независимых потоков, разработанный автором [247], является подходом к построению безусловно устойчивых численных алгоритмов и адаптирован к решению смешанной задачи многомерного уравнения теплопроводности в ортогональных системах координат. Расчет потоков по

каждому из пространственных направлений выполняется независимо, что позволяет легко распараллеливать алгоритм.

Уравнение теплопроводности в полярной системе координат имеет вид (ограничимся случаем изотопной теплопроводности) [238,239,240,248].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} ar \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} a \frac{\partial T}{\partial \varphi}, \quad (4.49)$$

где $a = a(r, \varphi)$ - коэффициент температуропроводности.

Введем потоки:

$$U = ar \frac{\partial T}{\partial r}, \quad V = \frac{a}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi}. \quad (4.49)$$

Тогда аналогом являются уравнения:

$$r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial \varphi}; \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = ar \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) \right]; \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right). \quad (4.49)$$

«Усеченные» уравнения, используемые для расчета предварительных значений потоков, имеют вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = ar \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right); \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2}. \quad (4.49)$$

Решение задачи методом независимых потоков было реализовано согласно расчетной схеме, приведенной на рисунке 4.16. Последовательно рассчитывалось тепловое состояние валка для внешнего слоя валка и при разбиении конечно-разностной сетки; определялось распределение тепла вдоль окружности, а также по глубине поверхностного слоя.

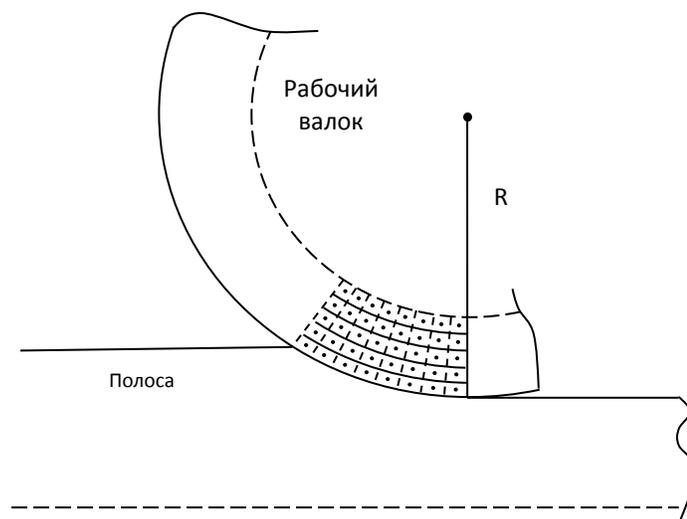


Рисунок 4.16 - Схема разбиения поверхностного слоя валка конечной разностной сеткой

Для численного решения и визуализации результатов исследования реализована компьютерная программа, в которой рассчитывается температура и ее распределение внутри рабочей поверхности валка. Программа реализована в интегративной среде разработки Delphi 7 и позволяет графически отображать данное распределение, а также записывать данные в текстовый файл для последующей обработки [249]. Рабочее окно программного продукта представлено на рисунке 4.17.

Алгоритм работы программы заключается в следующем:

- ввод исходных данных: радиус бочки валка (м), начальная температура ($^{\circ}\text{C}$), угловая скорость валка (рад/с), теплоемкость (Дж/кг* $^{\circ}\text{C}$), плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$), коэффициент теплопроводности ($\text{Вт}/\text{с}^{\circ}\text{C}$), значение теплового потока ($\text{Вт}/\text{м}^2$), время работы валка (сек), ритм прокатки;

- рассчитываются приближенные потоки (значения) температуры, которые изменяются по радиусу валка и по времени, а рассчитанные данные после предварительного расчета подвергаются уточнению;

- согласно рассчитанным точным потокам (значениям) уточняется температура в каждой точке твердого тела;

– по расчетным данным строится схематическое изображение вращающегося тела, в соответствии с проградуированной шкалой температур.

Результаты работы программы, описывающие распределение температуры по сечению рабочего валка, представлены на рисунке 4.18.

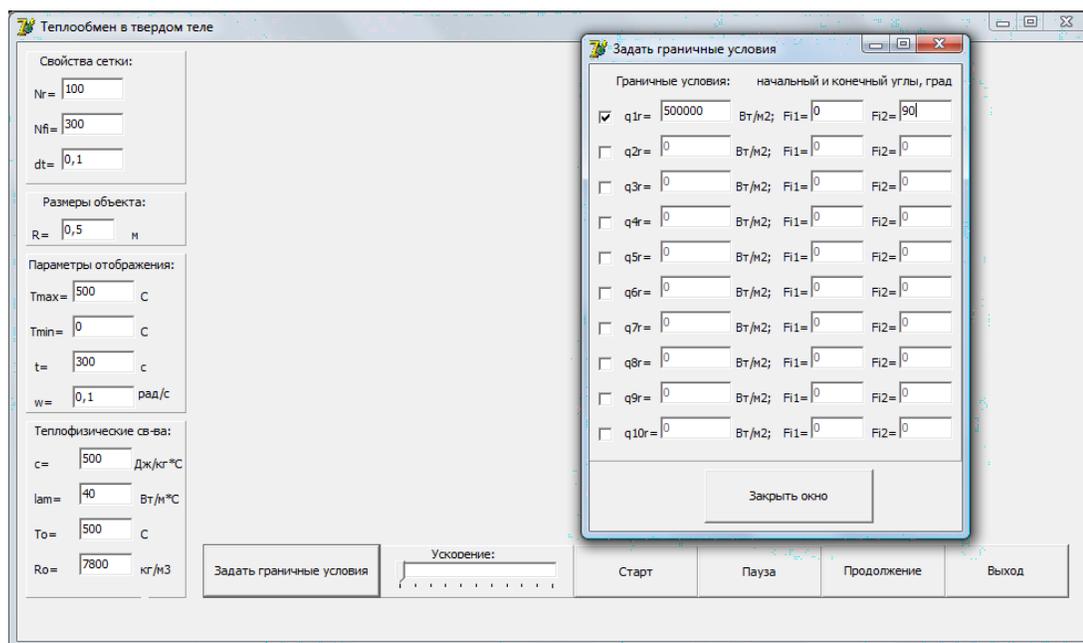
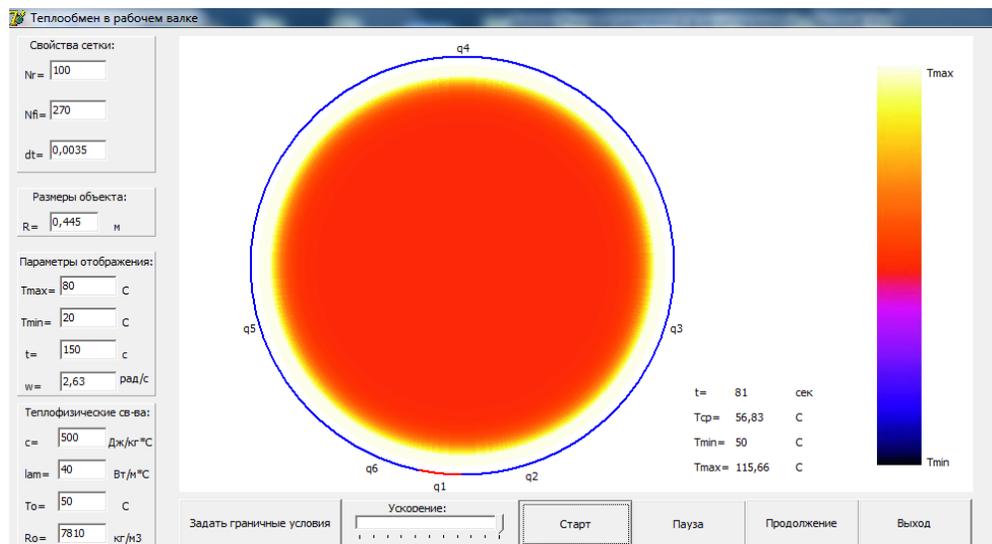


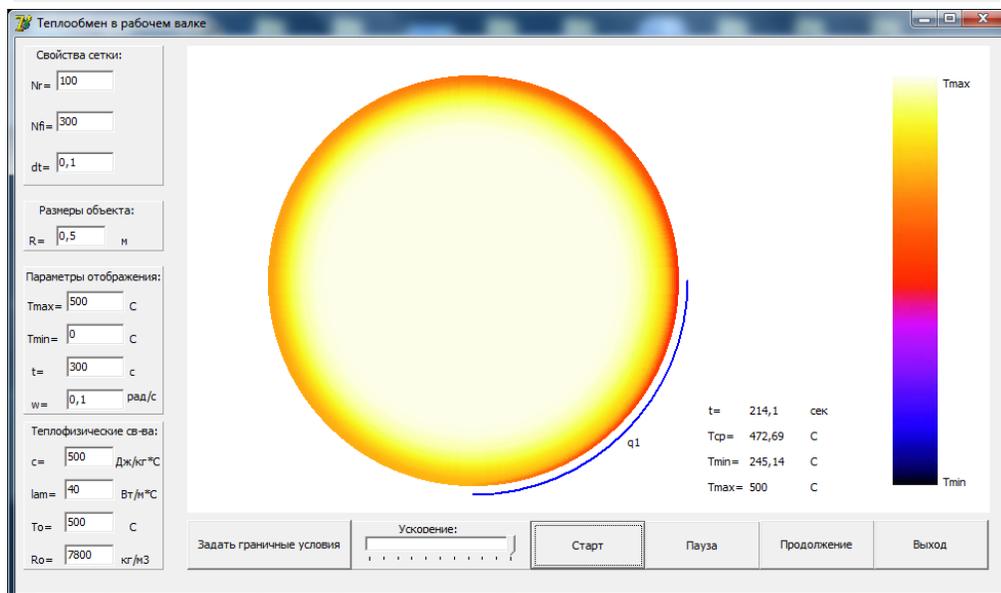
Рисунок 4.17 - Рабочее окно программного продукта для расчета теплового состояния рабочих валков

Для проведения теоретических исследований теплового состояния рабочих валков необходима графическая визуализация полученных результатов. Для этого программный продукт был дополнен расчетным блоком, рабочее окно которого приведено на рисунке 4.19. Результаты расчетов распределения температуры внутри рабочего валка в течение заданного времени представлены на рисунке 4.20.

Представленные на рисунке 4.20 зависимости описывают изменение температуры (на поверхности и во внутренних слоях) валка во времени. Для наглядности графики строятся по углу поворота валка при разных угловых скоростях. Разработанная программа позволяет определять температуру валка на следующих поверхностях:



А



Б

Рисунок 4.18 - Рабочее окно программного продукта для демонстрации результатов расчета теплового состояния рабочих валков

- $1R$ – температура валка на поверхности, $^{\circ}C$;
- $0,95R$ – температура на глубине 5% от поверхности валка, $^{\circ}C$;
- $0,1R$ – температура на глубине 10% от поверхности валка, $^{\circ}C$;
- $0,5 R$ – температура в середине валка, $^{\circ}C$;
- T_{cp} – средняя (среднеинтегральную) температура валка. $^{\circ}C$.

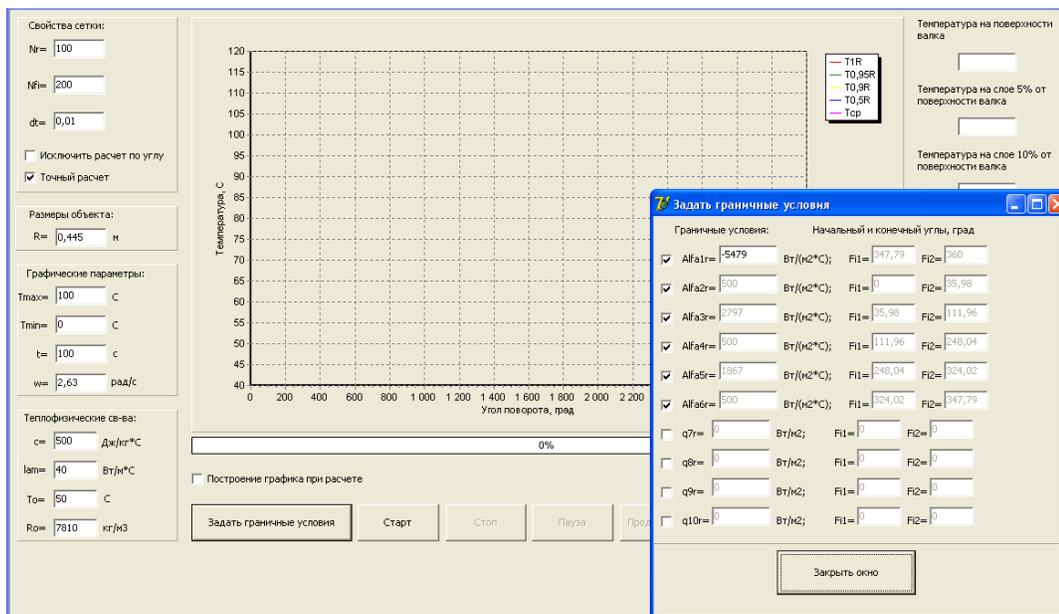


Рисунок 4.19 - Рабочее окно программного продукта для построения графическая визуализация полученных результатов

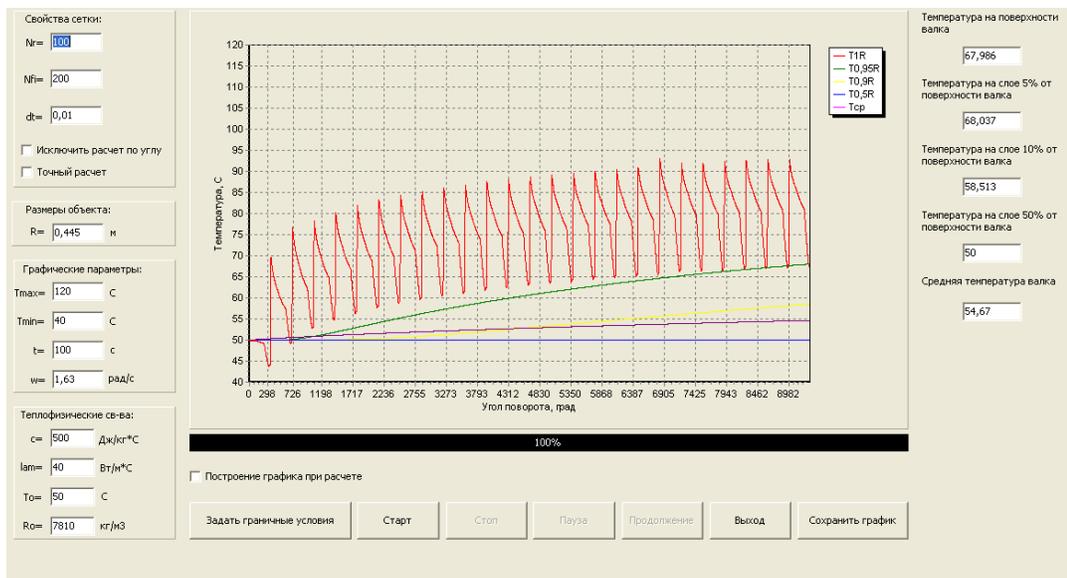


Рисунок 4.20 - Результаты расчета теплового состояния рабочих валков

На рисунках 4.21-4.23 представлены результаты теоретических исследований, описывающих изменение температуры (на поверхности и во внутренних слоях) валька от угла поворота при разных угловых скоростях.

Материал валка – быстрорежущая сталь марки 200ХВФМ. Прокатываемая полоса из стали марки Ст3кп по ГОСТ 380-94. Температура прокатываемой полосы: 1020 °С.

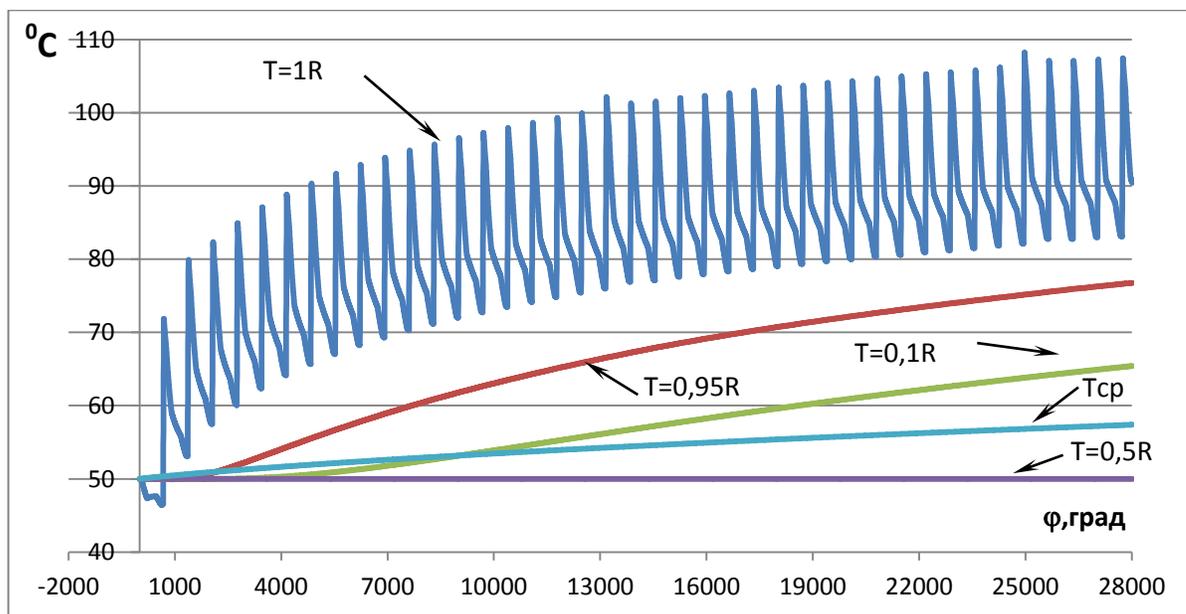


Рисунок 4.21 - График распределения температуры рабочего валка при $\omega=0,1$ рад/с

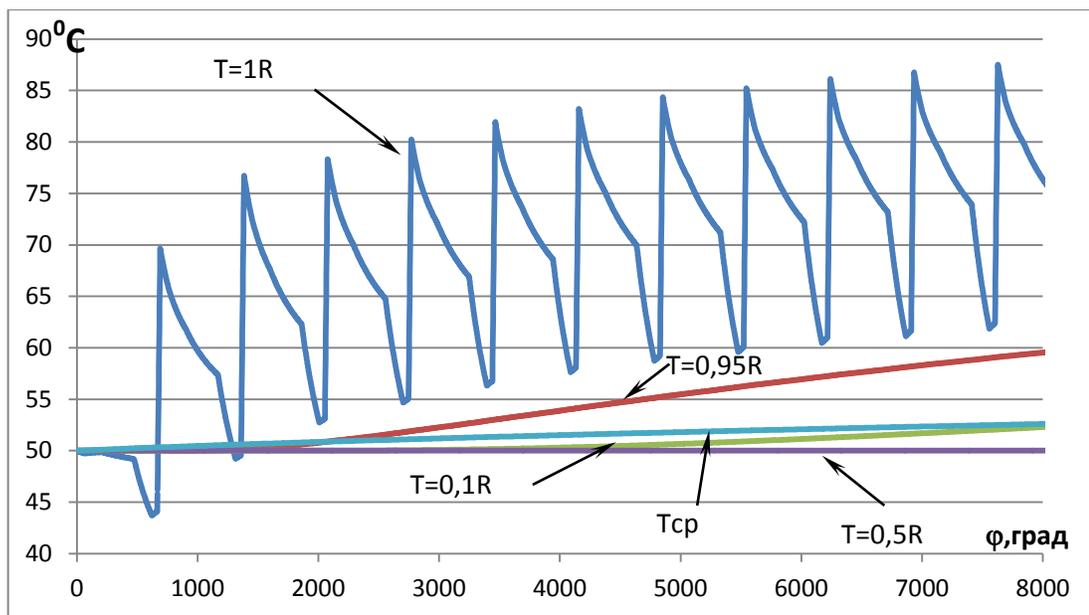


Рисунок 4.22 - График распределения температуры рабочего валка при $\omega=0,2$ рад/с

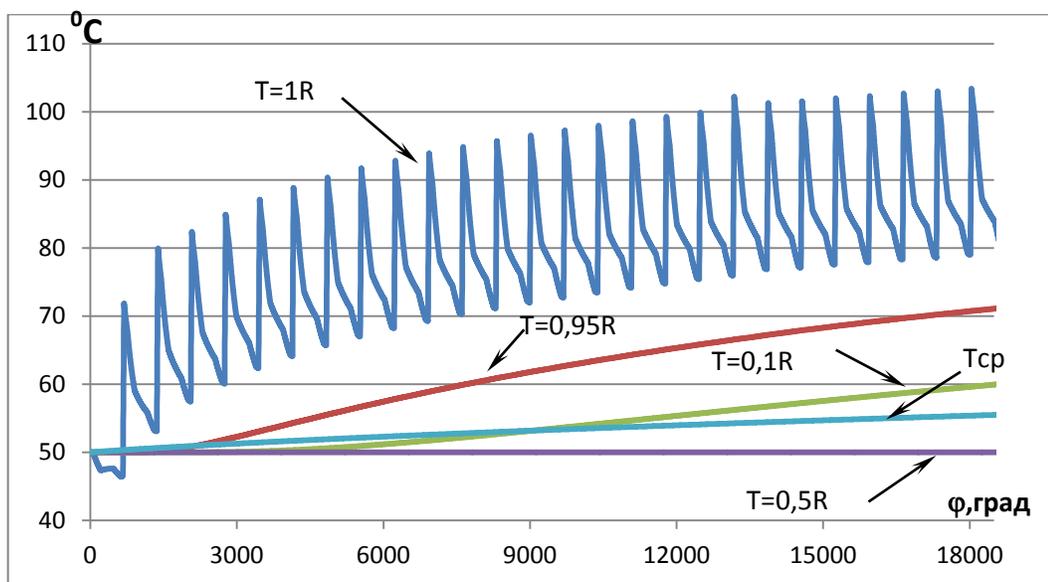


Рисунок 4.23 - График распределения температуры рабочего валка при $\omega=0,25$ рад/с

Анализ теоретически полученных распределений температур на поверхности и во внутренних слоях рабочих валков показывает, что температура на поверхности валка ($T=1R$) имеет характерное скачкообразное значение. Это объясняется прохождением исследуемой точки валка различных зон. В зоне контакта с листом поверхность нагревается, а в зонах охлаждения водой – остывает. При увеличении числа оборотов температура стремится к определенному тепловому равновесию и установлению определенного значения температуры рабочих валков.

4.2.2 Оценка достоверности разработанной математической модели теплового состояния рабочих валков

Проверка достоверности разработанной математической модели теплового состояния рабочих валков производилась путем сравнения экспериментальных и расчетных данных.

Сравнительный анализ производился на двух листовых станах горячей прокатки: 2500 и 2000 ПАО «ММК». В процессе анализа производилось сравнение с результатами контрольных замеров, полученных при съемке

рабочих валков сразу после их вывалки из клетей. Съемка рабочих валков производилась при помощи тепловизора модели SDS-Infrared HotFind-DXT. Результаты измерений представлены на рисунках 4.24 –4.27.

На представленных рисунках с тепловизионной съемкой рабочих валков отмечены контрольные точки, по которым происходило сравнение расчетных и измеренных параметров. Поскольку математическая модель рассчитывает только двумерный характер распределения температуры рабочих валков, сравнительный анализ производился по максимальной точке нагрева – центр бочки рабочего валка.

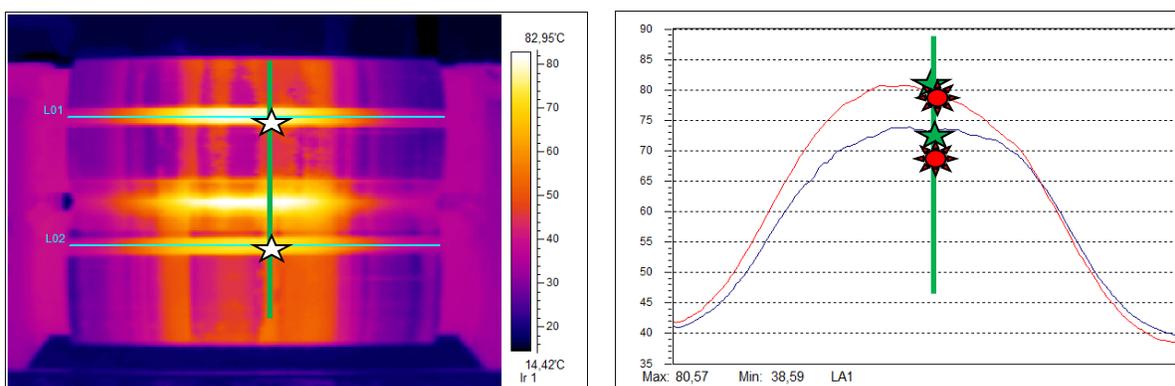


Рисунок 4.24 - Оценка достоверности расчетных и экспериментальных данных

На примере клеть №9 стан 2500 г.п. ПАО «ММК».

- ★ Измеренная температура: нижний валок– 81⁰С; верхний валок 76⁰С;
- ★ Расчетная температура: нижний валок– 73⁰С; верхний валок 70⁰С.

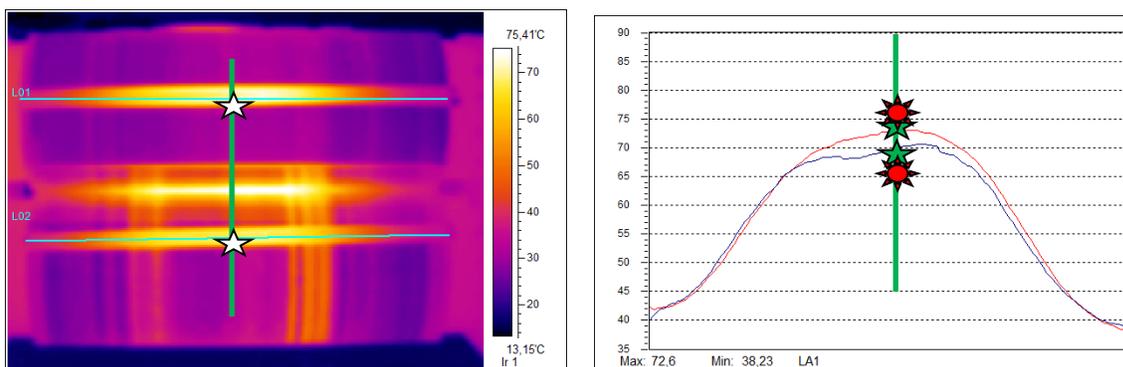


Рисунок 4.25 - Оценка достоверности расчетных и экспериментальных данных

На примере клеть №11 стан 2500 г.п. ПАО «ММК».

- ★ Измеренная температура: нижний валок– 70⁰С; верхний валок 73⁰С;
- ★ Расчетная температура: нижний валок– 65⁰С; верхний валок 77⁰С.

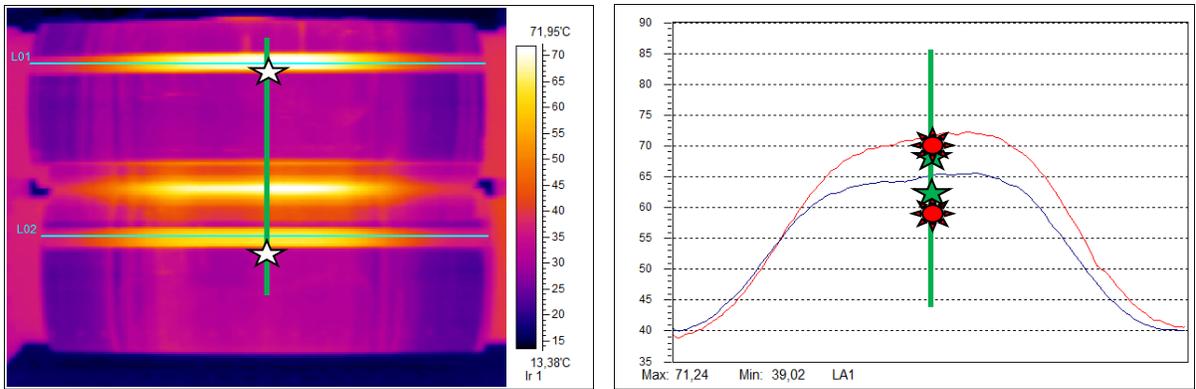


Рисунок 4.26 - Оценка достоверности расчетных и экспериментальных данных
На примере клеть №6 стан 2000 г.п. ПАО «ММК».

- ★ Измеренная температура: нижний валок– 65⁰С; верхний валок 71⁰С;
- ★ Расчетная температура: нижний валок– 60⁰С; верхний валок 75⁰С.

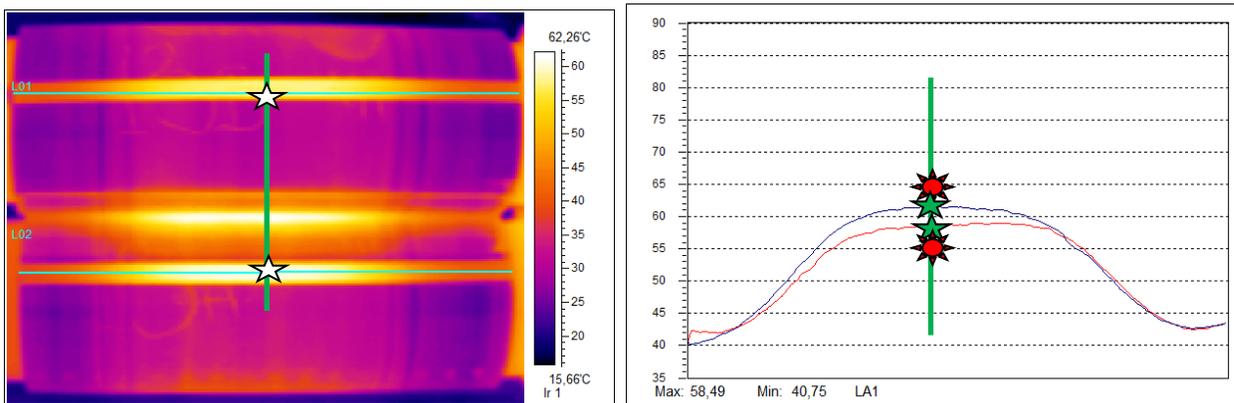


Рисунок 4.27 - Оценка достоверности расчетных и экспериментальных данных
На примере клеть №13 стан 2000 г.п. ПАО «ММК».

- ★ Измеренная температура: нижний валок– 55⁰С; верхний валок 62⁰С;
- ★ Расчетная температура: нижний валок– 50⁰С; верхний валок 70⁰С.

Сравнительному анализу было подвергнуто более 10 пар прокатных валков. Средняя относительная ошибка между измеренными и расчетными значениями не превышает 17 % (для стана 2000 г.п. ПАО ММК), что позволяет считать разработанную математическую модель теплового состояния рабочих валков достоверной (для стана 2500 г.п. ПАО ММК средняя относительная ошибка не превысила 21%).

4.2.3 Выводы по результатам моделирования теплового состояния рабочих валков

1. Для листовых станов горячей прокатки разработана и численно реализована математическая модель, описывающая тепловое состояние рабочих валков. В основу модели заложено уравнение теплопроводности в полярной системе координат. Численная реализация модели теплового состояния рабочих валков производилась методом независимых потоков.

2. Реализованная математическая модель теплового состояния рабочих валков позволяет исследовать изменение температуры (на поверхности и во внутренних слоях) валков в различных интервалах времени. Разработана программа для ЭВМ, которая позволяет определять среднюю температуру, температуру поверхности, а также температуру во внутренних слоях валка на следующих глубинах: 5%, 10% и 50% [249,250,254].

3. Разработанный математический алгоритм определяет максимальную точку нагрева – центр бочки рабочего валка. Расчет распределения температуры по длине бочки валка реализуется решением серии частных двумерных задач для нескольких параллельных сечений валка. Для каждой частной задачи необходимо задавать новые граничные условия.

4. Оценка достоверности разработанной математической модели теплового состояния рабочих валков производилась путем сравнения экспериментальных (теповизионных) и расчетных данных на примере двух листовых станов горячей прокатки: 2000 и 2500 ПАО «ММК». Результаты сравнительного анализа показали, что средняя относительная ошибка расчетов по математической модели не превышает 17 и 21% соответственно.

Результаты математического моделирования теплового состояния рабочих валков необходимо использовать для решения третьей поставленной задачи – разработка принципов совершенствования оборудования и применения технологии эффективного охлаждения для системы «рабочий валок – полоса».

4.3 Разработка принципов совершенствования оборудования и применения технологии эффективного охлаждения для системы «рабочий валок – полоса»

Целью исследования является поиск эффективных подходов и применения технологии эффективного охлаждения путем определения рационального геометрического положения коллекторов охлаждения для системы «рабочий валок – полоса» для достижения максимального теплосъема с поверхности рабочих валков.

Объектом исследования являются непрерывные черновые и чистовые группы клетей листовых станов горячей прокатки.

Определение рационального расположения коллекторов охлаждения для системы «рабочий валок – полоса» было проведено при помощи специально разработанной методики.

Предлагаемая методика базируется на проведении теоретических экспериментов на разработанной математической модели теплового состояния прокатываемой полосы и рабочих валков. Порядок постановки и проведения серии теоретических экспериментов определяется согласно теории планирования эксперимента [183]. Численная реализация экспериментов производилась в разработанных программных продуктах [249,250].

На первом этапе исследования реализована серия однофакторных экспериментов. По результатам экспериментов определены основные технологические факторы, оказывающие воздействие на тепловое состояние в системе «рабочий валок – полоса», и степени их влияния. Управление теплосъемом с поверхности рабочих валков наиболее рационально обеспечивается изменением факторов:

– положение коллекторов подачи охладителя: координаты (X , мм), (Y , мм), угол наклона (φ , град);

- угол раскрытия и угол перекрытия форсунок, град;
- количество рядов форсунок n , шт;
- давление в системе подачи охладителя, МПа.

Расчетная схема приведена на рисунке 4.28.

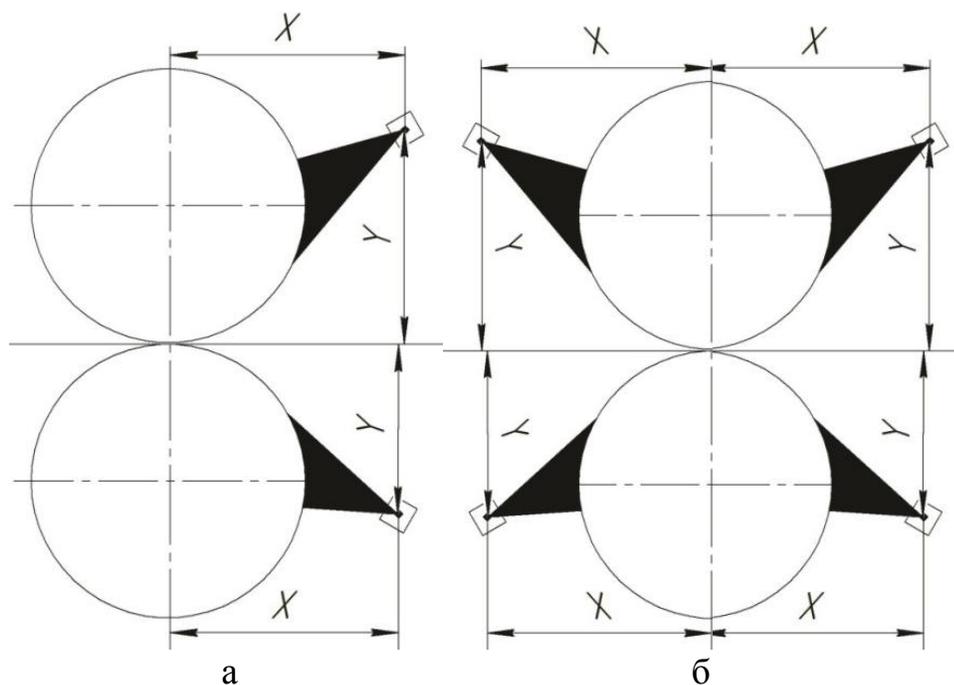


Рисунок 4.28 - Расчетная схема для определения геометрического положения коллекторов подачи охлаждения листовых станов горячей прокатки.
 а – в непрерывной черновой группе клеток; б – в непрерывной чистовой группе клеток.

На втором этапе исследования было принято решение о построении математических моделей второго порядка для наиболее значимых факторов с использованием планов ОЦКП [251,252,253,254,255,256,257]. Факторы и диапазоны варьирования, приведены в таблицах 4.6-4.8.

Таблица 4.6 - Значения факторов в натуральном виде для непрерывной черновой группы клетей листовых станов горячей прокатки.

Координаты для коллекторов охлаждения верхних и нижних рабочих валков

Факторы	Давление в системе, МПа	Координата X, мм	Координата Y, мм	Угол наклона коллектора φ, град.
Кодировка	X₁	X₂	X₃	X₄
Основной уровень X ₀	1,4	400	600	40
Интервал варьирования ΔX	0,4	140	140	8
Верхний уровень X ₀ +ΔX (+1)	2,0	640	740	48
Нижний уровень X ₀ -ΔX (-1)	1,0	340	460	32
Положительное плечо звездной точки (+α)	2,207	712,1	812,1	41,312
Отрицательное плечо звездной точки (-α)	0,793	287,9	387,9	28,688

Таблица 4.7 - Значения факторов в натуральном виде для непрерывной чистовой группы клетей листовых станов горячей прокатки.

Координаты для коллекторов охлаждения верхних рабочих валков

Факторы	Давление в системе P, МПа	Координата X, мм	Координата Y, мм	Угол наклона коллектора φ, ° град.
Кодировка	X₄	X₁	X₂	X₃
Основной уровень X ₀	1,9	630	660	34,4
Интервал варьирования ΔX	1	280	270	22,4
Верхний уровень X ₀ +ΔX (+1)	2,9	910	930	48
Нижний уровень X ₀ -ΔX (-1)	0,9	340	390	13
Положительное плечо звездной точки (+α)	3,314	1024,92	1041,78	67,314
Отрицательное плечо звездной точки (-α)	0,486	234,08	278,22	3,684

Таблица 4.8 - Значения факторов в натуральном виде для непрерывной чистовой группы клетей листовых станов горячей прокатки.

Координаты для коллекторов охлаждения нижних рабочих валков

Факторы	Давление в системе, Р МПа	Координата X, мм	Координата Y, мм	Угол наклона коллектора φ, град.
Кодировка	X_4	X_1	X_2	X_3
Основной уровень X_0	1,74	640	720	27
Интервал варьирования ΔX	0,84	170	170	17
Верхний уровень $X_0 + \Delta X$ (+1)	2,6	810	890	44
Нижний уровень $X_0 - \Delta X$ (-1)	0,9	470	440	10
Положительное плечо звездной точки (+ α)	2,9419	880,38	960,38	41,038
Отрицательное плечо звездной точки (- α)	0,4481	399,62	479,62	2,962

Численная реализация модели

Для построения математической модели была построена матрица экспериментов, включающая в себя 25 опытов. В качестве отклика (Y) было выбрано расчетное максимальное значение температуры рабочих валков в центре бочки T, °C.

В таблице 4.9 приведены результаты опытов по реализуемому плану. Для проверки статистической значимости реализуемой модели каждый опыт дублировали минимум три раза.

Таблица 4.9 - Результаты теоретических экспериментов

№ опыта	Y (черновая)	Y (чистовая; верхние)	Y (чистовая; нижние)
1	74,4	97	72
2	77,2	94	74
3	74,2	96	76
4	70,2	97	74
4	72,3	98	70
6	74,7	93	74
7	74,4	94	73
8	60,8	97	74
9	66,3	74	74
10	67,8	83	72
11	72,7	80	70
12	68,4	83	74
13	77,8	78	64
14	66,3	80	67
14	76,3	82	72
16	74,8	78	76
17	77,2	97	64
18	69,4	87	67
19	74,6	84	72
20	72,3	88	70
21	71,2	83	74
22	68,0	80	73
23	76,2	90	70
24	74,2	79	72
25	74,8	81	64

Определение коэффициентов уравнений регрессии производился в кодированном виде. Оценка статистической значимости входящих в уравнения коэффициентов b_{0i} , b_i , b_{ii} , b_{ii}^2 проведена по критерию Стьюдента при 95% уровне значимости.

Для перевода факторов из кодированных значений к натуральным величинам были использованы зависимости, представленные в таблице 4.10.

Проверка адекватности полученных моделей была проведена по критерию Фишера и среднеквадратичному отклонению. По результатам проверки все модели признаны адекватными.

Таблица 4.10 - Зависимости для перевода уравнений в натуральный вид

Фактор	T (черновая; верх; низ)	T (чистовая; верх)	T (чистовая; низ)
X_1	$x_1 = \frac{X_1 - 2}{1}$	$x_1 = \frac{X_1 - 630}{280}$	$x_1 = \frac{X_1 - 810}{470}$
X_2	$x_2 = \frac{X_2 - 650}{350}$	$x_2 = \frac{X_2 - 660}{270}$	$x_2 = \frac{X_2 - 890}{550}$
X_3	$x_3 = \frac{X_3 - 750}{450}$	$x_3 = \frac{X_3 - 35,5}{22,5}$	$x_3 = \frac{X_3 - 44}{10}$
X_4	$x_4 = \frac{X_3 - 48}{32}$	$x_4 = \frac{X_4 - 1,9}{1}$	$x_4 = \frac{X_4 - 2,6}{0,9}$

Температура рабочих валков в непрерывной черновой группе клетей.

Коллектора охлаждения верхних и нижних рабочих валков.

$$T(\text{черновая; верх; низ})(Q, X, Y, \varphi) = 87,191 - 44,2P - 18,2X - 62,1Y - 20,5\varphi + 27,1PX + 71,4PY + \\ + 56,5P\varphi + 30,2XY + 12,2X\varphi + 42Y\varphi - 32,01X^2 - 19,1Y^2 + 27,3\varphi^2 + 49,0P^2 \quad (4.50) \\ (R^2 = 0,85; F_{0,95;7}^{\text{расч}} = 205,7 \geq F^{\text{табл}} = 22,6)$$

Температура рабочих валков в непрерывной чистовой группе клетей.

Коллектора охлаждения верхних рабочих валков.

$$T(\text{чистовая; верх})(X, Y, \varphi, Q) = 133,2 - 36,2X - 26,2Y - 20,6\varphi - 32,6P - 12,1XY + \\ + 17,7X\varphi - 23,1XP + 24,8Y\varphi + 28,9YQ + 14,2\varphi P + 22,31X^2 - 18,80Y^2 - 22,7\varphi^2 + 62,5P^2 \quad (4.51) \\ (R^2 = 0,86; F_{0,95;7}^{\text{расч}} = 235,8 \geq F^{\text{табл}} = 21,3)$$

Коллектора охлаждения нижних рабочих валков.

$$T(\text{чист; низ})(X, Y, \varphi, Q) = 137,9 - 63,7X - 28,3Y - 29,6\varphi - 32,9P - 19,1XY + 15,2X\varphi \\ - 23,7XP + 34,4Y\varphi + 22,1YP + 14,2\varphi P - 37,11X^2 - 23,4Y^2 - 32,1\varphi^2 + 46,2P^2 \quad (4.52) \\ (R^2 = 0,85; F_{0,95;7}^{\text{расч}} = 223,7 \geq F^{\text{табл}} = 19,8)$$

По полученным уравнениям были построены графики, представленные на рисунке 4.29,4.30.

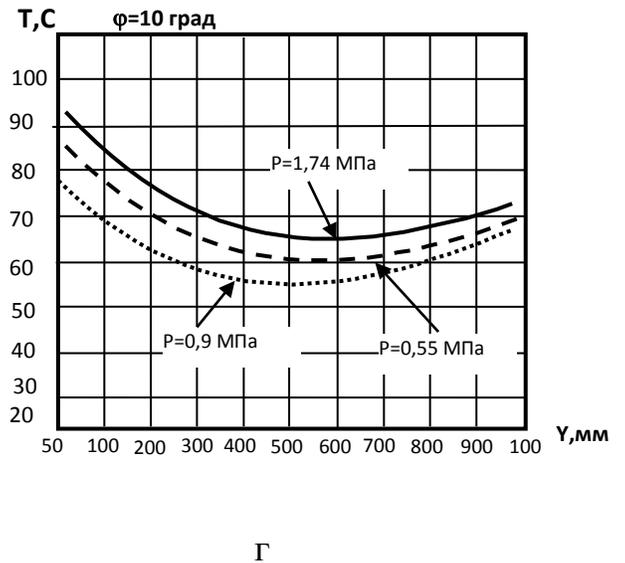
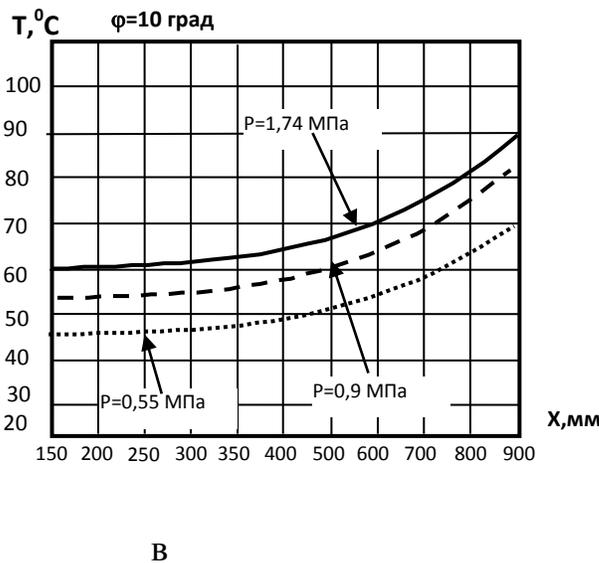
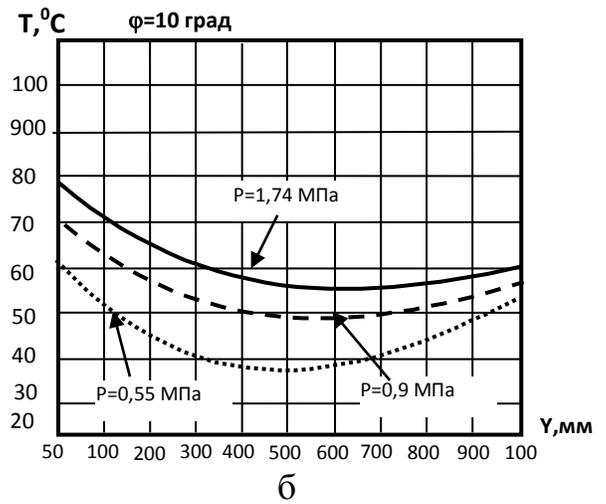
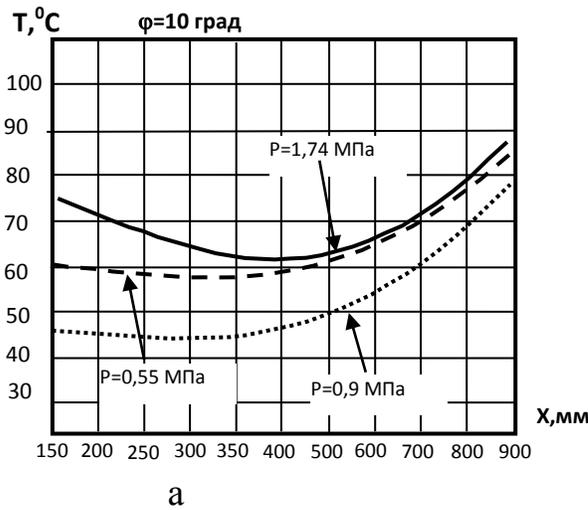


Рисунок 4.29 - Зависимости, описывающие изменение температуры рабочих валков в зависимости от различного положения коллекторов системы охлаждения по координате X (мм) и координате Y (мм) при различных параметрах давления в системе подачи охладителя P (МПа) и угле наклона коллектора φ (град):

- а, б – температура рабочих валков в непрерывной черновой группе клеток;
- в, г – температура рабочих валков в непрерывной чистой группе клеток при охлаждении верхних рабочих валков.

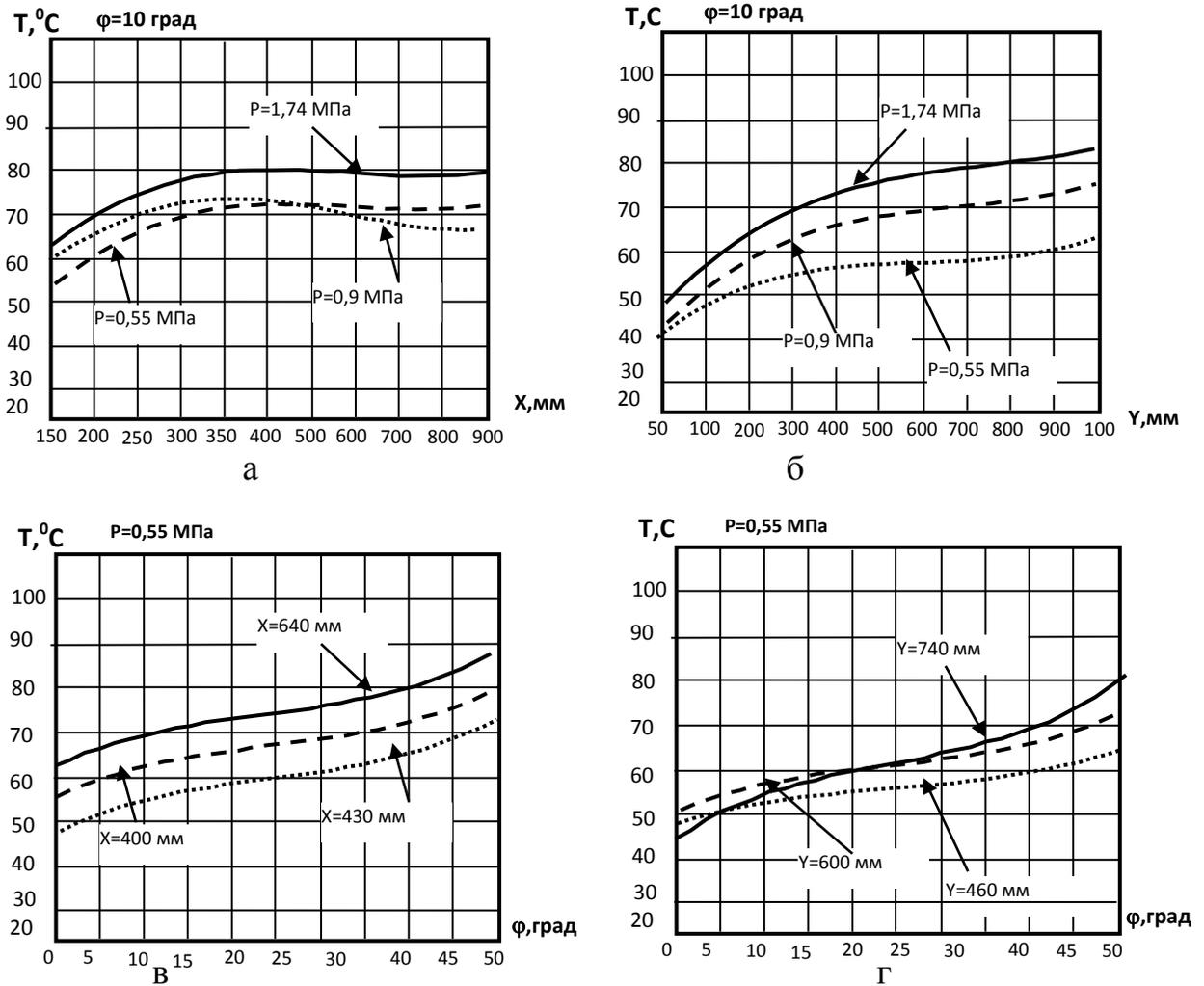


Рисунок 4.30 - Зависимости, описывающие изменение температуры рабочих валков в зависимости от различного положения коллекторов системы охлаждения по координате X (мм) и координате Y (мм) при различных параметрах давления в системе подачи охладителя P (МПа) и угле наклона коллектора ϕ (град):

- а, б – температура рабочих валков в непрерывной чистой группе клеток при охлаждении нижних рабочих валков;
- в, г – температура рабочих валков в непрерывной черновой группе клеток при изменении угла наклона коллектора ϕ (град).

Анализ полученных результатов исследований позволяет сделать следующие **выводы**

1. Анализ выражений (4.50-4.52) показывает, что наибольшее влияние на исследуемую величину ($T, ^\circ\text{C}$) оказывает фактор Q – давление в системе подачи охладителя, МПа. Анализ графиков позволяет сделать вывод, что наиболее предпочтительно выбирать фактор Q в диапазоне 0,9...1,63МПа. Следует отметить, что фактор (Q) в уравнениях (4.50-4.52), кроме влияния на исследуемую величину ($T, ^\circ\text{C}$), участвует во всех коэффициентах парной корреляции, что говорит о наличии корреляционной взаимосвязи исследуемых факторов.

2. Анализ выражений (4.50–5.52) показывает, что все исследуемые факторы оказывают влияние на изменение температуры верхнего и нижнего рабочих валков. Анализ результатов исследований показывает, что для достижения минимальной температуры рабочих валков рекомендуется выбирать следующие параметры:

Для непрерывной черновой группы клетей:

- положение коллектора по координате $X= 450..550$ мм;
- положение коллектора по координате $Y= 350...700$ мм;
- угол наклона коллектора $\varphi= 18...32$ град.

Для непрерывной чистовой группы клетей при охлаждении верхних рабочих валков:

- положение коллектора по координате $X= 490...620$ мм;
- положение коллектора по координате $Y= 600...750$ мм;
- угол наклона коллектора $\varphi= 37...50$ град.

Для непрерывной чистовой группы клетей при охлаждении нижних рабочих валков:

- положение коллектора по координате $X= 450...690$ мм;
- положение коллектора по координате $Y= 480...650$ мм;

– угол наклона коллектора $\varphi = 32 \dots 47$ град.

Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что исследуемые функции, описанные уравнениями (4.50)–(5.52), являются статистически адекватными.

Для поиска оптимальных значений параметров, исследуемых в эксперименте, была использована методика, приведённая в работе [71].

В качестве исследуемой функции были выбраны следующие параметры:

- температура рабочих валков в непрерывной черновой группе клеток - $T(\text{черновая}), ^\circ\text{C}$;
- температура верхних рабочих валков в непрерывной чистовой группе клеток - $T(\text{чистовая; верх}), ^\circ\text{C}$;
- температура нижних рабочих валков в непрерывной чистовой группе клеток - $T(\text{чистовая; нижн}), ^\circ\text{C}$.

Расчет параметров проводился для уравнений, полученных в кодированном виде. Математическое решение поставленной задачи сводилось к выражениям:

$$\begin{aligned}
 & T(\text{черновая}) \\
 & (Q, X, Y, \varphi) \rightarrow \min \left\{ \begin{aligned}
 & \frac{\partial y_{4-6}}{\partial x_1} = 2,111 + 1,95x_2 - 1,2x_3 + 1,75x_2x_4 + 1,625x_2x_3x_4 - 0,98x_1 = 0 \\
 & \frac{\partial y_{4-6}}{\partial x_2} = -0,433 + 1,95x_1 + 2,01x_4 + 1,75x_1x_4 + 1,087x_3x_4 + 1,625x_1x_3x_4 - 0,82x_2 = 0 \\
 & \frac{\partial y_{4-6}}{\partial x_3} = -1,2x_1 + 2,175x_4 + 1,08x_2x_4 + 1,625x_1x_2x_4 - 4,68x_3 = 0 \\
 & \frac{\partial y_{4-6}}{\partial x_4} = -0,610 + 2,012x_2 + 2,175x_3 + 1,75x_1x_2 + 1,087x_2x_3 + 1,625x_1x_2x_3 + 1,418x_4 = 0
 \end{aligned} \right. \quad (4.53)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & T(\text{чистовая; верх}) \\
 & (Q, X, Y, \varphi) \rightarrow \min \left\{ \begin{aligned}
 & \frac{\partial y_{7-10}}{\partial x_1} = -0,937x_3 + 0,812x_4 - 1,312x_2x_4 - 0,687x_3x_4 + 8,242x_1 = 0 \\
 & \frac{\partial y_{7-10}}{\partial x_2} = 0,662 - 1,312x_2x_4 + 2,74x_2 = 0 \\
 & \frac{\partial y_{7-10}}{\partial x_3} = -0,937x_1 - 0,687x_1x_4 - 2,258x_3 = 0 \\
 & \frac{\partial y_{7-10}}{\partial x_4} = -7,228 + 0,812x_1 - 1,312x_1x_2 - 0,687x_1x_3 + 1,24x_4 = 0
 \end{aligned} \right. \quad (4.54)
 \end{aligned}$$

$$T(\text{чистовая; низ})(Q, X, Y, \varphi) \rightarrow \min \begin{cases} \frac{\partial y_{11-13}}{\partial x_1} = -0,81x_2 + 1,06x_2x_4 - 1,62x_1 = 0 \\ \frac{\partial y_{11-13}}{\partial x_2} = -0,81x_1 + 1,06x_3x_4 + 3,52x_2 = -0,81 \\ \frac{\partial y_{11-13}}{\partial x_3} = 1,06x_2 + 1,31x_2x_4 + 6,52x_3 = 0,89 \\ \frac{\partial y_{11-13}}{\partial x_4} = 1,06x_1x_2 + 1,31x_2x_3 + 3,52x_4 = 0 \end{cases} \quad (4.55)$$

Практическое решение задачи оптимизации представлено в таблице 4.11 в виде определенных координат центра, записанных в кодированном и натуральном виде для каждой поверхности отклика.

Таблица 4.11 - Результаты поиска оптимальных значений по уравнениям второго порядка

	Безразмерные параметры				Размерные параметры				Функция отклика
	x_1	x_2	x_3	x_4	X_1	X_2	X_3	X_4	$\frac{y}{T^0C}$
Черновая группа клеток	0,48	0,46	0,42	0,712	124,7	416,0	664,4	37,69	74,77
Чистовая группа клеток (верхние рабочие валки)	0,93	2,78	2,31	6,776	891,42	412,8	-16,4	8,67	144,63
Чистовая группа клеток (нижние рабочие валки)	0,10	0,20	0,171	0,019	647	684,98	29,90	1,76	66,912

Таким образом, на основе результатов теоретических исследований для обеспечения максимального теплосъема с поверхности рабочих валков получены рекомендации для установки коллекторов охлаждения.

4.4 Методология комплексного функционирования системы «рабочий валок – полоса», совершенствование технологии и оборудования охлаждения валков листовых станов горячей прокатки

Математическое моделирование процессов принудительного охлаждения в системе «рабочий валок – полоса», а также результаты теоретических, экспериментальных и промышленных исследований позволили разработать методологию (рисунок 4.31), реализация которой направлена на разработку и внедрения эффективных режимов подачи охладителя на поверхность рабочих валков и полосы.

Методология представлена и реализована как комплекс эффективных технических и технологических методов и средств, направленных на развитие технологии и совершенствование оборудования, обеспечивающих получение продукции заданного уровня свойств при одновременном снижении ресурсоёмкости при производстве ЛГП.

В основу построения и реализации методологии заложен комплексный подход, основанный на последовательном проведении процесса моделирования, численной реализации с применением современных программных средства и апробации результатов исследований для условий действующих листовых станов горячей прокатки.

Предложенная методология позволяет на различных этапах исследования назначать эффективные режимы подачи охладителя валков и полосы, обеспечивая снижение ресурсоёмкости при производстве листового горячекатаного проката.

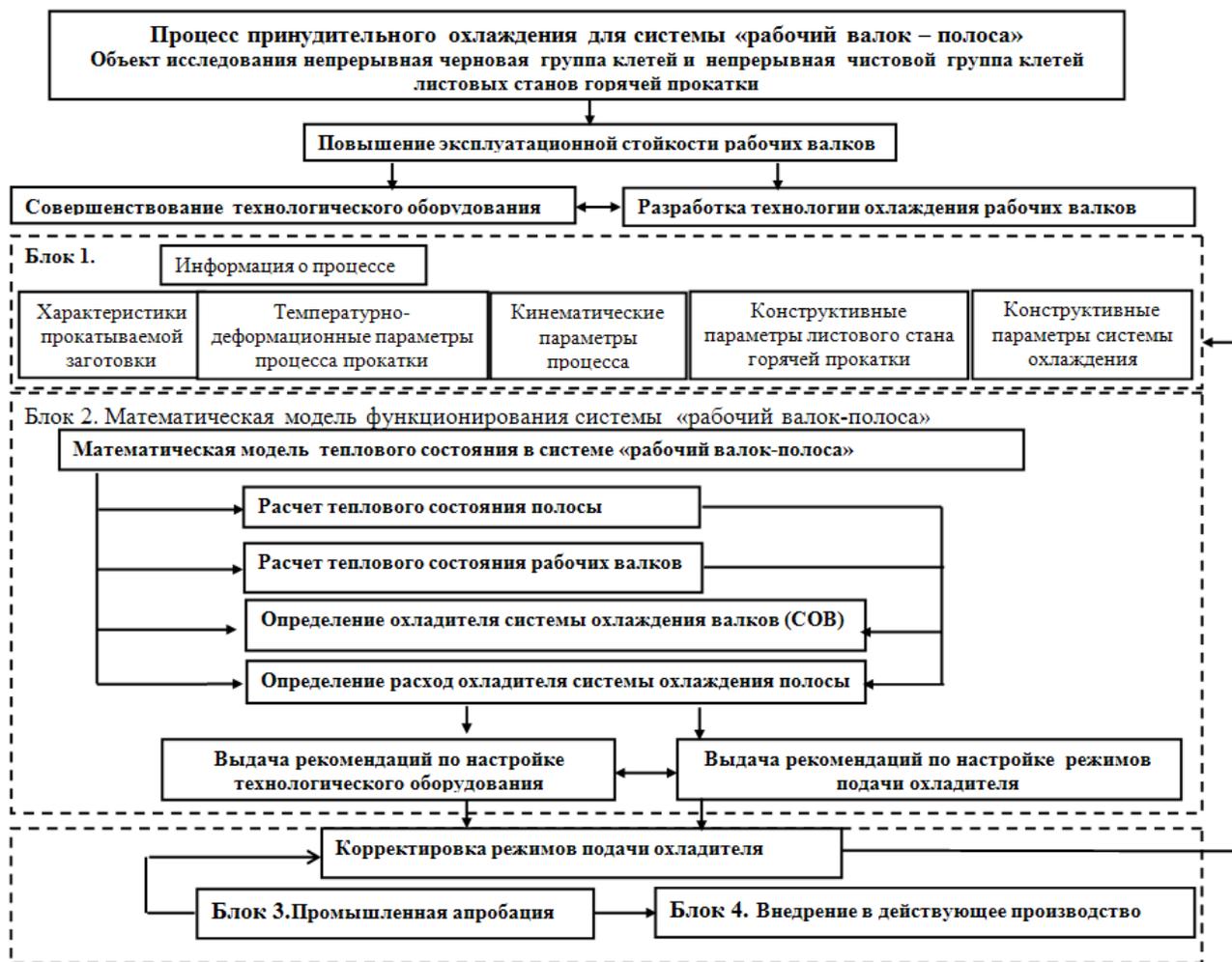


Рисунок 4.31 - Методология исследования системы «рабочий валок – полоса» для технологии принудительного охлаждения рабочих валков и полосы

Выводы по четвертой главе

Разработана и численно реализована математическая модель теплового состояния прокатываемой полосы. В реализованной математической модели учтено влияние следующих технологических особенностей процесса листовой горячей прокатки: теплообмен полосы с валками; объемное тепловыделение при пластической деформации полосы; изменение теплового состояния полосы с учетом работы технологических систем: гидрудаления окалины, межклетевого охлаждения, а также принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации.

1. Проведены теоретические и экспериментальные исследования основных закономерностей формирования температурных условий процесса листовой горячей прокатки. На основе метода теплового баланса исследован вклад внешних и внутренних факторов в тепловое состояние прокатываемой полосы. Для технологии листовой горячей прокатки произведена оценка источников тепла, которая показала, что влияние внешних факторов составляет:

- влияние внешних факторов на потери тепла: теплоотдача излучением (радиационные потери) до 75%; на гидросбивах до 12%; кондуктивный теплообмен с валками до 20%; конвективная теплоотдача менее 3% и кондуктивные потери при контакте с роликами в межвалковом участке менее 3%;
- влияние внутренних факторов: в прокатываемой заготовке наблюдается приращение тепла за счет протекающих процессов тепловыделения (деформационный разогрев) при пластической деформации, которое составляет до 9%.

2. Оценка достоверности разработанной математической модели теплового состояния полосы производилась путем сравнения экспериментальных и расчетных данных на примере двух листовых станов горячей прокатки: 2500 и 2000 ПАО «ММК». Результаты сравнительного анализа показали, что

диапазон расхождения между экспериментальными и теоретическими данными составляет 8...21%.

3. Для листовых станов горячей прокатки разработана и численно реализована математическая модель, описывающая тепловое состояние рабочих валков. В основу модели заложено уравнение теплопроводности в полярной системе координат. Численная реализация модели теплового состояния рабочих валков производилась методом независимых потоков.
4. Реализованная математическая модель теплового состояния рабочих валков позволяет исследовать изменение температуры (на поверхности и во внутренних слоях) валков в различных интервалах времени. Разработана программа для ЭВМ, которая позволяет определять среднюю температуру, температуру поверхности, а также температуру во внутренних слоях вала на следующих глубинах: 5%, 10% и 50%.
5. Разработанный математический алгоритм позволяет определять максимальную точку нагрева – центр бочки рабочего вала. Расчет распределения температуры по длине бочки вала реализуется решением серии частных двумерных задач для нескольких параллельных сечений вала. Для каждой частной задачи необходимо задавать новые граничные условия.
6. Оценка достоверности разработанной математической модели теплового состояния рабочих валков производилась путем сравнения экспериментальных (теповизионных) и расчетных данных на примере двух листовых станов горячей прокатки: 2500 и 2000 ПАО «ММК». Результаты сравнительного анализа показали, что средняя относительная ошибка расчетов по математической модели не превышает 21 и 17% соответственно для станов 2500 и 2000 ПАО «ММК».
7. Разработаны принципы совершенствования оборудования и технологии эффективного охлаждения для системы «рабочий валок – полоса». Для достижения максимального теплосъема с поверхности рабочих валков для

системы «рабочий валок – полоса» предложена специальная методика определения рационального расположения коллекторов охлаждения.

8. На основе регрессионного анализа получены зависимости, позволяющие производить настройку коллекторов систем охлаждения рабочих валков для непрерывных черновой и чистовой групп клетей листовых станов горячей прокатки. Анализ результатов исследований показывает, что для достижения минимальной температуры рабочих валков рекомендуется выбирать следующие параметры:

Для непрерывной черновой группы клетей:

- положение коллектора по координате $X = 450 \dots 550$ мм;
- положение коллектора по координате $Y = 350 \dots 700$ мм;
- угол наклона коллектора $\varphi = 18 \dots 32$ град.

Для непрерывной чистовой группы клетей при охлаждении верхних рабочих валков:

- положение коллектора по координате $X = 490 \dots 620$ мм;
- положение коллектора по координате $Y = 600 \dots 750$ мм;
- угол наклона коллектора $\varphi = 37 \dots 50$ град.

Для непрерывной чистовой группы клетей при охлаждении нижних рабочих валков:

- положение коллектора по координате $X = 450 \dots 690$ мм;
- положение коллектора по координате $Y = 480 \dots 650$ мм;
- угол наклона коллектора $\varphi = 32 \dots 47$ град.

9. Предложена и разработана методология функционирования процесса принудительного охлаждения для системы «рабочий валок – полоса» как комплекс эффективных технических и технологических методов и средств, направленных на развитие технологии и совершенствование оборудования, обеспечивающих получение продукции заданного уровня свойств при одновременном снижении ресурсоёмкости при производстве ЛГП. Предложенная методология позволяет на различных этапах исследования позволяет назначать эффективные режимы охлаждения валков и полосы.

5. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИСТОВОГО ГОРЯЧЕКАТАНОГО ПРОКАТА

В данном разделе диссертации приведены основные результаты диссертационных исследований, заключающихся в разработке новых технических и технологических решений, реализация которых направлена на снижение ресурсоёмкости производства ЛГП, выражающейся в сокращении энергетических затрат и повышении эксплуатационной стойкости рабочих валков.

5.1 Разработка комплексной математической модели для определения режимов смазывания и охлаждения рабочих валков при производстве листового горячекатаного проката

По результатам разработки математических моделей, проведенных теоретических исследований функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса», а также разработки технологии эффективного смазывания (глава 2) и охлаждения рабочих валков и полосы (глава 4), разработана и численно реализована модель управления процессами подачи СМ и охлаждения рабочих валков.

Модель предназначена для управления процессами подачи СМ и охлаждения рабочих валков с учетом закономерностей формирования температурных условий процесса производства ЛГП. Общая структура модели приведена на рисунке 5.1.

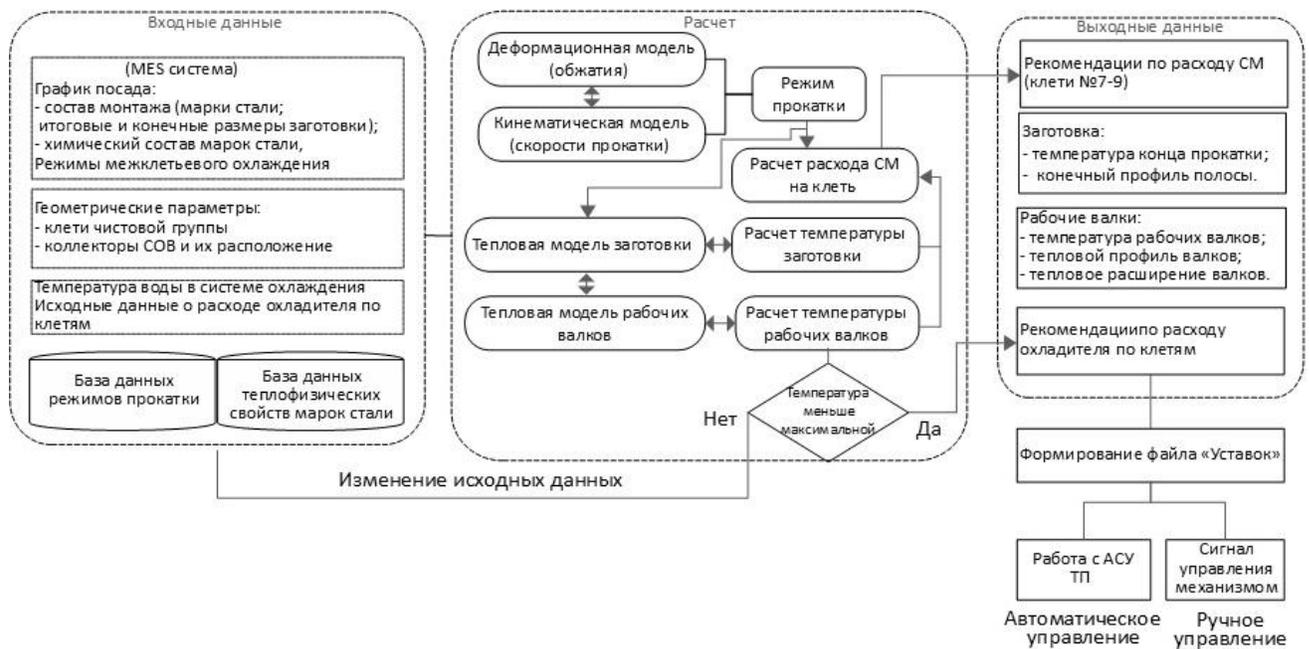


Рисунок 5.1 - Структура комплексной математической модели управления процессами подачи СМ и охлаждения рабочих валков

Основные требования к математической модели.

1. При реализации модели необходимо разработать принципы и подходы (методики) для управления технологическими процессами подачи СМ на контакт «опорный валок – рабочий валок», а также управления системами охлаждения рабочих валков и принудительного снижения температуры поверхности полосы перед входом ее в очаг деформации.

2. Модель выдает рекомендации по количеству ($\text{м}^3/\text{ч}$) подаваемого охладителя на поверхность рабочих валков в i -ой прокатной клетке, а также объем ($\text{мм}^3/\text{мин}$) подаваемого СМ на контакт «опорный валок – рабочий валок».

3. Модель выдает рекомендации непосредственно за 2...3 часа до начала процесса прокатки на этапе формирования монтажных партий и работает в виде «интерактивного советчика».

4. Численная реализация модели представлена в виде разработанного программного продукта (ПО), установленного на рабочих местах начальника цеха, старшего мастера и на посту управления процессом прокатки.

5. Модель имеет обратную связь с системами управления стана и выдает рекомендации по настройке систем охлаждения и систем подачи СМ в виде сигнала на исполнительные механизмы – «Уставка».

Обобщенный алгоритм функционирования модели заключается в следующем:

- разработанный программный продукт в автоматическом режиме из цеховых систем учета данных за 2...4 часа перед началом процесса прокатки получает данные о сформированном монтаже (порядок прокатки i -ой полосы);
- для всей чистовой группы клетей стана производится последовательный расчет технологических параметров процесса прокатки;
- определяется тепловое состояние (распределение температуры) в прокатываемой полосе, производится проверка на сходимость результатов (сравнение с заданными и контролируемыми температурами на стане);
- определяется тепловое состояние (распределение температуры) рабочих валков;
- по результатам расчета выдаются рекомендации по назначению рациональных режимов смазывания и охлаждения рабочих валков;
- формируется обратная связь модели с исполнительными механизмами в виде сигнала «Уставка».

Таким образом, модель позволяет на этапе формирования монтажных партий с учетом влияния внешних технологических факторов прогнозировать следующие параметры:

- тепловое состояние (распределение температуры) прокатываемой заготовки;
- тепловое состояние рабочих валков (распределение температуры и тепловой профиль).

Для практической реализации модели необходимо для сформированных монтажных партий (данные поступают из баз данных цехового учета) по

теоретическим моделям последовательно определить следующие технологические параметры процесса листовой горячей прокатки:

1) реологические параметры прокатываемой заготовки (сопротивление деформации σ_0 , МПа;

2) расчет характеристик промежуточного раската h_i , мм;

3) расчет и выбор числа активных клеток в чистой группе стана;

4) расчет режима обжаты и скоростей прокатки в чистой группе стана.

Реологические параметры прокатываемой полосы для каждой из прокатных клеток определялись с учетом химического состава и изменения ее параметров ($\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}, T)$) по методике Л.В. Андреюка.

Под тепловым состоянием прокатных валков понимается распределение температур рабочего валка по его длине и глубине (не более 5 %). Также определяется средняя температура поверхности валка после прокатки каждой полосы в рамках одного прокатного монтажа.

Технологические параметры процесса прокатки (для п. 2-4) определялись согласно алгоритмам, представленных в работе [258]. Для проверки адекватности применяемой методики на первоначальном этапе исследования из баз данных цехового учета был собран массив технологических параметров процесса прокатки. Полученные результаты были численно сопоставлены с алгоритмами работы [259]. Сходимость результатов составляла 80...85 %, что позволило в дальнейшем использовать алгоритмы [260,261,262] для численной реализации математической модели.

Реализация модели была произведена в условиях стана 2000 г.п. ПАО «ММК». В качестве объекта исследования была принята непрерывная чистовая группа клеток №№ 7-13. На основе представленной блок-схемы (рисунок 5.1) было численно реализовано программное обеспечение (ПО) с последующем

интегрированием в систему управления стана. Главное окно программы «Расчет теплового состояния рабочих валков» представлено на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 - Главное окно разработанного программного обеспечения (ПО) «Расчет теплового состояния рабочих валков»

5.2 Практическая реализация математической модели

Разработанное ПО является универсальным для широкополосных листовых станов горячей прокатки. ПО позволяет прогнозировать среднюю температуру рабочих валков в чистовой группе клетей, а также выдавать рекомендаций по назначению расхода подаваемого охладителя ($\text{м}^3/\text{ч}$) в системе охлаждения валков (COB) на каждую i -ую прокатную клеть, а также объем ($\text{мм}^3/\text{мин}$) подаваемого СМ на контакт «опорный валок – рабочий валок».

Для начала работы ПО необходимо загрузить монтаж (рисунок 5.2, кнопка «Загрузить монтаж»), в котором содержатся следующие данные:

- № партии, марка стали;
- толщина (мм), ширина (мм), длина (м) i -ой конечной горячекатаной полосы;
- пауза между проходами (с);

- температура i -ой полосы после последней черновой клетки (клеть № b -ой клетки) ($^{\circ}\text{C}$);
- температура конца прокатки i -ой полосы ($^{\circ}\text{C}$);
- толщина (мм) i -ой полосы после последней черновой клетки;
- химический состав i -ой полосы;
- режимы работы (код) межклетевого охлаждения i -ой полосы.

По исходным данным для всей чистовой группы модель рассчитывает технологические параметры процесса прокатки: обжатия ($\epsilon_i, \%$), скорость прокатки ($V_i, \text{м/с}$), температуру полосы на выходе из клетки ($T_i, ^{\circ}\text{C}$). Модель позволяет определить температуру полосы ($T_i, ^{\circ}\text{C}$) на любом из участков в чистовой группе клеток прокатного стана, а также температуру конца прокатки ($T_{\text{кп}}, ^{\circ}\text{C}$). По расчетному значению ($T_{\text{кп}}, ^{\circ}\text{C}$), которое контролируется на стане при помощи инфракрасного пирометра, проверяется сходимость модели и выдается дальнейшие рекомендации для продолжения расчета. Сходимость модели можно задавать в ручном режиме (не ниже 75%) – по умолчанию сходимость установлена на уровне 85...87%.

Структура реализации модели позволяет сохранять результаты расчета в базе данных. Алгоритм модели позволяет в процессе расчета при эквивалентных технологических параметрах использовать результаты расчета из базы данных, или, в случае отсутствия таковых, рассчитывает самостоятельно по статистическим формулам авторов [258].

Перед началом работы программы необходимо ввести ряд начальных параметров, необходимых для расчета теплового состояния рабочих валков. При нажатии кнопки «Параметры» в главном меню появляется отдельное окно для редактирования параметров. В этом окне загружены последние сохраненные данные из файла «Param.dat», находящегося в корневой папке программы. Окно параметров содержит поля ввода для следующих данных (рисунок 5.3):

- диаметры (мм) и начальные температуры ($^{\circ}\text{C}$) рабочих валков;
- теплофизические свойства рабочих валков (теплоемкость, теплопроводность, плотность);
- давление (МПа), максимальны расход ($\text{м}^3/\text{ч}$), температура воды ($^{\circ}\text{C}$) в СОВ, в системе принудительного снижения температуры поверхности полосы (система «антишелушения») и в системе межклетевого охлаждения;
- температура окружающего воздуха ($^{\circ}\text{C}$);
- шаг аппроксимации вычислений по времени;
- коэффициенты эффективности СОВ.

Рабочие валки:		Теплоемкость, Дж/(кг*К)	Теплопроводность, Вт/(м*К)	Плотность, кг/м³				
Длина бочки, мм	2000	600	20	7200				
Клеть:		№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13
Диаметры, мм	828,8	842,8	793,8	773,5	778,2	800,1	780,2	
Начальная температура, С	54	55	52	50	50	53	50	

Эффективность СОВ	
Верх:	0,94 0,92 0,98 1 0,99 1 1
Низ:	1 0,98 1 0,97 1 1 1

Вода:	СОВ	Межклетьевоe охлаждение	Система антишелушения	Температура воздуха, С
Давление, бар	8	2	3	25
Максимальный расход, м³/ч	7200	1970	480	
Температура, С	37	37	37	

Шаг аппроксимации по времени, сек: 1

Buttons: Дополнительно, Сохранить

Рисунок 5.3 - Параметры для расчета теплового состояния рабочих валков

При изменении параметров необходимо нажать кнопку «Сохранить» в окне ввода параметров, при этом новые данные будут сохранены в файле «Param.dat», а окно параметров закрыто.

Разработанная модель является универсальной и применимой для всех известных листовых станов горячей прокатки. Апробация модели

производилась на площадке ПАО «ММК»: на листовом стане 2000 г.п., на листовом стане 2500 г.п. и на толстолистовом стане 5000 г.п.

На рисунке 5.4 представлены результаты работы разработанного программного обеспечения. В качестве примера приведены результаты расчета, описывающие изменение температуры рабочего вала клетки №8 (2-ая клеть непрерывной чистовой группы) при прокатке i -ого монтажа.

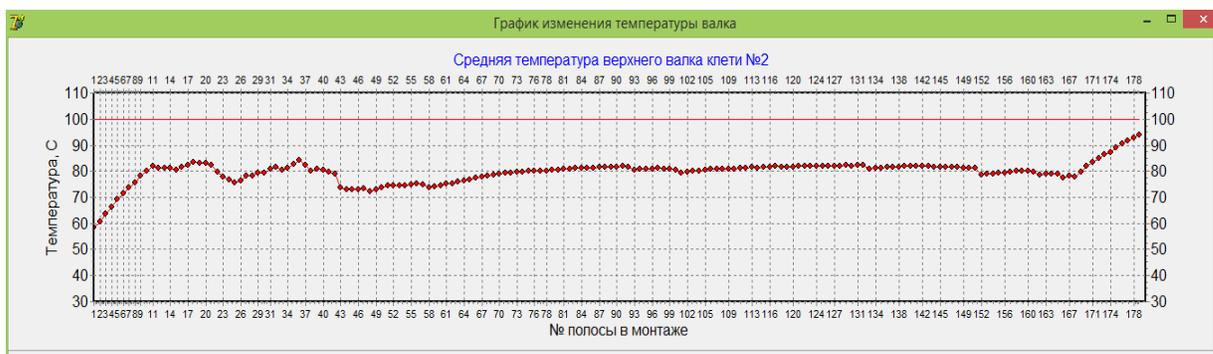


Рисунок 5.4 - Изменение температуры верхнего рабочего вала в процессе прокатки i -ого монтажа

На рисунке 5.4 по оси X отображается номер прокатываемой полосы в монтаже, по оси Y – температура рабочего вала в процессе прокатки для выбранного вала ($^{\circ}\text{C}$).

Для построения расчетных зависимостей, характеризующих изменение температуры рабочего вала в процессе прокатки i -ого монтажа, модель рассчитывает температуру в центре бочки вала.

Разработанный программный продукт позволяет в процессе расчета проследить за изменениями других технологических параметров, необходимых для расчета температуры валков. Для этого в главном окне программы нужно нажать кнопку «Параметры прокатки».

В форме, представленной на рисунке 5.5, отражаются рассчитанные параметры для каждой i -ой полосы после выхода из j -ой клетки чистовой группы (клеть №№7-13):

- толщина для *i*-ой полосы, мм;
- относительные обжатия для *i*-ой полосы, %;
- скорости прокатки для *i*-ой полосы, м/с;
- длина очага деформации для *i*-ой полосы, мм;
- площадь контактной поверхности для *i*-ой полосы, см²;
- время контакта *i*-ой полосы с валком, с;
- температура поверхности валка в зоне деформации (верхнего и нижнего отдельно), °С;
- количество теплоты, получаемое валком в зоне очага деформации (для верхнего и нижнего валка отдельно), кДж;
- количество теплоты, отданное валком системе охлаждения (для верхнего и нижнего валка отдельно), кДж.

Параметр/Клеть	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13
Обжатия, %	50,59	41,86	33,59	27,33	22,37	18,29	14,83
Толщина, мм	15,68	9,12	6,05	4,4	3,42	2,79	2,38
Скорость, м/с	2,08	3,57	5,38	7,4	9,54	11,67	13,57
Длина очага деф., мм	81,7	52,62	34,88	25,3	19,57	15,81	12,7
Площадь очага деф., см ²	1070,25	689,36	456,87	331,42	256,36	207,1	166,43
Время контакта, с	1,24	0,47	0,2	0,11	0,06	0,04	0,03
Темп-ра контакта верх, град	577,13	559,16	540,53	521,62	501,96	482,49	462,88
Темп-ра контакта низ, град	576,17	558,37	540,13	520,84	501,77	482,85	463,22
Q получ. валком верх, кДж	43404	43906	42180	40497	38868	37081	34347
Q получ. валком низ, кДж	43509	43998	42226	40587	38890	37040	34309
Q отдан. валком верх, кДж	40483	41260	40791	39804	37407	35353	33048
Q отдан. валком низ, кДж	38680	39773	40042	38330	37051	36028	33693

Рисунок 5.5 - Рассчитанные технологические параметры процесса

Для каждой *j*-ой полосы и *i*-ой клетки чистовой группы (клеть №№7-13) реологические параметры прокатываемой заготовки (σ_0 , МПа), приведенные на рисунке 5.5, рассчитываются с учетом технологических параметров процесса прокатки $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$ - по методике Л.В. Андреюка.

Результаты расчета температуры валков автоматически сохраняются в текстовом файле вида RollTemp_№ монтажа.txt в корневой папке программы, и могут быть обработаны в Microsoft Excel или других программах, позволяющих проводить статистическую обработку данных (рисунок 5.6).

The screenshot shows a Notepad window titled 'RollTemp_46947 — Блокнот'. The window contains a table with 11 columns and 17 rows. The first column lists roller positions (e.g., 'валок/полоса', 'клеть №7 верх'), and the subsequent columns contain numerical temperature values.

валок/полоса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
клеть №7 верх	57,42	60,29	63,45	65,52	68,35	70,36	72,76	74,89	76,87	78,72	80,32
клеть №7 низ	57,19	59,83	62,79	64,67	67,32	69,18	71,43	73,42	75,28	77,02	78,51
клеть №8 верх	58,33	61,11	64,22	66,28	69,09	71,1	73,5	75,62	77,61	79,47	81,09
клеть №8 низ	58,14	60,75	63,69	65,59	68,25	70,14	72,41	74,42	76,31	78,08	79,61
клеть №9 верх	55,82	59,1	62,63	65,02	68,14	70,35	72,95	75,22	77,32	79,26	80,91
клеть №9 низ	55,72	58,9	62,34	64,65	67,69	69,84	72,37	74,59	76,64	78,53	80,15
клеть №10 верх	54,01	57,52	61,21	63,78	67,01	69,3	71,96	74,27	76,39	78,34	79,99
клеть №10 низ	53,81	57,11	60,63	63,03	66,11	68,27	70,81	73,01	75,03	76,88	78,46
клеть №11 верх	53,63	56,79	60,17	62,51	65,48	67,58	70,04	72,16	74,12	75,92	77,46
клеть №11 низ	53,58	56,7	60,03	62,33	65,27	67,33	69,76	71,86	73,8	75,57	77,09
клеть №12 верх	55,92	58,33	61,1	62,89	65,37	67,07	69,15	70,95	72,64	74,19	75,52
клеть №12 низ	56,01	58,51	61,36	63,22	65,77	67,52	69,66	71,52	73,25	74,84	76,21
клеть №13 верх	53	55,57	58,41	60,35	62,86	64,61	66,7	68,5	70,16	71,69	72,99
клеть №13 низ	53,09	55,74	58,67	60,67	63,25	65,06	67,2	69,05	70,76	72,32	73,66

Рисунок 5.6 - Текстовый файл результатов расчета температуры валков

5.3 Определение расходов охладителя в непрерывной чистовой группе клетей листовых станов горячей прокатки

Для снижения ресурсоёмкости при производстве ЛГП, отвечающего современным требованиям, необходимо реализовать технические решения: разработать и внедрить технологию эффективного воздействия на процессы смазывания и охлаждения валков и полосы

Под термином **«эффективное воздействие»** понимаются технологические режимы, определяющие объемы подаваемого на поверхность валков охладителя для каждой прокатной клетки в зависимости от технологии получения ЛГП.

Для определения эффективных технологических режимов воздействия, заключающихся в выборе режимов подачи СМ и охладителя для *i*-ой прокатной клетки чистовой группы, необходимо запустить и выполнить процедуру расчета. После введения всех необходимых данных и нажатии кнопки «Начать расчет» реализуется расчет прокатываемого монтажа (или графика посадки).

В процессе расчета в таблице монтажа цветом выделяется строка, соответствующая расчету j -ой полосы в монтаже (для которой происходит расчет в данный момент). Результаты расчета отражаются на значениях индикаторов температуры валков для каждой клетки, представленных рисунке 5.2.

Цвет индикаторов температуры валка ранжирован следующим образом:

- зеленый – температура < 90 °С;
- желтый – температура ≥ 90 °С, но < 100 °С;
- красный – температура ≥ 100 °С.

Текущая температура рабочих валков отображена на внешнем рабочем окне программы. При превышении установленной температуры на экране отображается сигнал об аварийном значении температур. Результатом работы программы являются выдаваемые рекомендации по настройке системы охлаждения, при которых температура рабочих валков должна находиться в заданном температурном диапазоне.

В процессе расчета в программе введена возможность оперативно (в ручном режиме) изменять расходы охладителя в СОВ, что отражается на изменении температуры рабочих валков.

На рисунке 5.7 приведены результаты работы ПО. Так, например, выбрав интересующий рабочий валок, можно проследить за изменением его температуры в ходе i -го монтажа. Помимо этого, ПО позволяет определять распределение температуры и теплового профиля по длине бочки любого валка.

После завершения расчета при нажатии кнопки «Рекомендации по СОВ» программа делает анализ и выдает рекомендации для «**эффективного воздействия**». Предлагаются технологические режимы, определяющие объемы подаваемого на поверхность валков охладителя для каждой прокатной клетки, для которых температура рабочих валов будет соответствовать установленному

значению (на НШСП 2000 ПАО «ММК» рекомендуется эксплуатация рабочих валков в чистой группе в температурном интервале 80...90°С.)

Отличительной особенностью модели являются разработанные адаптивные режимы, позволяющие для каждой прокатной клетки рассчитывать и выдавать рекомендации по объемам охладителя в зависимости от режимов прокатки.

Нажав кнопку «Принять» программа, используя разработанные алгоритмы (см. главу 4), автоматически определяет расходы СОВ для каждой клетки чистой группы стана. Результаты расчетов представлены на рисунке 5.8.



Рисунок 5.7 - Изменение средней температуры рабочего валка в процессе прокатки, а также распределение температуры по длине бочки рабочего валка и тепловой профиль валка



Рисунок 5.8 - Рекомендации по расходам СОВ для существующей системы охлаждения валков

Оценка адекватности получаемых результатов

Оценка сходимости результатов расчета разработанного программного обеспечения (ПО) была проведена экспериментально аналитическим методом, путем сравнения расчетных параметров температуры с измеренными. Сходимость модели проверялась на площадке ПАО «ММК» на НШСГП 2000 г.п. и НШСГП 2500 г.п. Температуру валков после вывалки замеряли при помощи переносного бесконтактного пирометра Time Ti 213EL (точность измерения: +1% или +1°C).

Необходимо отметить, что разработанное ПО аналитически определяет температуру рабочих валков непосредственно в процессе прокатки. Проверка сходимости модели производилась по результатам измеренных температур рабочих валков после окончания процесса прокатки и их вывалки из клетки. Для устранения вышеуказанных противоречий была разработана специальная методика, регламентирующая порядок измерения и определения температуры рабочих валков. Разработанная методика приведена в **Приложении II**, а также передана на ПАО «ММК».

Сравнительные расчеты температуры рабочих валков для всей чистовой группы клеток были проведены по 70 различным монтажам. В качестве примера в таблицах 5.1 и 5.2 приведены результаты сравнительного расчета по двум прокатываемым монтажам. Результаты расчетов показывают, что относительная ошибка для стана 2000 г.п. не превышает 10%, а для стана 2500 г.п. не превышает 15%, что позволяет признать разработанную математическую модель достоверной.

Таблица 5.1 - Расчетная и измеренная температуры рабочих валков чистой группы клеток №№7-13 НШСГП 2000 г.п. ПАО «ММК»

№ монтажа	№ клетки	Положение валка	№ валка	Диаметр валка, мм	Температура валка (измеренная), °С	Температура валка (согласно модели), °С	Относительная ошибка, %
48459	7	Верхний	284	824,2	81	88	8,0
	7	Нижний	285	828,5	78	85	8,2
	8	Верхний	290	843,1	85	88	3,4
	8	Нижний	291	842,5	81	86	5,8
	9	Верхний	909	794,8	81	85	4,7
	9	Нижний	818	793,6	74	82	9,8
	10	Верхний	160	773,4	73	81	9,9
	10	Нижний	161	773,6	71	78	9,0
	11	Верхний	33	778,1	71	74	7,8
	11	Нижний	43	778,4	66	73	9,6
	12	Верхний	96	800,0	67	72	6,9
	12	Нижний	97	800,2	66	72	8,3
	13	Верхний	60	780,3	58	64	9,4
13	Нижний	48	780,2	61	65	6,2	
48552	7	Верхний	271	832,0	83	86	3,5
	7	Нижний	270	831,3	84	84	0,0
	8	Верхний	304	855,0	89	86	3,5
	8	Нижний	303	854,6	80	84	4,8
	9	Верхний	923	785,5	84	84	0,0
	9	Нижний	247	785,2	76	83	8,4
	10	Верхний	113	769,6	72	78	7,7
	10	Нижний	112	769,8	70	77	9,1
	11	Верхний	71	766,3	76	75	1,3
	11	Нижний	65	766,6	66	73	9,6
	12	Верхний	95	794,3	69	72	4,2
	12	Нижний	93	794,5	68,5	71	3,5
	13	Верхний	84	784,8	61	67	9,0
13	Нижний	83	784,7	62	68	8,8	

Таблица 5.2 - Расчетная и измеренная температуры рабочих валков чистой группы клетей №№ 5-11 НШСП 2500 г.п. ПАО «ММК»

№ монтажа	№ клетки	Положение валка	Диаметр валка, мм	Температура валка (измеренная) °С.	Температура валка (согласно модели) °С	Относительная ошибка %
29416	5	Верхний	824,2	78	68	12,82
	5	Нижний	828,5	76	66	13,16
	6	Верхний	843,1	77	66	14,29
	6	Нижний	842,5	78	67	14,10
	7	Верхний	794,8	72	67	6,94
	7	Нижний	793,6	71	66	7,04
	8	Верхний	773,4	65	63	3,08
	8	Нижний	773,6	66	64	3,03
	9	Верхний	778,1	64	57	10,94
	9	Нижний	778,4	63	56	11,11
	10	Верхний	800,0	57	49	14,04
	10	Нижний	800,2	57	50	12,28
29671	5	Верхний	801,1	75	66	12,00
	5	Нижний	800,0	74	65	12,16
	6	Верхний	765,8	74	66	10,81
	6	Нижний	764,7	71	65	8,45
	7	Верхний	695,1	70	66	5,71
	7	Нижний	695,2	69	66	4,35
	8	Верхний	693,6	68	67	1,47
	8	Нижний	693,8	67	66	1,49
	9	Верхний	698,2	65	60	7,69
	9	Нижний	698,1	67	60	10,45
	10	Верхний	699,2	48	42	12,50
	10	Нижний	699,5	49	45	8,16
11	Верхний	688,3	47	42	10,64	
11	Нижний	688,2	47	39	17,0	

5.3.1 Разработка режимов подачи смазочного материала

Для определения режимов подачи СМ произведена верификация разработанной математической модели к условиям действующего производства.

Теоретический подход по определению расхода СМ, разработанный и представленный в предыдущих разделах диссертации, был численно реализован в виде математической модели процесса листовой горячей прокатки с использованием системы подачи СМ, как программное обеспечение в среде Delphi. Алгоритм реализации программы представлен на рисунке 5.12.

На основе разработанной методологии функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса» для условия применения технологии подачи СМ в валковые узлы «кварто» (см. главу 3) с учетом предложенных критериев (Ξ_i) были определены эффективные режимы подачи СМ.

Для определения эффективных режимов подачи СМ, согласно предложенной методологии (глава 3), разработана математическая модель. Численная реализация модели была выполнена как комплекс программных продуктов для ЭВМ, состоящих из последовательно связанных компьютерных программ, на каждую из которых получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [263,264]:

- 1) № 2015616747, «Расчет энергозатрат на широкополосных станах горячей прокатки»;
- 2) № 2013612829, «Разработка технологии прокатки горячекатаной полосы при подаче смазочного материала в межвалковый зазор».

На рисунке 5.9 приведены общий вид работы программных продуктов № 2013612829, № 2015616747, позволяющих выдавать рекомендации по назначению расходов СМ для клеток №№7,8,9 стана.

Алгоритм работы математической модели по определению расходов СМ в технологии листовой горячей прокатки представлен на рисунке 5.10.

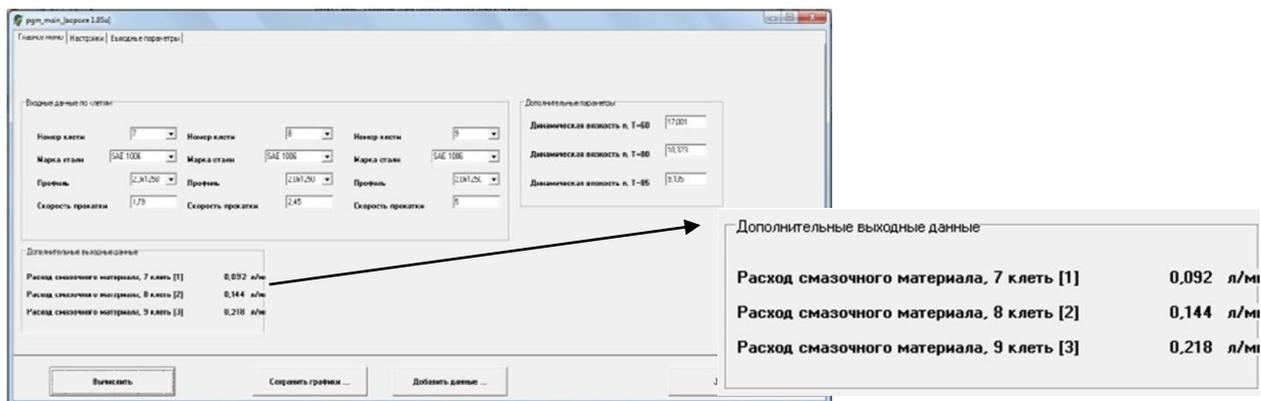


Рисунок 5.9 - Пример рабочих окон программных продуктов № 2018515823 и № 2015510218

По результатам реализации математической модели были определены эффективные режимы подачи СМ. Результаты исследования оформлены в виде Акта и переданы на предприятие (**Приложение Б**).



Рисунок 5.10 - Алгоритм определения расходов СМ в технологии листовой горячей прокатки

Внедрение эффективных режимов подачи смазочного материала в условиях действующего производства.

Согласно разработанным рекомендациям (Приложение Б) была произведена настройка режимов подачи СМ и реализован промышленный эксперимент на листовом стане 2000 г.п. ПАО «ММК». Результаты эксперимента оценивались с применением методов статистической обработки. Массив экспериментальных данных включал информацию, полученную в результате прокатки общей численностью более 1200 шт. [265,266,267,268,269].

После прокатки каждой горячекатаной полосы для клеток №№7-9 фиксировались следующие параметры:

- энергосиловые параметры процесса: усилие прокатки (P_{7-9} , МН), токовые характеристики (усредненное значение I_{7-9} , А), относительные обжатия (ε_{7-9} , %);
- геометрические характеристики прокатываемых полос: толщина полосы за 6-ой (h_6 , мм) и 13-ой (h_{13} , мм) клетями;
- величина износа рабочих валков (U_{7-9}).

Зафиксированные значения параметров процесса прокатки сравнивалось с аналогичными результатами при выключенной системе подачи СМ.

Внедрение режимов подачи СМ в условиях действующего производства позволило:

- 1) снизить энергозатраты (токовые нагрузки главных приводов) на 7...10%;
- 2) уменьшить износ рабочих валков для клеток №№7-9 на 3,88...15,27%.

5.3.2 Выводы по результатам реализации математической модели управления процессами подачи смазочного материала и охлаждения рабочих валков

1. Для управления процессами смазывания и охлаждения рабочих валков в непрерывной чистовой группе клеток листового стана горячей прокатки был разработан и численно реализован новый алгоритм. В основу

алгоритма были заложены разработанные математические модели функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса». В частности, для математического описания контактного взаимодействия в системе «опорный валок – рабочий валок» с наличием жидких СМ была реализована модель, представленная в главе 2. Для математического описания теплового состояния в системе «опорный валок – рабочий валок» реализована модель, представленная в главе 4.

2. Для реализации математической модели управления процессами подачи СМ и охлаждения рабочих валков было численно реализовано ПО. Для промышленной апробации разработанное ПО было дополнено известными подходами [258], позволяющими произвести расчет технологических параметров процесса листовой горячей прокатки.

3. Разработанное ПО является инструментом для интеграции предлагаемых решений в систему управления листовых станов горячей прокатки, что позволяет технологу назначать расходы охладителя и СМ как в ручном, так и в автоматическом режиме.

4. В результате исследований разработана и численно реализована математическая модель для определения объема СМ, подаваемого на поверхность рабочих валков и охладителя. Отличительной особенностью модели являются разработанные адаптивные режимы, позволяющие для каждой из прокатных клетей рассчитывать и выдавать рекомендации по объемам СМ и охладителя в зависимости от режимов прокатки.

5. Промышленная апробация математической модели была произведена для условий непрерывной чистовой группы клетей (№№7-13) стана 2000 г.п. ПАО «ММК». Получены следующие практические результаты.

5.1. Для технологии подачи жидких СМ:

- разработаны и внедрены новые режимы подачи СМ на поверхность опорных валков, учитывающие геометрические и прочностные характеристики прокатываемых полос, что подтверждается Актом (**Приложение Б**);
- внедрение режимов подачи СМ в условиях действующего производства позволило снизить энергозатраты (токовые нагрузки главных приводов) на 7...10%, что подтверждается Актом (**Приложение В**);
- внедрение режимов подачи СМ позволило достигнуть снижения ресурсоёмкости при производстве ЛПП, выраженное в увеличении срока службы валков не менее чем на 9...11 эксплуатационных часов (9...11%), что подтверждается Актом (**Приложение В**).

5.2. Для технологии охлаждения рабочих валков.

С целью настройки и управления тепловым режимом рабочих валков необходимо провести дополнительные исследования, а также внедрить следующие технические мероприятия:

- произвести адаптацию модели для условий прокатки в непрерывных черновой и чистовой групп клетей листовых станов горячей прокатки;
- определить рациональное количество подаваемого охладителя на каждую из прокатных клетей при выполнении условия: $T_{расч.} \approx T_{задан.}$, где $T_{задан.}$ – рекомендуемая температура рабочих валков чистовой группы клетей ($^{\circ}C$);
- определить рациональное местоположение коллекторов охлаждения;
- изменить конструкцию коллекторов охлаждения (при необходимости) и выбрать рациональный тип форсунок.

5.4 Совершенствование оборудования системы охлаждения рабочих валков

Одной из технических проблем, которые были решены при проведении диссертационных исследований является внедрение новых технических решений, направленных на повышение стойкости рабочих валков путем совершенствования оборудования системы охлаждения.

Опыт эксплуатации рабочих валков показывает, что неправильная организация теплового режима прокатки может привести к нежелательным последствиям – термическому изнашиванию, что приводит к увеличенным параметрам съема валка при его перешлифовке. При неправильной настройке системы охлаждения рабочих валков, в процессе их эксплуатации могут проявляться следующие негативные явления [256,270]:

- перегрев рабочего валка ($100 \dots 110$ °С для непрерывной чистовой группы), что приводит к искажению теплового профиля;
- образование трещин разгара (процесс связан с термоциклированием, т.е. чередованием циклов «нагрев-охлаждение»);
- значительное термическое изнашивание.

Для устранения негативных явлений необходимо разработать и внедрить мероприятия, направленные на совершенствование оборудования системы охлаждения рабочих валков, включающие в себя:

- определение оптимального количества подаваемого охладителя на каждую из прокатных клетей;
- определение рационального местоположение коллекторов охлаждения;
- изменение конструкции коллекторов охлаждения (при необходимости);
- выбор рационального типа форсунок.

5.4.1 Разработка мероприятий по совершенствованию оборудования системы охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей

Существующая система охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей стана до проведения модернизации представляла из себя систему коллекторов спрейерного типа (труба с отверстиями). Дополнительное охлаждение рабочих валков осуществлялось за счет попадания охладителя с коллекторов охлаждения верхних опорных валков, которые также представляли собой коллектора спрейерного типа. Анализ работы системы охлаждения позволил выявить, что рабочие валки в непрерывной черновой группе клетей работают при повышенных рабочих температурах. Так, например, температура рабочих валков в последней клетке (клеть №6) составляла 80...85⁰С, что согласно принятой технологии эксплуатации является недопустимым.

На основе разработанной математической модели теплового состояния рабочих валков (глава 4), включающей в себя определение расхода (л/ч), давления (Р, МПа), а также оптимальных зон охлаждения (облива), предложены новые технические решения.

1. Для клетки №6 произведено перераспределение объемов охладителя с верхнего опорного валка на коллектор охлаждения верхнего и нижнего рабочего валка. Легитимность данного решения подтверждается разработанным технологическим письмом ГИ-2755 от 05.12.2011 г. (проект изменения в технологическую инструкцию) (**Приложение Г.1**).

2. Для клетей №№4-6 произведено изменение конструкции коллектора охлаждения верхнего и нижнего рабочего валка. Для коллекторов новой конструкции была разработана конструкторская и технологическая документация. Общий вид коллектора представлен на рисунке 5.11. Фотографии изготовленных коллекторов приведены на рисунке 5.12.

Технические характеристики коллекторов новой конструкции приведены в таблице 5.3 [271,272,273,274,275]. На аналогичную конструкцию коллектора охлаждения был получен патент на полезную модель РФ № 152330 [276].

На основе разработанных принципов совершенствования оборудования, направленных на снижение ресурсоемкости при производстве ЛПП, и разработанных математических моделях (глава 4.), определено рациональное местоположение коллектора новой конструкции для верхних и нижних рабочих валков непрерывной черновой группы клетей.

Численная реализация была выполнена с помощью разработанного комплекса программных продуктов для ЭВМ, состоящих из последовательно связанных компьютерных программ. На каждую из программ получено Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ [250,277].

1. № 2016610433. «Расчет оптимального положения коллектора охлаждения рабочего вала стана для максимального соответствия заданному диапазону температур».

2. № 2016610434. «Автоматизированный расчет теплового состояния поверхностного слоя рабочего вала стана с учетом положения охлаждающих коллекторов».

По результатам проведенных расчетов для клетей №№4-6 произведено изменение местоположения коллекторов охлаждения для верхнего и нижнего рабочего вала. Легитимность данного решения подтверждается введенным в работу технологическим письмом ТД-0771 от 11.11.2015 г. (проект изменения в технологическую инструкцию), **(приложение Г.2)**. В частности, разработаны и внедрены следующие технические решения:

– для 6-ой клетки: коллектор новой конструкции смещен вниз на 200 мм, в сторону оси прокатки на 70 мм; угол наклона форсунок к оси вала равняется 15° , коллектора по отношению к оси прокатки - 50° ;

– для 4-ой и 5-ой клетки: коллектор для охлаждения верхнего рабочего валка смещен вниз от проектного положения на 400 мм и повернут относительно вертикальной оси валка на отрицательный угол $37^{\circ}...43^{\circ}$; коллектор для охлаждения нижнего рабочего валка от проектного положения повернут на положительный угол $15...23^{\circ}$ (**приложение Г.2**);

– предложены и апробированы параметры для настройки коллекторов охлаждения для непрерывной черновой группы клеток.

Результаты систематизированы и сведены в таблицу 5.4. Расчетная схема настройки системы охлаждения приведена на рисунке 5.13. Результаты переданы и внедрены в действующее производство, что подтверждается Актом (**приложение И**).

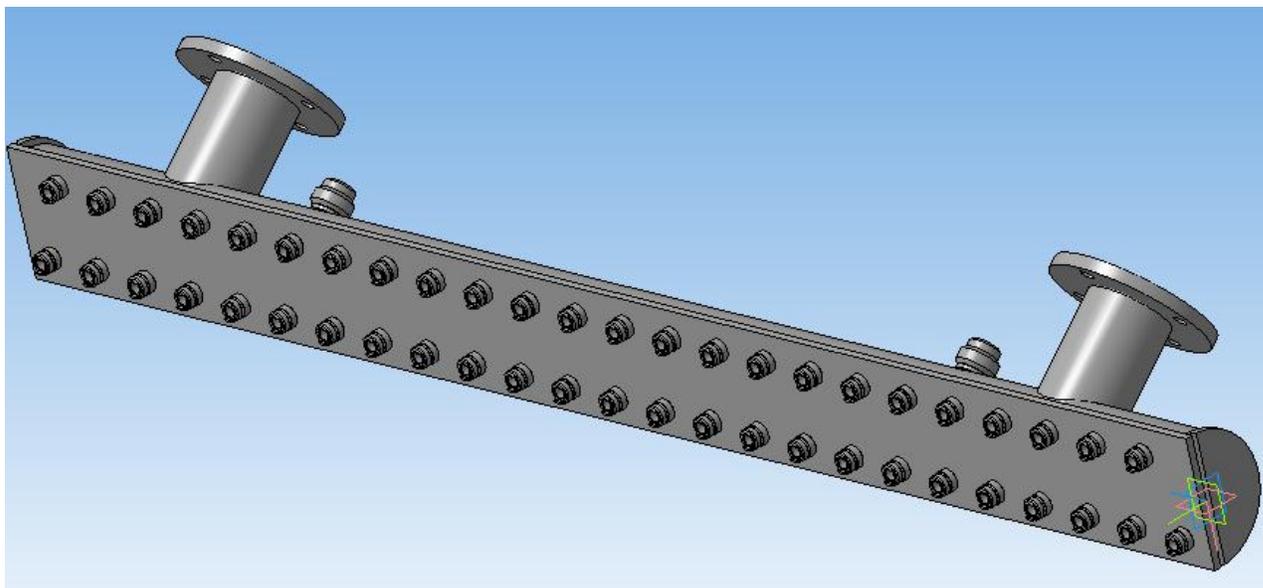


Рисунок 5.11 - Общий вид коллектора новой конструкции для охлаждения рабочих валков для непрерывной черновой группы клеток №№ 4-6

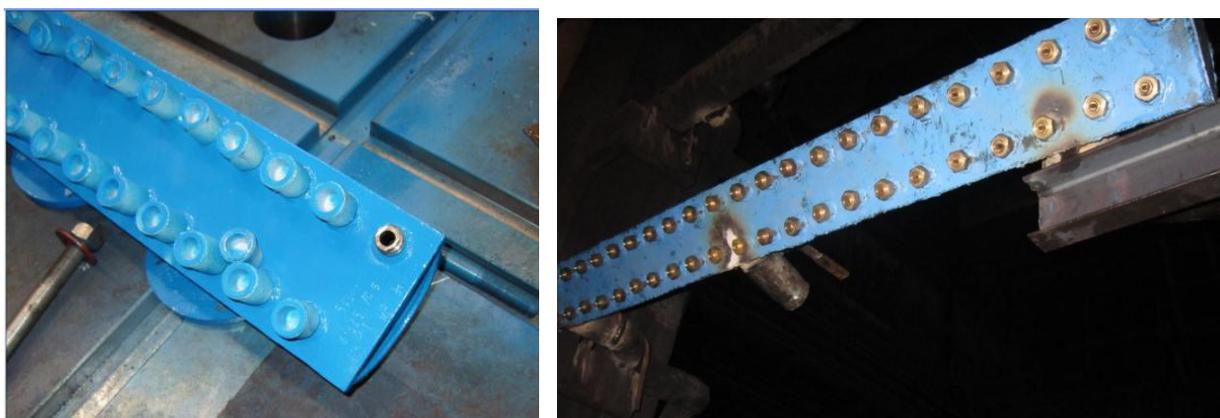


Рисунок 5.12 - Коллекторы усовершенствованной системы охлаждения для непрерывной черновой группы клетей №№4-6

Таблица 5.3 - Характеристика системы охлаждения непрерывной черновой группы клетей №№ 4-6

Тип коллектора	Сварная полутруба
Количество коллекторов, шт.	5
Количество форсунок в одном коллекторе, шт.	48
Тип форсунок	плоскофакельные
Производитель форсунок	Lechler
Количество рядов форсунок на коллекторе, шт.	2
Количество форсунок в ряду, шт.	24
Угол направления охлаждающей струи к поверхности валка, градус	
верхней	45
нижней	45
Рабочие давление воды на входе в коллектор, МПа	0,2-0,3
Давление в магистральном трубопроводе, МПа	0,3-0,4
Рабочие давление на выходе из форсунок, МПа	0,4
Расход воды через один коллектор, м ³ /час	150
Общий расход воды, м ³ /час	500
Расход воды через одну форсунку при давлении 0,8 МПа, л/мин.	50
Температура воды, °С	+28...+42
Угол перекрытия форсунок, град	15
Шаг между форсунками, мм	80

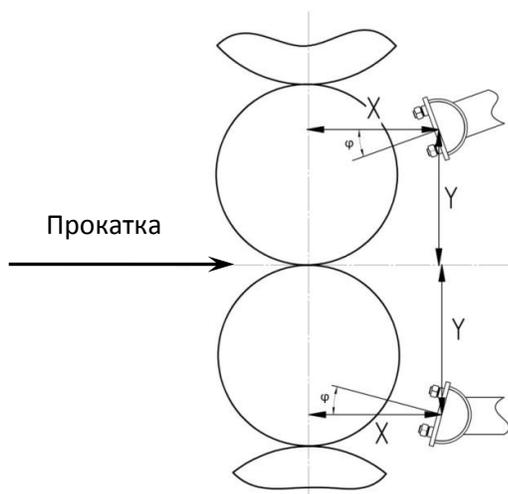


Рисунок 5.13 - Расчетная схема для настройки системы охлаждения рабочих валков в непрерывной черновой группе клетей №№ 4-6

Таблица 5.4 - Настройка системы охлаждения непрерывной черновой группы клетей №№4-6

Положение рабочих валков вала	Положение коллектора			Тип коллектора					Типы форсунок
	Относительно оси прокатки (координата X), мм	Относительно оси прокатки (координата Y), мм	Угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки (положительный угол)	Количество форсунок	Рядность	Угол перекрытия, град	Шаг между форсунками/рядами, мм	Расход воды через коллектор, м ³ /ч, при давлении охладителя не менее 08 МПа	
Непрерывная черновая группа клетей									
Клеть № 4,5,6									
Верхний	Кл.4: 550 Кл.5: 500 Кл.6: 500	Кл.4: 800 Кл.5: 700 Кл.5: 500	37...43 ⁰	Верхний ряд 24 Нижний ряд 24	2	15	80/ 100	Клеть №4,5,6/ 850	Верхний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №554.954.30 Нижний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №554.954.30

Положение рабочих валков валька	Положение коллектора			Тип коллектора					Типы форсунок
	Относительно оси прокатки (координата X), мм	Относительно оси прокатки (координата Y), мм	Угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки (положительный угол)	Количество форсунок	Рядность	Угол перекрытия, град	Шаг между форсунками/рядами, мм	Расход воды через коллектор, м ³ /ч, при давлении охладителя не менее 08 МПа	
Нижний	Кл.4: 500 Кл.5: 500 Кл.6: 500	Кл.4: -400 Кл.5: -400 Кл.6: -400	15...23 ⁰	Верхний ряд 24 Нижний ряд 24	2	15	80/ 100	Клеть №4,5,6/ 840	Верхний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №554.954.30 Нижний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №554.954.30

Оценка эффективности от внедрения коллекторов новой конструкции производилось экспериментальным путем. Измерение температур рабочих валков производилось после их вывалки при помощи переносного бесконтактного пирометра Time Ti 213EL (точность измерения: +1% или +1°C). Расчетное значение измеренных температур определено с учетом специальной методики, регламентирующей порядок измерения и определения температуры рабочих валков (**Приложении П**).

Из базы данных цехового учета фиксировалась величина съема рабочего слоя валков при перешлифовке. В общей сложности получены данные после 70 монтажных партий. В качестве примера, в таблице 5.5 приведены результаты измерений для клетей №№4-6.

Таблица 5.5 - Результаты измерений температуры и величины съемов рабочих валков для непрерывной черновой группы клетей

№ п.п.	№ валка	Положение валка	Средний съем, мм	Средняя температура по длине бочки валка, °С
клеть №4				
1	132	верхний	1,26/0,7	56/48
	133	нижний	0,9/0,6	57/49
2	136	верхний	1,2/0,7	55/47
	137	нижний	0,6/0,5	53/45
3	141	верхний	0,6/0,5	55/47
	140	нижний	0,8/0,5	56/48
4	142	верхний	0,7/0,5	56/48
	143	нижний	0,9/0,64	54/46
5	144	верхний	0,9/0,7	54/46
	145	нижний	0,6/0,5	62/54
Итого среднее значение			Снижение на 0,25 мм	Снижение на 8 °С
клеть №5				
1	160	верхний	0,8/0,7	62/52
	159	нижний	0,7/0,6	63/53
2	170	верхний	0,8/0,7	57/47
	171	нижний	0,6/0,5	52/48
3	157	верхний	0,6/0,5	6/50
	158	нижний	0,8/0,5	61/51
4	173	верхний	0,7/0,85	62/52
	172	нижний	0,8/0,65	59/49
5	156	верхний	0,8/0,7	58/48
	157	нижний	0,6/0,5	60/50
Итого среднее значение			Снижение на 0,2 мм	Снижение на 10 °С
клеть №6				
1	121	верхний	0,92/0,6	81/70
	123	нижний	0,96/0,6	83/72
2	118	верхний	0,96/0,6	82/71
	119	нижний	1,02/0,7	80/69
3	101	верхний	1,02/0,7	79/68
	100	нижний	1,02/0,7	81/70
4	77	верхний	0,92/0,6	81/70
	78	нижний	0,92/0,6	83/72
5	75	верхний	1,02/0,7	82/71
	73	нижний	0,92/0,6	81/70
Итого среднее значение			Снижение на 0,32 мм	Снижение на 11 °С
Примечание: в числителе приведены значения работы системы до реконструкции, в знаменателе после реконструкции				

Итоговое (усредненное) значение снижения технологических параметров в непрерывной черновой группе клетей №№4-6 приведены в таблице 5.6, что подтверждается Актом (**приложение И**).

Снижение температуры рабочих валков позволило уменьшить величину термического изнашивания валков, что снизило величину съема при перешлифовке, и, в свою очередь, привело к увеличению ресурса валков на 8...12%, что соответствует 8...12 эксплуатационным часам. Полученные результаты подтверждаются фактическим данными, по которым был произведен расчет фактического экономического эффекта от внедрения разработанных мероприятий. Экономический эффект рассчитывался от величины «количество переточек валков», которые составили до внедрения 103 шт./валок, после - 105 шт./валок.

Таблица 5.6 - Результаты мероприятий по совершенствованию оборудования системы охлаждения рабочих валков в непрерывной черновой группе клетей

Номер клетки	Температура до внедрения, °С	Температура после внедрения, °С	Среднее значение падение температуры, °С (%)	Среднее значение уменьшение съема, мм (%)
Черновая группа клетей				
4	53	45	8 (15)	0,25 (10,21)
5	60	50	10 (16)	0,24 (9,72)
6	81	70	11 (13)	0,32 (11,21)

Выводы по результатам промышленного внедрения в непрерывной черновой группе клетей

1. Произведено совершенствование оборудования системы охлаждения рабочих валков в непрерывной черновой группе клетей. Разработаны и внедрены новые конструкции коллекторов охлаждения рабочих валков, определено их рациональное местоположение.
2. Результаты внедрения позволили снизить температуру рабочих валков в непрерывной черновой группе клетей на 8...11⁰С (13...16%) за счет

использования коллекторов охлаждения новой конструкции и применения нового алгоритма для определения рационального местоположения коллекторов и объема подаваемого охладителя. Результаты исследований подтверждены Актом (**приложение И**).

3. В результате настройки и совершенствования оборудования и режимов подачи охладителя зафиксировано снижение величины съема валков при их последующей перешлифовке для клетей №№4-6 на 9,7...11,21%. В результате достигнуто снижение ресурсоёмкости при производстве ЛПП не менее 8...12 эксплуатационных часов, что составляет 8..12%.

4. Внедрение новых конструкций коллекторов охлаждения рабочих валков не выявили наличие внешних дефектов на поверхностях валков (трещин, термических трещин, поверхностных и внутренних повреждений, механических повреждений, повреждений при прокатке).

5. По результатам внедрения получены следующие практические результаты:

- оформлены и выпущены технологические письма: ГИ-2755 от 05.12.2011 г., (**приложение Г.1**); ТД-0771 от 11.11.2015 г. (**приложение Г.2**);
- получены Акты промышленных испытаний (**приложение Д.1 и Д.2**) и Акты внедрения (**приложение Е1 и Е2**);
- акт передачи научно технической продукции (**приложение И**).

6. Фактический подтвержденный экономический эффект от внедрения мероприятий по совершенствованию оборудования системы охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей составил около 3 млн. руб., что подтверждается Актом (**приложение Ж**).

5.4.2 Разработка мероприятий по совершенствованию системы охлаждения рабочих валков в непрерывной чистовой группе клетей

Система охлаждения непрерывной чистовой группы клетей №№ 7-13 является достаточно современной. В 2015 г. на стане была произведена

глубокая модернизация системы охлаждения: произведена замена всех коллекторов охлаждения рабочих валков (верхних и нижних), произведена установка двухрядных и трехрядных коллекторов, модернизирована система подвода охладителя с возможностью регулирования объемов подачи охладителя на каждую из прокатных клетей. Также на первые три клетки чистовой группы (№№7-9) была установлена система для принудительного охлаждения полосы, перед входом ее в очаг деформации (в литературе встречается под названием система «антишелушения»).

В процессе эксплуатации системы охлаждения рабочих валков в непрерывной чистовой группе клетей были выявлены следующие недостатки: [251,253,255].

1. В клетях (№№ 7-13) наблюдается повышенное значение температуры рабочих валков среднее на 7...11 °С. Это связано с неправильной настройкой системы охлаждения:

– коллекторы для охлаждения верхних рабочих валков значительно удалены от поверхности валков, что снижает интенсивность охлаждения, и приводит к необходимости повышения расхода охладителя;

– коллекторы для охлаждения нижних рабочих валков расположены на расстоянии, не позволяющем сохранить эффект набегания охладителя (энергию струи).

2. Отсутствует возможность управления тепловым профилем валка.

3. Отсутствуют средства для управления расходом охладителя для каждой из клетей, что делает невозможным регулировать интенсивность охлаждения.

4. Отсутствуют технические средства для отсечки отработанного охладителя и осушения поверхности металла и валков после их охлаждения. В результате этого отработанный охладитель, находящийся на верхней поверхности листа, попадает в очаг деформации, что приводит к повышенному износу валков.

Для устранения вышеуказанных недостатков на основе разработанной математической модели теплового состояния рабочих валков (глава 4) необходимо решить вопросы совершенствования оборудования системы охлаждения рабочих валков в непрерывной чистовой группе клетей [256].

Совершенствование оборудования системы охлаждения в непрерывной чистовой группе клетей

Для проведения комплекса научно исследовательских работ по совершенствованию системы охлаждения и параметров её настройки был проведен промышленный эксперимент.

Цель эксперимента заключалась в оценке текущего состояния и настройке оборудования (коллекторов охлаждения) рабочих валков чистовой группы клетей.

Практическая реализация эксперимента. На поверхность валков, подготовленных к завалке, предварительно была нанесена водоэмульсионная краска. После завалки валков кратковременно включалась система охлаждения. В результате кратковременного воздействия охладителя на поверхности валков образуются характерные следы. После этого валки извлекались из клетей для визуального обследования. Эксперимент проводился на первых 4-х клетях (№№ 7-10) непрерывной группы клетей стана 2000 г.п. ПАО «ММК». В качестве примера на рисунке 5.14-5.16 приведены результаты испытаний для 8-й клетки листового стана 2000 г.п. ПАО «ММК».

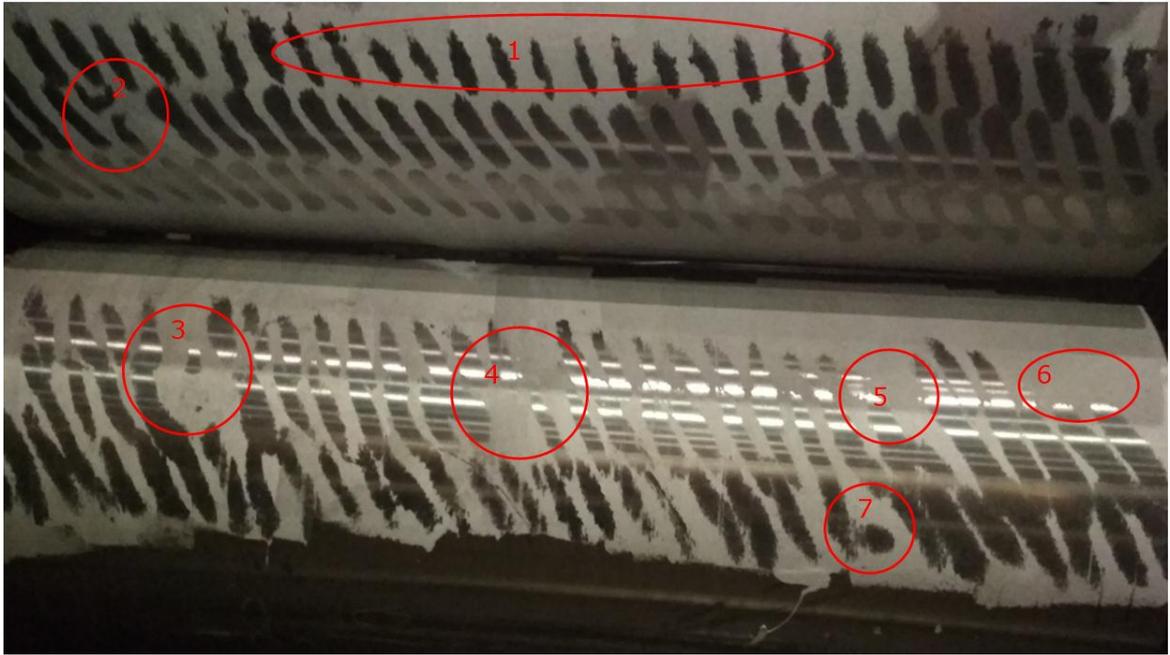


Рисунок 5.14 - Следы воздействия форсунок охлаждения для верхнего и нижнего рабочего валка.
Выходная сторона, клеть № 8 (до модернизации)

На рисунке 5.14 приведены результаты воздействия струй охладителя из форсунок на поверхности верхнего и нижнего рабочего валка с выходной стороны клетки №8. При анализе полученных данных в выделенных областях отмечены следующие отклонения:

- зона «1» – пониженное давление в форсунках нижнего ряда;
- зона «2» – разбиение струи форсунки вследствие засора;
- зоны «3, 4, 5, 6» – нарушение функциональной работы форсунок (засор или др. причины);
- зона «7» – неисправно работающая форсунка (предположительно локальный износ, в т.ч. вызванный засором).

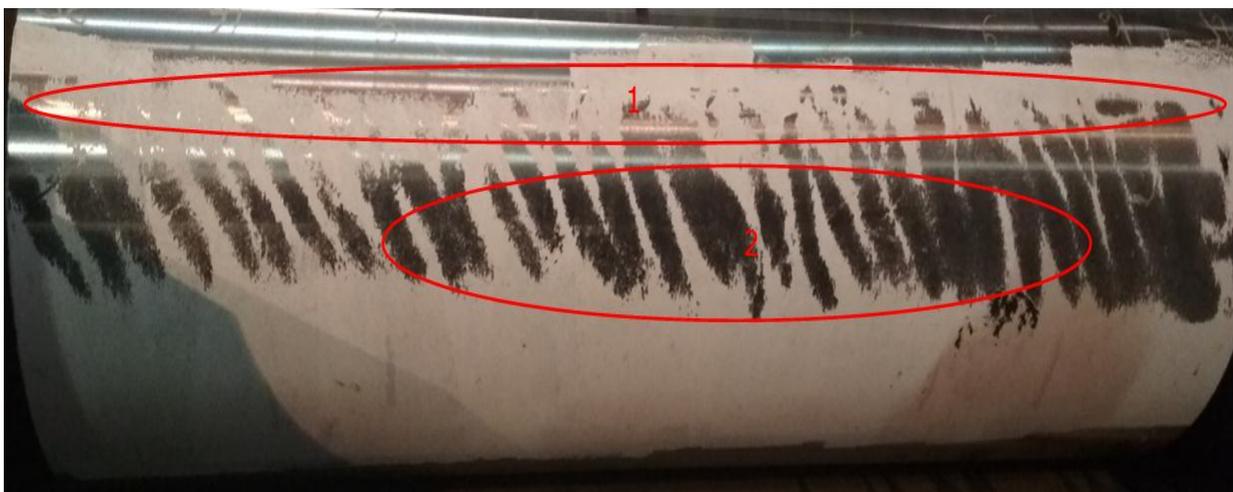


Рисунок 5.15 - Следы воздействия форсунок охлаждения для верхнего рабочего валка.
Входная сторона, клеть № 8 (до модернизации)

На рисунке 5.15 приведены результаты эксперимента для клетки № 8 (верхний рабочий валок, входная сторона). На представленной фотографии выделены следующие отклонения:

- зона «1» – пониженное давление в форсунках нижнего ряда;
- зона «2» – отклонения в углах наклона форсунок.

На рисунке 5.16 приведены результаты эксперимента для клетки № 8 (нижний рабочий валок, входная сторона).

В выделенных областях выделены следующие отклонения:

- зоны «1» и «б» – неэффективная работа форсунок в результате неправильного проектирования системы промывочных отверстий;
- зоны «2» и «3» – нарушение функциональной работы форсунок (разбиение и частичное истечение струй вследствие засора).



Рисунок 5.16 - Следы воздействия форсунок охлаждения для нижнего рабочего валка.
Входная сторона, клетки № 8 (до модернизации)

Анализ полученных результатов позволил сделать выводы о том, что оборудование системы охлаждения чистовой группы клеток настроено не достаточно корректно. В процессе эксплуатации наблюдаются неэффективный теплосъем с поверхности валка охладителем.

Для устранения вышеуказанной проблемы необходимо проведение работ, направленных на совершенствование оборудования системы охлаждения рабочих валков в непрерывной черновой группе клеток. Предложен и научно обоснован ряд технических мероприятий, заключающихся в определении рационального местоположения коллекторов охлаждения, а также выдаче рекомендаций по распределению охладителя по длине бочки рабочих валков.

Определение рационального местоположения коллекторов системы охлаждения

С целью повышения эффективности охлаждения рабочих валков на основе разработанной математической модели теплового состояния для системы «рабочий валок – полоса» (глава 4) с учетом заданного расхода (л/ч), давления (Р, МПа), а также оптимальных зон охлаждения (облива) валков, определены рациональные (новые) месторасположения коллекторов охлаждения в непрерывной чистовой группе клеток стана № 7-13.

Определение нового месторасположения коллекторов охлаждения было реализовано с помощью разработанного комплекса программных продуктов для ЭВМ [250,277]:

– № 2016610433 «Расчет оптимального положения коллектора охлаждения рабочего валка стана для максимального соответствия заданному диапазону температур»;

– № 2016610434 «Автоматизированный расчет теплового состояния поверхностного слоя рабочего валка стана с учетом положения охлаждающих коллекторов».

Результаты исследований систематизированы и приведены в таблице 5.7. Рекомендации геометрического расположения коллекторов охлаждения представлены на рисунке 5.17.

Разработанные рекомендации прошли промышленную апробацию и внедрены в условиях действующего производства, на что получен соответствующий **Акт (Приложение И)**.

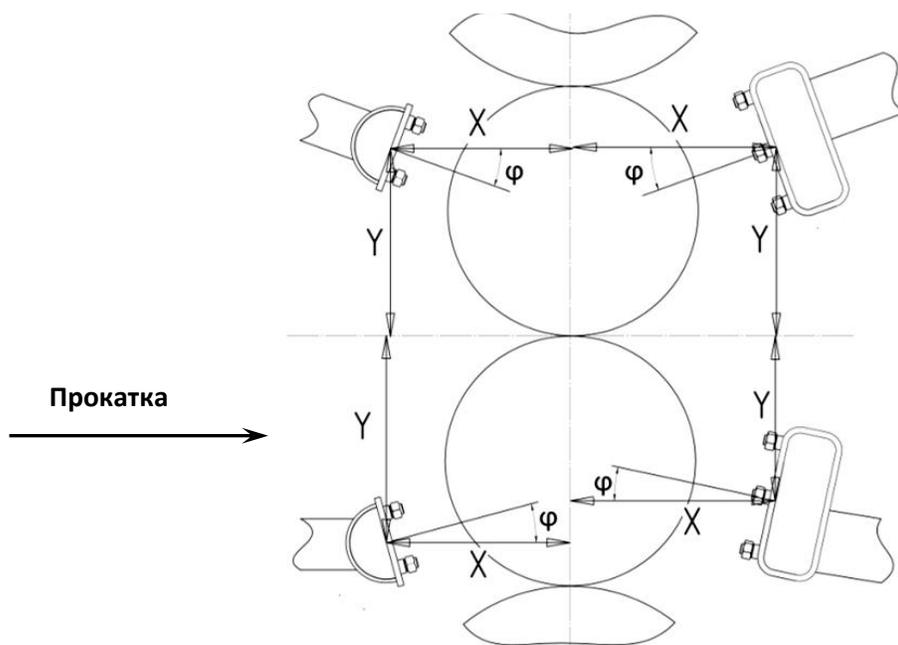


Рисунок 5.17 - Расчетная схема для настройки системы охлаждения рабочих валков в непрерывной чистовой группе клетей №№ 7-13

Таблица 5.7 - Настройка системы охлаждения непрерывной чистовой группы клетей стана №№7-13

Положение рабочих валков вала		Положение коллектора			Тип коллектора				Тип форсунок	
		Относительно оси прокатки (координата X), мм	Относительно оси прокатки (координата Y), мм	Угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки (положительный угол)	Количество форсунок	Рядность	Угол перекрытия, град	Шаг между форсунками/рядами, мм		Расход воды через коллектор, м ³ /ч, при давлении охладителя не менее 08 МПа
Непрерывная чистовая группа клетей										
Клеть № 7,8,9,10										
Входная сторона	Верхний	Кл.7:- 500 Кл.8:- 500 Кл.9:- 580 Кл.10:- 580	Кл.7: 730 Кл.8: 730 Кл.9: 710 Кл.10: 710	20°	Верхний ряд 32 Нижний ряд 31	2	50	50/110	Клеть №7 1270 Клеть №8 1270 Клеть №9 1125 Клеть №10	Верхний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №555.014. Нижний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №555.954
	Нижний	Кл.7:- 500 Кл.8:- 500 Кл.9:- 580 Кл.10:- 580	Кл.7:- 730 Кл.8: - 730 Кл.9:- 710 Кл.10:- 710	55°	Верхний ряд 31 Нижний ряд 32	2	50	50/110		Верхний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №554.954. Нижний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №555.014
Выходная сторона	Верхний	Кл.7: 500 Кл.8: 500 Кл.9: 580 Кл.10: 580	Кл.7: 730 Кл.8: 730 Кл.9: 710 Кл.10: 710	20°	Верхний ряд 32 Средний ряд 31 Нижний ряд 32	3	50	50/110	975 745	Верхний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №554.954. Средний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №554.044 Нижний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №555.084
	Нижний	Кл.7:- 500 Кл.8:- 500 Кл.9:- 580 Кл.10:- 580	Кл.7:- 420 Кл.8:- 420 Кл.9:- 410 Кл.10:- 410	0°	Верхний ряд 32 Средний ряд 31 Нижний ряд 32	3	50	50/110		Верхний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №555.084. Средний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №555.014 Нижний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №554.954

Положение рабочих валков вала		Положение коллектора			Тип коллектора				Тип форсунок	
		Относительно оси прокатки (координата X), мм	Относительно оси прокатки (координата Y), мм	Угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки (положительный угол)	Количество форсунок	Рядность	Угол перекрытия, град	Шаг между форсунками/рядами, мм		Расход воды через коллектор, м ³ /ч, при давлении охладителя не менее 08 МПа
Клеть № 11,12,13										
Входная сторона	Верхний	Кл.11:- 570 Кл.12:- 570 Кл.13:- 550	Кл.11: 710 Кл.12: 700 Кл.13: 700	20 ⁰	Верхний ряд 32 Нижний ряд 31	2	50	50/110	Клеть №11 850 Клеть №12 850 Клеть №13 745	Верхний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №559.284. Нижний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №5595.283
	Нижний	Кл.11:- 580 Кл.12:- 570 Кл.13:- 570	Кл.11:- 710 Кл.12: - 700 Кл.13:- 700	55 ⁰	Верхний ряд 31 Нижний ряд 32	2	50	50/110		Верхний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №559.284. Нижний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №5595.283
Выходная сторона	Верхний	Кл.11: 570 Кл.12: 570 Кл.13: 550	Кл.11: 710 Кл.12: 700 Кл.13: 700	20 ⁰	Верхний ряд 32 Нижний ряд 32	2	50	50/110		Верхний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №559.284. Нижний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №5595.283
	Нижний	Кл.11:- 570 Кл.12:- 570 Кл.13:- 550	Кл.11:- 410 Кл.12:- 400 Кл.13:- 400	0	Верхний ряд 32 Нижний ряд 32	2	50	50/110		Верхний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №559.284. Нижний ряд плоскофакельные, Lechler типоразмер №5595.283

Изменение расположение форсунок в коллекторах системы охлаждения

Для первых трех чистовых клетей непрерывной группы, которые подвержены наиболее интенсивному тепловому воздействию (клетки №№7-9), предложено новое техническое решение, заключающиеся в изменении расположения форсунок в коллекторах системы охлаждения. Расчетные схемы расположение форсунок представлены на рисунках 5.18 и 5.19.

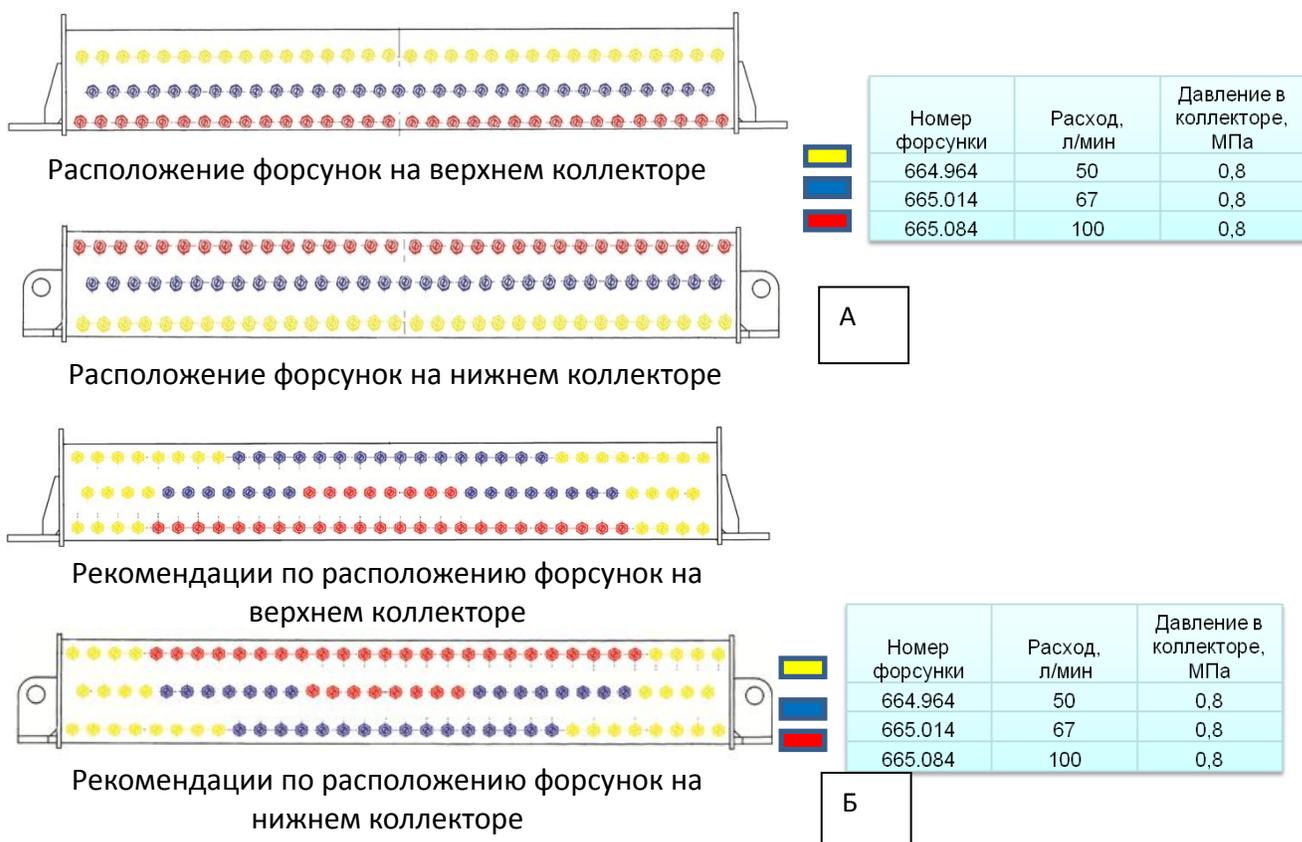


Рисунок 5.18 - Расположение форсунок охлаждения для верхнего и нижнего коллекторов на выходной стороне клеток №№ 7-9 стана 2000 г.п. ПАО «ММК»: А - существующая схема расположения форсунок; Б - предлагаемая схема расположения форсунок.

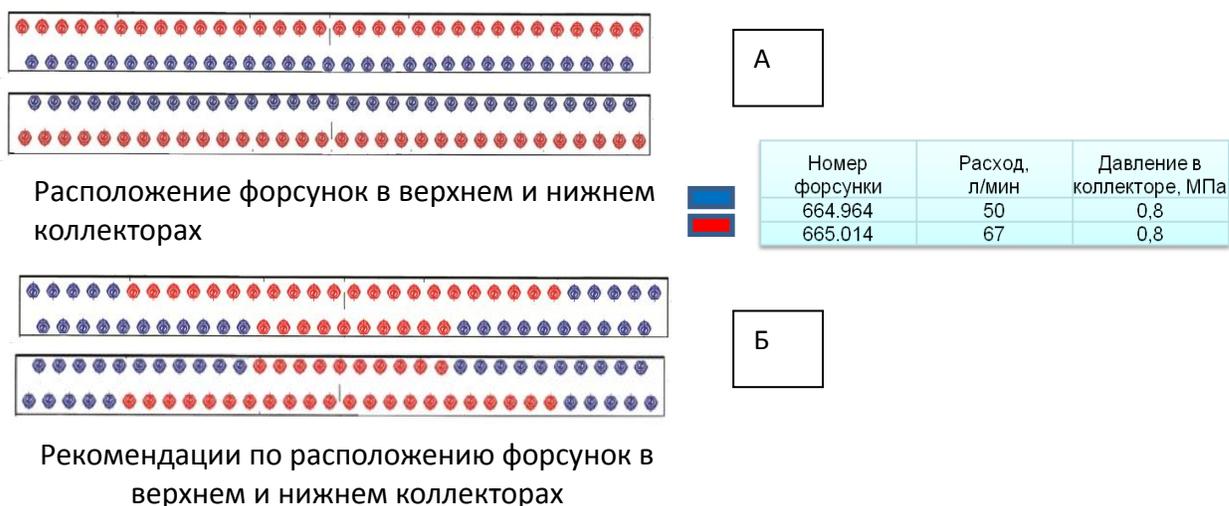


Рисунок 5.19 - Расположение форсунок охлаждения для верхнего и нижнего коллекторов на входной стороне клеток №№ 7- 9 стана 2000 г.п. ПАО «ММК»: А - существующая схема расположения форсунок; Б - предлагаемая схема расположения форсунок.

Для численного анализа предлагаемых решений на рисунках 5.20 и 5.21 приведены графики, описывающие распределение охладителя по длине бочки валка.

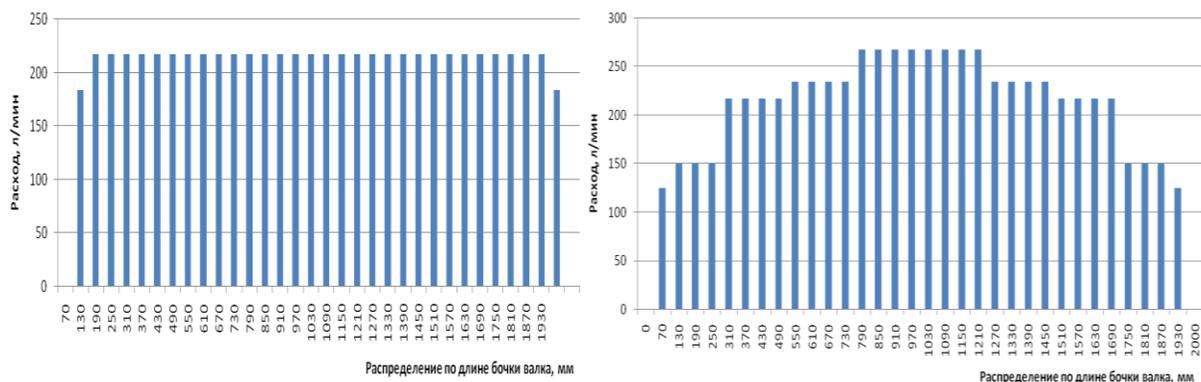


Рисунок 5.20 - Распределение охладителя по длине бочки верхнего рабочего валка для выходной стороны клетей №№ 7-9:
 А - существующая схема расположения форсунок;
 Б - предлагаемая схема расположения форсунок.

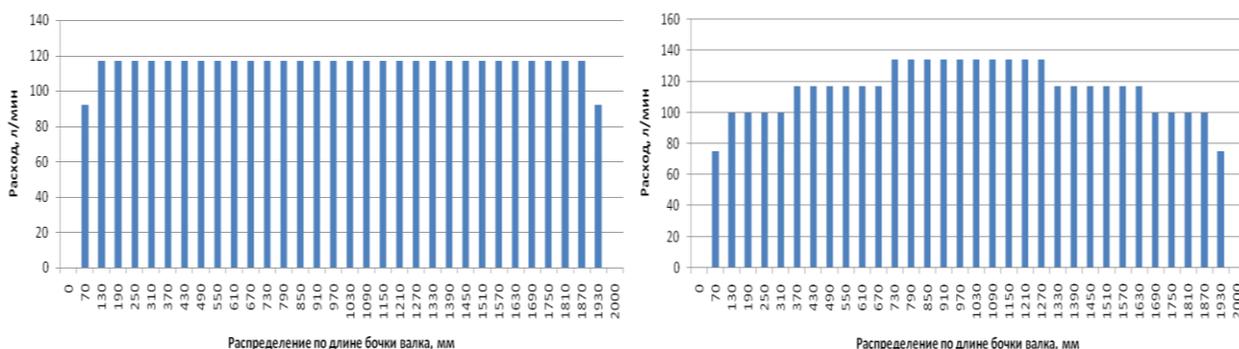


Рисунок 5.21 - Распределение охладителя по длине бочки верхнего рабочего валка для входной стороны клетей № 7-9:
 А - существующая схема расположения форсунок;
 Б - предлагаемая схема расположения форсунок.

5.4.3 Оценка эффективности предложенных технических решений

После настройки системы охлаждения в чистой группе клетей стана по предложенным рекомендациям был произведен повторный промышленный эксперимент по алгоритму описанному выше. Полученные результаты эксперимента приведены на рисунке 5.22.

Результаты исследования показывают, что распределение охладителя по клетям стало более равномерным, при эксплуатации валков отсутствуют визуальные дефекты на рабочей поверхности валка, например, такие как «сетка разгара».

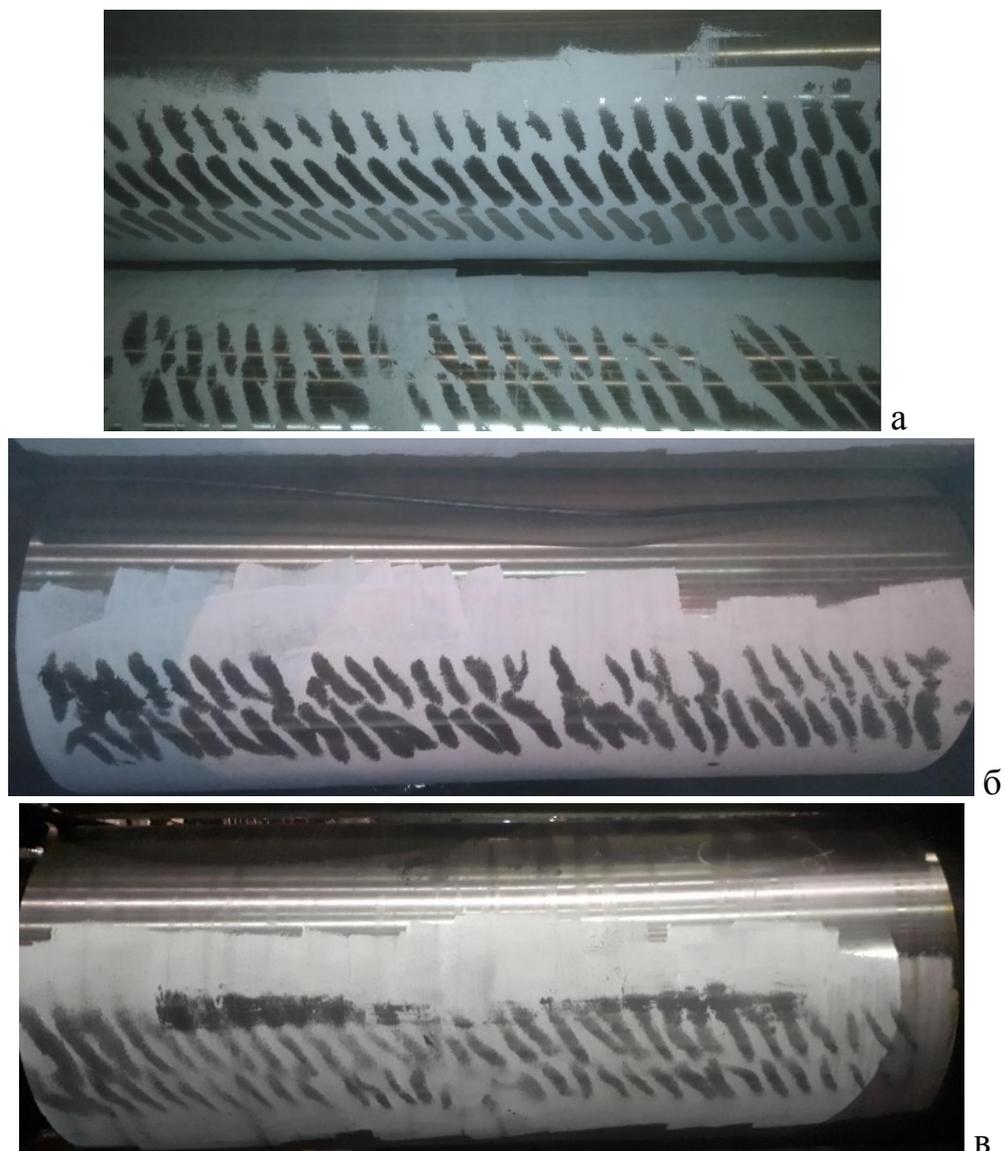


Рисунок 5.22 - Следы воздействия струй форсунок охлаждения на рабочих валках в клети № 8.

- а - следы воздействия струй форсунок охлаждения на поверхности верхнего и нижнего рабочих валков, выходная сторона (после модернизации);
- б - следы воздействия струй форсунок охлаждения на верхнем рабочем валку, входная сторона (после модернизации);
- в - следы воздействия струй форсунок охлаждения на нижнем рабочем валке, входная сторона (после модернизации).

Экспериментальное измерение температур рабочих валков в чистой группе клетей производили при помощи переносного бесконтактного пирометра Time T_i 213EL (точность измерения: +1% или +1°C). Расчетное значение измеренных температур определено с учетом специальной методики, регламентирующей порядок измерения и определения температуры рабочих валков (Приложении П).

В таблице 5.8 в качестве примера приведены сравнительные результаты измерения температуры рабочих валков в чистой группе клетей. Для сравнительного анализа выбирались приблизительно одинаковые монтажные партии.

Из баз данных цехового учета фиксировалась величина съема рабочего слоя валков при перешлифовке. В общей сложности получены данные после 70 монтажных партий. В качестве примера в таблице 5.8 приведена часть результатов для клетей №№7-13.

Таблица 5.8 - Результаты измерений температуры и величины съемов рабочих валков для непрерывной чистой группы клетей

№ клетки	№ валка	Положение валка	Диаметр валка	Съем рабочего слоя валков, мм			Температура валков, °С		
				До	После	Снижение /%/	До	После	Снижение /%/
7	271	Верхний	815,10	0,60	0,56	6,67	85	80	5,88
7	270	Нижний	814,40	0,61	0,56	8,20	86	80	6,98
8	304	Верхний	856,10	0,60	0,57	5,00	87	80	8,05
8	303	Нижний	855,70	0,60	0,57	5,00	88	81	7,95
9	923	Верхний	786,30	0,60	0,57	5,00	87	79	9,20
9	247	Нижний	786,10	0,60	0,57	5,00	88	80	9,09
10	113	Верхний	762,90	0,60	0,57	5,00	87	79	9,20
10	112	Нижний	763,40	0,60	0,57	5,00	89	81	8,99
11	71	Верхний	775,10	0,60	0,57	5,00	90	81	10,00
11	65	Нижний	775,40	0,60	0,57	5,00	87	78	10,34
12	95	Верхний	799,50	0,70	0,65	7,14	88	79	10,23
12	93	Нижний	799,70	0,70	0,65	7,14	89	80	10,11
13	84	Верхний	787,80	0,50	0,47	6,00	89	79	11,24
13	83	Нижний	787,70	0,50	0,47	6,00	90	80	11,11
7	283	Верхний	826,20	0,50	0,47	6,00	84	79	5,95
7	281	Верхний	825,00	0,50	0,47	6,00	85	80	5,88
7	282	Нижний	825,50	0,50	0,47	6,00	85	80	5,88

№ клетки	№ валка	Положение валка	Диаметр валка	Съем рабочего слоя валков, мм			Температура валков, °С		
				До	После	Снижение /%/	До	После	Снижение /%/
8	287	Верхний	838,60	0,60	0,57	5,00	86	79	8,14
8	286	Нижний	838,00	0,60	0,57	5,00	87	80	8,05
9	225	Верхний	787,20	0,70	0,65	7,14	86	78	9,30
9	226	Нижний	787,00	0,70	0,65	7,14	87	79	9,20
10	126	Верхний	769,40	0,60	0,57	5,00	86	78	9,30
10	172	Нижний	769,60	0,60	0,57	5,00	87	79	9,20
11	30	Верхний	764,10	0,70	0,65	7,14	89	80	10,11
11	29	Нижний	764,40	0,70	0,65	7,14	88	79	10,23
12	362	Верхний	800,30	0,60	0,57	5,00	87	78	10,34
12	363	Нижний	800,50	0,60	0,57	5,00	88	79	10,23
13	87	Верхний	792,20	0,50	0,45	10,00	88	78	11,36
13	88	Нижний	792,10	0,50	0,45	10,00	89	79	11,24
7	284	Верхний	829,00	0,50	0,48	4,00	87	82	5,75
7	285	Нижний	828,30	0,50	0,47	6,00	85	80	5,88
8	298	Верхний	854,30	0,80	0,77	3,75	88	81	7,95
8	397	Нижний	853,90	0,81	0,77	4,94	90	83	7,78
9	303	Верхний	793,90	0,81	0,77	4,94	88	80	9,09
9	818	Нижний	794,40	0,81	0,77	4,94	90	82	8,89
10	160	Верхний	772,90	0,81	0,77	4,94	87	79	9,20
10	161	Нижний	773,10	0,80	0,77	3,75	90	82	8,89
11	33	Верхний	777,50	0,60	0,57	5,00	92	83	9,78
11	43	Нижний	777,80	0,60	0,57	5,00	85	76	10,59
12	36	Верхний	799,80	0,50	0,45	10,00	87	78	10,34
12	37	Нижний	800,00	0,50	0,45	10,00	90	81	10,00
13	60	Верхний	780,10	0,50	0,45	10,00	91	81	10,99
13	48	Нижний	780,00	0,50	0,45	10,00	90	80	11,11
7	275	Верхний	831,70	0,70	0,65	7,14	87	82	5,75
7	275	Нижний	831,00	0,70	0,65	7,14	88	83	5,68
8	301	Верхний	854,70	0,70	0,65	7,14	89	82	7,87
8	302	Нижний	854,20	0,80	0,75	6,25	90	83	7,78
9	912	Верхний	790,90	0,80	0,75	6,25	88	80	9,09
9	911	Нижний	790,70	0,80	0,75	6,25	90	82	8,89
10	102	Верхний	763,20	0,90	0,85	5,56	88	80	9,09
10	101	Нижний	763,40	0,90	0,85	5,56	89	81	8,99
11	32	Верхний	774,40	0,90	0,85	5,56	89	80	10,11
11	31	Нижний	774,70	0,90	0,85	5,56	87	78	10,34
12	365	Верхний	803,50	0,90	0,85	5,56	87	78	10,34
12	364	Нижний	803,70	0,90	0,85	5,56	89	80	10,11
13	78	Верхний	784,30	0,90	0,85	5,56	90	80	11,11
13	73	Нижний	784,40	0,90	0,85	5,56	91	81	10,99

Итоговые (усредненные) значения снижения технологических параметров в непрерывной чистой группе клеток №№7-13 приведены в таблице 5.9 и подтверждены Актом (приложение И).

Таблица 5.9 - Результаты мероприятий по совершенствованию оборудования системы охлаждения рабочих валков в непрерывной чистой группе клетей

Номер клетки	Температура до внедрения, град	Температура после внедрения, град	Среднее значение падения температуры, град/%	Среднее значение уменьшение съема, %
Чистовая группа клетей				
7	85	79	6 (7)	5,2
8	87	80	7 (8)	5,3
9	87	79	8 (9)	5,5
10	87	79	8 (9)	4,5
11	88	79	9 (10)	5,3
12	88	79	9 (10)	5,8
13	89	79	10 (11)	5,3
Примечание Величина съема до внедрения, составляла 0,5...0,9 мм. Величина съема после внедрения, составила 0,5...0,8 мм.				

По результатам положительного промышленного эксперимента выпущено технологическое письмо ТД 0555 от 12.09.2018 г., регламентирующее настройку системы охлаждения в чистой группе клетей (**приложение К**).

В результате настройки и совершенствования оборудования и режимов подачи охладителя зафиксировано снижение величины съема валков при их последующей перешлифовке в среднем на 4,5...5,8%. В результате достигнуто снижение ресурсоёмкости при производстве ЛГП не менее 5 эксплуатационных часов, что составляет 5% от эксплуатационного ресурса рабочих валков.

Выводы по результатам промышленного внедрения в непрерывной чистой группе клетей

1. Произведена настройка оборудования системы охлаждения рабочих валков в непрерывной чистой группе клетей. Определены рациональные места положения коллекторов, выданы рекомендации по изменению расположения форсунок в коллекторах системы охлаждения.

2. Достигнуто снижение температуры рабочих валков в непрерывной чистовой группе клетей на 6...10⁰С (7...11%) за счет разработки и внедрения нового алгоритма настройки теплового состояния рабочих валков, заключающегося в определении рационального местоположения коллекторов и разработке рекомендаций по охлаждению. Результаты исследований подтверждены Актом (**приложение И**).
3. В результате настройки и совершенствования оборудования и режимов подачи охладителя зафиксировано снижение величины съема валков при их последующей перешлифовке в среднем на 4,5...5,8%. В результате достигнуто снижение ресурсоёмкости при производстве ЛГП не менее чем на 5 эксплуатационных часов, что составляет 5% от эксплуатационного ресурса рабочих валков.
4. По результатам внедрения получены следующие практические результаты:
 - внедрение в условиях действующего производства, что подтверждается актом передачи научно технической продукции (**приложение И**);
 - технологическое письмо ТД 0555 от 12.09.2018 г. о настройке системы охлаждения (**приложение К**).

Разработка и внедрение рекомендаций по назначению расходов охладителя в системе охлаждения рабочих валков

Разработка технологии подачи охладителя в непрерывной чистовой группе клетей является достаточно сложной технологической задачей, поскольку особенностью эксплуатации листовых станов горячей прокатки является то, что практически не существуют одинаковых монтажных партий.

В настоящее время в технологии листовой горячей прокатки существуют только общие рекомендации при формировании монтажных партий, но при этом в технической документации (в том числе у производителей

широкополосной горячекатаной стали), а также в литературе отсутствуют четкие сведения об их классификации.

На первом этапе для решения задач по выдаче рекомендаций по назначению расходов охладителя в системе охлаждения рабочих валков было предложено разработать условную классификацию прокатываемых монтажей.

Классификация прокатываемых монтажей разрабатывалась по нескольким важным технологическим параметрам:

- средний вес прокатываемого монтажа ($W_{срi}$, т);
- средняя толщина прокатываемого монтажа (H_i , м);
- суммарная длина прокатываемых полос ($\sum L_i$ м).

Численное определение предложенных параметров определяется следующим образом:

$$W_{ср} = \frac{W_{сум}}{n},$$

где $W_{сум}$ – суммарный вес прокатанных полос в монтаже, т;

n – количество прокатанных полос в i -ом монтаже, шт;

k_L – коэффициент, учитывающий суммарную длину монтажа $L_{сум}$, м, который определяется:

$$k_L = \frac{W_{ср}}{L_{сум}}.$$

Для предложенной классификации за период 2015-2018 гг., на примере листовых станов 2000 и 2500 г.п. ПАО «ММК», проведены статистические исследования прокатываемого сортамента. Анализ результатов исследований позволил условно разделить прокатываемый сортмент на 3 группы. Результаты условной классификации прокатываемых монтажных партий приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 - Условная классификация монтажных партий

№ группы	Значение $W_{cp,T}$	Значение коэффициента k_L
1-ая группа	$W_{cp} < 2150$	$k_L \leq 0,025$
		$k_L > 0,025$
2-ая группа	$2150 \leq W_{cp} \leq 2850$	$k_L \leq 0,025$
		$k_L > 0,025$
3-ая группа	$W_{cp} > 2850$	$k_L \leq 0,025$
		$k_L > 0,025$

5.5 Численное определение режимов охлаждения в непрерывной чистовой группе клетей

Для определения требуемого количества подаваемого охладителя на каждую из прокатных клетей (V_i , м³/ч) и суммарного объема охладителя, подаваемого насосным агрегатом (V_Σ , м³/ч), на основе разработанной и численно реализованной математической модели (п. 5.1) был произведен выбор режимов подачи охладителя согласно разработанному алгоритму. Разработанный алгоритм в виде укрупненной блок-схемы представлен на рисунке 5.23.

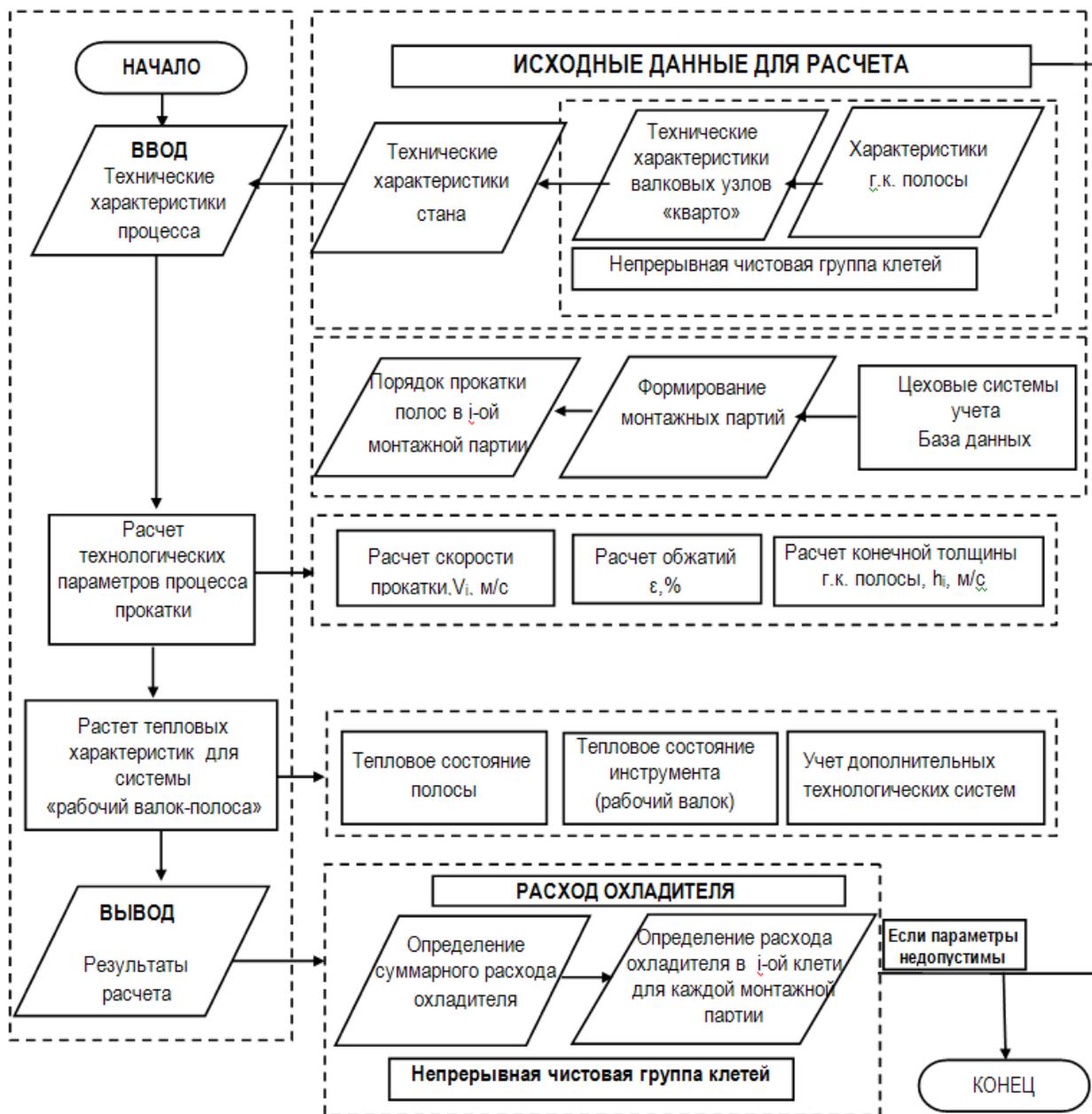


Рисунок 5.23 - Алгоритм модели для определения режимов охлаждения рабочих валков при производстве ЛГП

Представленный на рисунке 5.23 алгоритм является универсальным и позволяет выдавать практические рекомендации по режимам охлаждения на поверхность рабочих валков применительно к листовым станам горячей прокатки (стан 2000 и 2500 ПАО «ММК», стан 2800 Новотроицкого комбината и др. аналогичные станы).

С учетом особенностей исследуемого листового стана горячей прокатки, и достижения поставленной цели, в алгоритме предусмотрена процедура ввода исходных данных, а также вывода результатов расчета. В алгоритм также заложено последовательное выполнение расчетов параметров процесса прокатки, теплового состояния для системы «инструмент-заготовка», а также оценивание полученных параметров и коррекция исходных данных.

Входной параметр «**Технические характеристики стана**» включает большое количество значений и параметров, которые характеризуют конкретно используемое оборудование. Управляемые параметры (диаметр рабочих и опорных валков, суммарное количество подаваемого охладителя, скорость прокатки и т.д.) задаются вручную с учетом особенностей исследуемого стана и процесса прокатки. Неизменные параметры (максимальный крутящий момент электродвигателя главного привода, максимальное усилие прокатки, число оборотов двигателя) задаются в автоматическом режиме и характеризуют выбор определенного типа стана.

Для каждого стана, а также для каждой прокатной клетки, значения управляемых параметров могут изменяться перед прокаткой i -ой монтажной партии. Для этого необходимо учитывать и постоянно актуализировать данные по настройке системы охлаждения, в том числе геометрическое месторасположение коллекторов, тип и характеристики применяемых форсунок и т.д.

Результаты расчетов позволяют выбрать наиболее рациональный режим охлаждения рабочих валков исходя из технических возможностей системы охлаждения, а также заданного условия $T_{расч} \approx T_{задан}$, где $T_{задан}$ ($^{\circ}C$) – рекомендуемая температура рабочих валков чистовой группы клеток.

Таким образом, на основе алгоритма определения режимов охлаждения рабочих валков для исследуемого объекта (листового стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК») был произведен расчет наиболее рациональных режимов

охлаждения рабочих валков. В качестве начальных условий помимо параметра «Технические характеристики стана» было задано:

– $T_{\text{задан}} = 80 \dots 85 \text{ } ^\circ\text{C}$ – рекомендуемая температура рабочих валков чистовой группы клетей;

– $V_{\Sigma} = 7800 (\pm 100) \text{ м}^3/\text{ч}$ – суммарный объем охладителя, подаваемый насосным агрегатом.

При выполнении расчетов было обработано порядка 70 монтажных партий. Результаты расчета систематизированы и приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 - Настройка системы охлаждения непрерывной чистовой группы клетей №№7-13 на примере стана 2000 г.п. ПАО «ММК»

Характеристики монтажа		Расход охладителя, м ³ /час						
Значение $W_{\text{ср}}, \text{ T}$	Значение коэффициента k_L	Чистовая группа клетей						
		7	8	9	10	11	12	13
$W_{\text{ср}} < 2150$	$k_L \leq 0,025$	1280,2	1458,2	1174,2	1058,1	1002,8	986,1	835,74
	$k_L > 0,025$	1380,29	1508,2	1123,5	1002,8	1002,8	947,14	835,71
$2150 \leq W_{\text{ср}} \leq 2850$	$k_L \leq 0,025$	1180,29	1408,2	1144,2	1058,5	1058,5	1002,8	1180,2
	$k_L > 0,025$	1239,29	1478,2	1126,5	1058,5	1058,5	947,14	891,43
$W_{\text{ср}} > 2850$	$k_L \leq 0,025$	1134,29	1398,2	1088,5	1058,5	1058,5	1058,5	1002,6

Современные станы горячей прокатки зачастую оснащены системами учета количества подаваемого охладителя на каждую клеть (расходомеры). Применяемые расходомеры, рассчитанные на достаточно большой объем измеряемой жидкости, обладают достаточно большой погрешностью измерения ($\pm 10\%$), и, кроме того, требуют постоянной поверки. На практике наиболее широкое применение получили системы регулирования расходов охладителя при помощи управляемых гидрозатворов или ручных задвижек (вентилей). Данные поступающие с расходомеров для технологов прокатного стана являются контролирующими параметрами.

Для управления системой охлаждения рабочих валков при помощи гидрозатворов был произведен перерасчет технологических параметров, результаты приведены в таблице 5.10.

Количество подаваемого охладителя косвенно отражено через технологический параметр «Процент открытия гидрозатвора системы охлаждения валков (%)». Результаты расчетов, представленные в таблицах 5.11 и 5.12, являются тождественными.

Таблица 5.12 - Настройка системы охлаждения непрерывной чистой группы клеток №№7-13 стана 2000 г.п. ПАО «ММК»

Характеристики монтажа		Процент открытия гидрозатвора СОВ (%)						
Значение $W_{cp,T}$	Значение коэффиц иента k_L	Чистовая группа клеток						
		7	8	9	10	11	12	13
$W_{cp} < 2150$	$k_L \leq 0,025$	100	100	100	95	90	85	75
	$k_L > 0,025$	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

Примечание: Если прокатываемый монтаж не укладывается в классификацию, указанную в таблице приложения А, а также для уточнения процента открытия гидрозатвора системы СОВ (%) по текущим монтажа, рекомендуется произвести расчет по программному алгоритму п.5.1-5.5.

Разработанные рекомендации прошли промышленную апробацию. Результаты исследования внедрены в условиях действующего производства, что подтверждается технологическим письмом ТД-0554 от 12.09.2018 «О настройке системы охлаждения» (см. Приложение Л).

Оценка эффективности предложенных и внедренных решений производилась путем сравнения рабочей температуры рабочих валков после вывалки. Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 - Изменение значений температуры рабочих валков после внедрения рекомендаций согласно ТД-0554 от 12.09.2018

Характеристика монтажа	Положение валка	Номер клетки:						
		7	8	9	10	11	12	13
Температура, °С								
$W_{\text{сумм}} < 2150$ $k_L \leq 0,025$	верх.	-1,0	-2,8	-2,2	-1,4	-1,4	+3,2	+5,5
	нижн.	-1,2	-1,0	-1,8	1,5	-2,5	+5,8	+5,8
$2150 < W_{\text{сумм}} < 2850$ $k_L \leq 0,025$	верх.	-2,0	-5,0	-4,4	-3,5	-1,4	+2,5	+1,4
	нижн.	-1,8	-5,2	-3,8	-3,8	-2,4	+1,4	+1,5
$2850 < W_{\text{сумм}}$ $k_L \leq 0,025$	верх.	-3,5	-3,4	-3,2	-2,0	-0,5	+1,2	+2,5
	нижн.	-2,0	-2,2	-5,5	-3,8	-1,4	+3,5	+2,0
Примечание: «-» указывает на снижение температуры прокатных валков, градус °С; «+» указывает на повышение температуры прокатных валков, градус °С.								

Результаты проведенных испытаний показывают, что перераспределение объемов подаваемого охладителя на каждую из прокатных клеток чистовой группы оказывает положительное влияние на эксплуатационные характеристики рабочих валков. Так, например, для первых трех клеток (№№7-9) отмечается незначительное падение температуры рабочих валков, которое приводит к стабилизации теплового состояния валков. Отмечается, что при дальнейшей их эксплуатации на рабочих поверхностях валков полностью отсутствуют дефекты поверхности (риски, выкрошка, сетка разгара и т.д.).

Отмечается незначительное увеличение температуры на последних клетях стана. В процессе эксплуатации валков установлено, что увеличение температуры не отражается на ухудшении эксплуатационных параметров валков. Полученное техническое решение защищено патентом на изобретение РФ №2457913 «Способ охлаждения рабочих валков станов горячей прокатки» [278].

Выводы по результатам промышленного внедрения режимов охлаждения в непрерывной чистой группе клетей.

1. Предложена новая классификация прокатываемых монтажных партий, учитывающая средний вес ($W_{срi}$, т), толщину (H_i , м) и суммарную длину прокатываемых полос (ΣL_i м).
2. Для предложенной классификации разработана технология эффективного охлаждения, позволяющая для каждой прокатной клетки в зависимости от технологических параметров прокатки определять количество подаваемого охладителя на поверхность рабочих валков.
3. Разработана методика (на примере листового стана 2000 г.п. ПАО «ММК»), определяющая конкретные режимы подачи охладителя для каждой клетки в зависимости от характеристик прокатываемых монтажных партий.
4. Полученные результаты внедрены в условиях действующего производства, что подтверждается технологическим письмом ТД-0554 от 12.09.2018 «О настройке системы охлаждения» (Приложение Л).

5.6 Разработка мероприятий по совершенствованию технологии и оборудования системы принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации

С целью совершенствования технологии и оборудования для системы принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации в работе проведены следующие научно-технические мероприятия:

- 1) определено рациональное местоположение коллекторов для подачи охладителя на поверхность полосы;
- 2) определен рациональный объем подаваемого охладителя на поверхность полосы;

3) разработаны мероприятия, направленные на исключение попадания охладителя в очаг деформации.

Для решения первой и второй поставленной задачи на разработанной математической модели теплового состояния в системе «рабочий валок – полоса» (глава 4) проведены теоретические исследования. В процессе исследований решались задачи по определению рационального местоположения коллекторов и объема подаваемого охладителя при обязательном выполнении следующих условий:

- расход подаваемого охладителя должен обеспечить максимальный теплосъем с поверхности прокатываемой полосы перед входом ее в очаг деформации;
- выравнивание теплового поля должно произойти непосредственно сразу после процесса пластической деформации прокатываемой полосы;
- наличие ограничений вследствие конструктивных особенностей для четырехвалковых клетей листовых станов горячей прокатки.

В качестве начальных условий для проведения теоретических исследований, на примере 1-ой клетки чистовой группы, было задано:

- объем подаваемого на поверхность полосы охладителя $35 \dots 60 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- скорость прокатки $V_{\text{п}} = 2 \dots 4 \text{ м/с}$;
- величина относительных обжатий $\varepsilon = 50 \dots 60 \%$.

Геометрическое положение коллекторов для подачи охладителя (расчетная схема приведена на рисунке 5.24):

- расстояние по координате X: $400 \dots 500 \text{ мм}$;
- расстояние по координате Y: $180 \dots 250 \text{ мм}$;
- угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки $\varphi: 25 \dots 45 \text{ град}$.

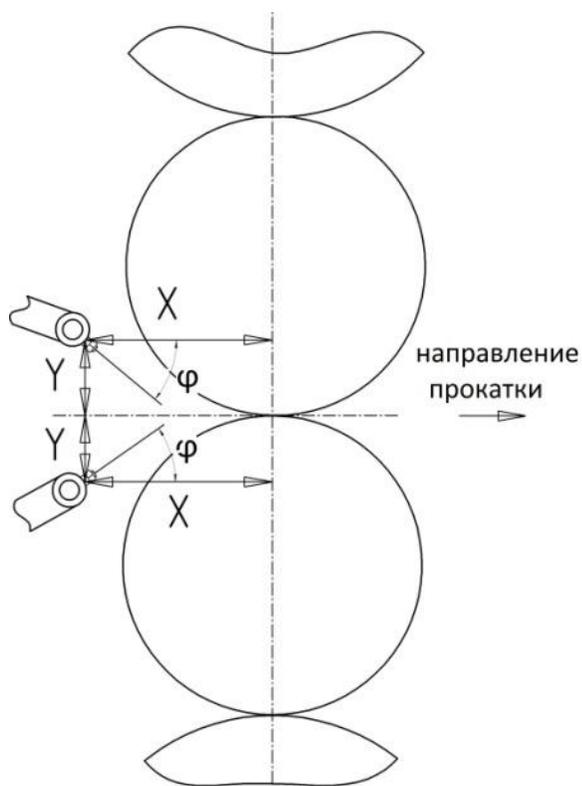
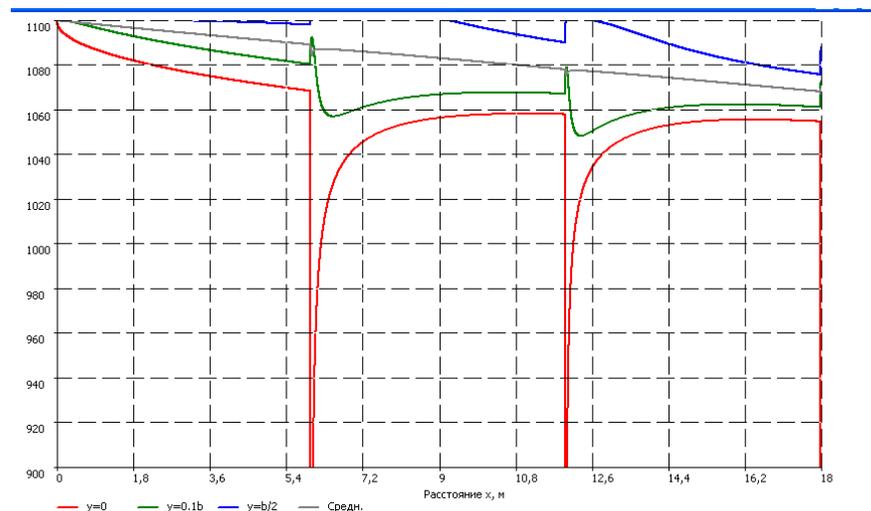


Рисунок 5.24 - Схема местоположения коллекторов для подачи охладителя на поверхность полосы

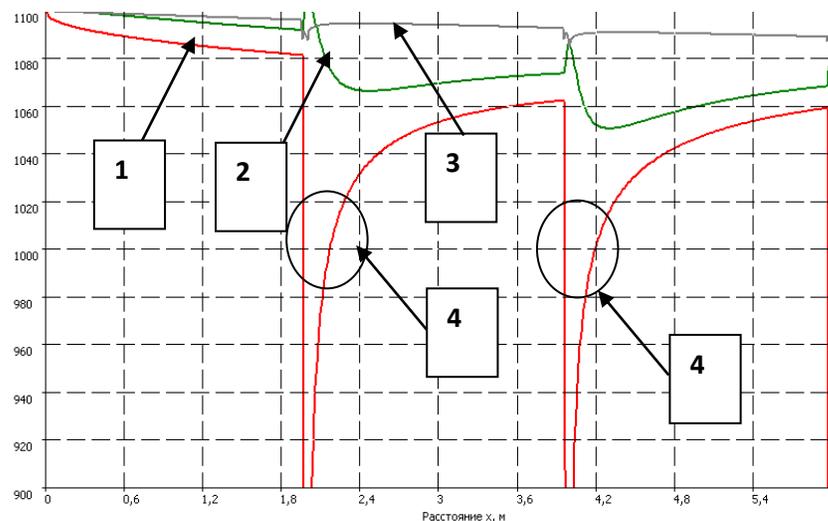
Исследования проводились с помощью разработанного комплекса программных продуктов для ЭВМ [250,277]:

- 1) № 2016610433 «Расчет оптимального положения коллектора охлаждения рабочего валка стана для максимального соответствия заданному диапазону температур»;
- 2) № 2016610434 «Автоматизированный расчет теплового состояния поверхностного слоя рабочего валка стана с учетом положения охлаждающих коллекторов».

Результаты исследования теплового состояния полосы для условия ее принудительного охлаждения перед входом в очаг деформации приведены на рисунке 5.25.



а



б

Рисунок 5.25 - Тепловое состояние полосы при условии ее принудительного охлаждения перед входом в очаг деформации:

А – для условия подачи охладителя $Q = 35 \text{ м}^3/\text{ч}$;

Б – для условия подачи охладителя $Q = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$;

- 1 - кривая, описывающая изменение температуры на поверхности полосы;
- 2 - кривая, описывающая изменение температуры на глубине 10% от поверхности;
- 3 - кривая, описывающая изменение температуры на глубине 50% от поверхности (середина);
- 4 - зона, характеризующая падение температуры от работы коллектора принудительного охлаждения полосы;
- 5 - зона, характеризующая падение температуры на контакте полосы с рабочим валком в очаге деформации.

На основе проведенных исследований определено рациональное 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.

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.

Практическим результатом проведенных исследований являются разработанные рекомендации для определения рационального местоположения коллекторов для подачи охладителя на поверхность полосы. Результаты исследований в виде конкретных рекомендаций представлены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 - Настройка коллекторов для подачи охладителя на поверхность ПОЛОСЫ

Положение рабочих валков	Положение коллектора			Тип коллектора					Тип форсунок
	Расстояние X, мм	Расстояние Y мм	Угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки, φ, град	Количество форсунок, шт.	Рядность	Угол перекрытия, град	Шаг между форсунками, мм	Максимальный расход воды через коллектор, м ³ /ч, при давлении охладителя не менее 0,3 МПа	
Непрерывная чистовая группа клетей №№ 7,8,9									
Верхний	Кл.7: 430 Кл.8: 440 Кл.9: 450	Кл.7: 200 Кл.8: 210 Кл.9: 220	35	15	1	15	120	55...60	плоско-струйные, Lechler, типоразмер №555.084.30
Нижний	Кл.7: 420 Кл.8: 410 Кл.9: 430	Кл.7: 200 Кл.8: 210 Кл.9: 220	35	15	1	15	120	55...60	плоско-струйные, Lechler, типоразмер №555.084.30
Примечание: В качестве начала отсчета приняты: X – горизонтальная ось прокатки, мм; Y – вертикальная ось прокатки, мм (отсчет производить от линии отводящих роликов); φ – угол наклона коллектора, град (отсчет производить от горизонтальной оси прокатки).									

Для решения третьей поставленной задачи разработана и внедрена дополнительная система водовоздушной завесы (Приложения М.1 и М.2), в конструкции которой применяются специально разработанные форсунки, защищенные патентом РФ №110663 [279], представленные на рисунке 5.26. Схема расположения исследуемых систем представлена на рисунке 5.27.



Рисунок 5.26 - Форсунки системы водовоздушной завесы, внедренные в условиях действующего производства

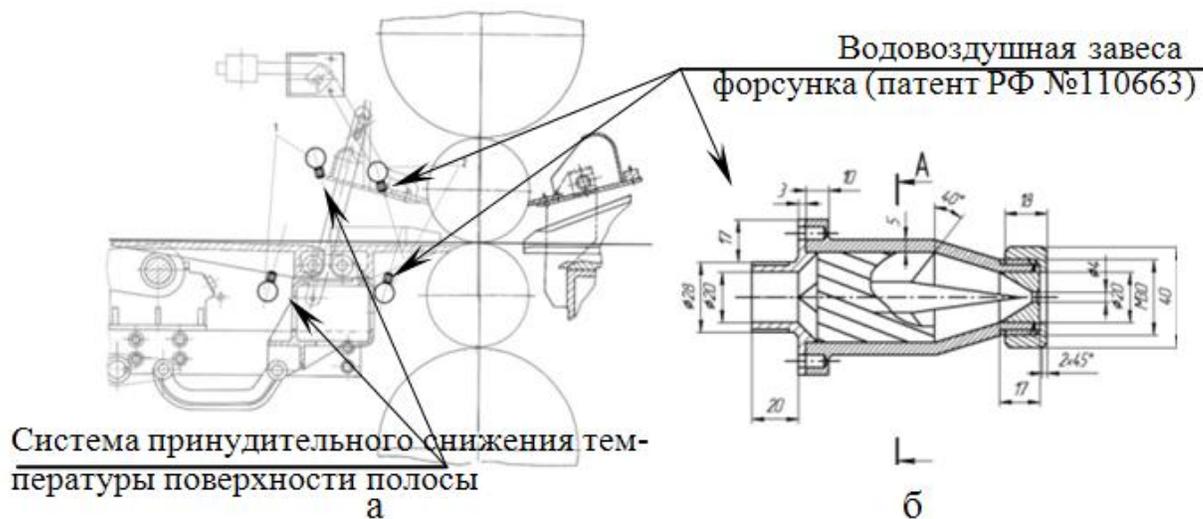


Рисунок 5.27 - Схема расположения (а) системы принудительного снижения температуры поверхности полосы и водовоздушной завесы, и конструкция форсунки (б) системы водовоздушной завесы (патент РФ №110663)

Оценка эффективности предложенных технических решений производилась экспериментально-аналитическим методом.

В таблице 5.15 в качестве примера приведены сравнительные результаты измерения температуры рабочих валков в клетях №7-9, на которых установлена система принудительного охлаждения полосы.

Для сравнительного анализа выбирались приблизительно одинаковые монтажные партии, прокатка которых осуществлялась как с работающей, так и с не работающей системой. Экспериментальное измерение температур рабочих валков производили после их вывалки при помощи переносного бесконтактного пирометра Time Ti 213EL (точность измерения +1% или $\pm 1^{\circ}\text{C}$). Расчетное значение измеренных температур определено с учетом специальной методики, регламентирующей порядок измерения и определения температуры рабочих валков (Приложении П).

Таблица 5.15 - Результаты измерений температуры рабочих валков для непрерывной чистовой группы клетей при применении системы принудительного охлаждения полосы перед входом ее в очаг деформации

№ клетки	№ валка	Положение валка	Диаметр валка, мм	Температура валков, $^{\circ}\text{C}$			
				До	После	Снижение	
						$^{\circ}\text{C}$	/%/
7	275	Верхний	830,1	80	77	3	3,75
7	274	Нижний	829,4	80	76	4	5,00
8	287	Верхний	836,8	80	77	3	3,75
8	286	Нижний	836,2	81	78	3	3,70
9	912	Верхний	789,8	79	74	5	6,33
9	911	Нижний	789,5	80	77	3	3,75
7	283	Верхний	824,8	80	77	3	3,75
7	282	Нижний	824,1	80	76	4	5,00
8	301	Верхний	853,4	79	76	3	3,80
8	302	Нижний	852,9	80	77	3	3,75
9	923	Верхний	784,0	78	74	4	5,13
9	247	Нижний	783,5	79	75	4	5,06
7	284	Верхний	827,6	82	78	4	4,88
7	285	Нижний	286,9	80	76	4	5,00
8	292	Верхний	840,2	81	76	5	6,17
8	293	Нижний	839,8	83	78	5	6,02
9	792	Верхний	796,3	80	77	3	3,75

№ клетки	№ валка	Положение валка	Диаметр валка, мм	Температура валков, °С			
				До	После	Снижение	
						°С	/%/
9	229	Нижний	795,9	82	78	4	4,88
7	271	Верхний	813,7	82	78	4	4,88
7	270	Нижний	813,0	83	79	4	4,82
8	304	Верхний	854,4	82	77	5	6,10
8	303	Нижний	854,0	83	78	5	6,02
9	256	Верхний	790,3	80	76	4	5,00
9	257	Нижний	789,8	82	79	3	3,66

Анализ результатов измерения температуры рабочих валков позволил сделать заключение, что внедрение предложенных технических решений позволило достигнуть дополнительного снижения температуры рабочих валков на 3...5 °С (4...6%).

Также предложенные новые технические решения системы водовоздушной завесы (система обеспыливания) прошли промышленную апробацию на НШСГП 2500 ПАО «ММК» (приложение М.2). Система водовоздушной завесы была установлена за последней чистовой 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.

Выводы по результатам промышленного внедрения

1. Для системы принудительного снижения температуры поверхности полосы определено рациональное местоположение коллекторов и объем подаваемого на поверхность полосы охладителя, составляющий 55...60 м³/ч.
2. Внедрение предложенных технических решений позволило достигнуть дополнительного снижения температуры рабочих валков на 3...5 °С (4...6%).
3. 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.

4. Результаты исследования прошли промышленную апробацию, что подтверждается Актами (**Приложение М.1, Приложение М.2**), а также внедрены в условиях действующего производства: выпущено технологическое письмо ТД-0555 от 12.09.2018 «О настройке системы антишелушения» (**Приложение Н**).

Выводы по пятой главе

1. Для управления процессами смазывания и охлаждения рабочих валков в непрерывной чистовой группе клетей листового стана горячей прокатки был разработан и численно реализован новый алгоритм, в основу которого были заложены разработанные математические модели функционирования системы «опорный валок – рабочий валок – полоса».

2. На основе разработанного алгоритма численно реализована комплексная математическая модель, предназначенная для определения объемов подаваемого на поверхность рабочих валков СМ и охладителя. Отличительной особенностью модели являются разрабатываемые адаптивные режимы, позволяющие для каждой из прокатных клетей рассчитывать и выдавать рекомендации по объемам СМ и охладителя в зависимости от режимов прокатки.

3. Комплексная математическая модель управления процессами подачи СМ и охладителя численно реализована в виде программного обеспечения (ПО). Промышленная апробация математической модели для условий чистовой непрерывной группы клетей (№№ 7-13) стана 2000 г.п. ПАО «ММК» позволила получить следующие практические результаты.

3.1. Для технологии подачи жидких СМ в непрерывной чистовой группе клетей:

- разработаны и внедрены новые режимы подачи СМ, учитывающие геометрические и прочностные характеристики прокатываемых полос;
- внедрены новые режимы подачи СМ, применение которых позволило снизить энергозатраты (токовые нагрузки главных приводов) на 7...10% и ресурсоёмкость при производстве ЛГП, выраженную в повышении ресурса рабочих валков на 9...11% (на 9...11 эксплуатационных часов).

– экономический эффект от снижения энергопотребления и повышения эксплуатационной стойкости рабочих валков составляет 83,5 млн. рублей (**Приложение Р**).

3.2. Для технологии охлаждения рабочих валков в непрерывной **черновой группе клетей**:

- произведено совершенствование оборудования системы охлаждения рабочих валков непрерывной **черновой группы клетей**: разработаны и внедрены новые конструкции коллекторов охлаждения рабочих валков, определено их рациональное местоположение;
- результаты внедрения позволили снизить температуру рабочих валков в непрерывной черновой группе клетей на 8...11⁰С (13...16%);
- зафиксировано снижение величины съема валков при их последующей перешлифовке для клетей №№4-6 на 9,7...11,21%, достигнуто снижение ресурсоёмкости при производстве ЛГП, выраженное в повышении ресурса рабочих валков на 8...12% (8...12 эксплуатационных часов);
- фактический подтвержденный экономический эффект составил около 3 млн. руб.

3.3 Для технологии охлаждения рабочих валков непрерывной **чистовой группы клетей**:

- произведена настройка оборудования системы охлаждения рабочих валков в непрерывной **чистовой группе клетей**, определены рациональные места положения коллекторов, выданы рекомендации по изменению расположение форсунок в коллекторах системы охлаждения;
- достигнуто снижение температуры рабочих валков в непрерывной чистовой группе клетей на 6...10⁰С (7...11%);
- зафиксировано снижение величины съема валков при их последующей перешлифовке в среднем на 4,5...5,8%, достигнуто снижение

ресурсоёмкости при производстве ЛГП, выраженное в повышении ресурса рабочих валков на 5% (5 эксплуатационных часов).

4. Предложена новая классификация прокатываемых монтажных партий, учитывающая средний вес ($W_{срi}$, т), толщину (H_i , м) и суммарную длину прокатываемых полос (ΣL_i м). Для предложенной классификации разработана технология эффективного охлаждения, позволяющая для каждой прокатной клетки, в зависимости от технологических параметров прокатки, определять количество подаваемого охладителя на поверхность рабочих валков.
5. На примере листового стана 2000 г.п. ПАО «ММК», в зависимости от характеристик прокатываемых монтажных партий, определены конкретные режимы подачи охладителя для каждой клетки.
6. Для системы принудительного снижения температуры поверхности полосы определено рациональное местоположение коллекторов и объем подаваемого на поверхность полосы охладителя, составляющий 55...60 м³/ч. Внедрение предложенных технических решений позволило достигнуть дополнительного снижения температуры рабочих валков на 3...5 °С (4...6%).
7. Разработаны новые технические решения, защищенные патентом на изобретение РФ №2457913 и двумя патентами на полезную модель РФ №№ 152330, 110663.
8. Результаты исследования прошли промышленную апробацию, что подтверждается полученными актами внедрения (2 шт.), актами испытания (3 шт.), актами передачи научно-технической продукции в действующее производство (3 шт.), актами расчета фактического экономического эффекта (4 шт.), технологическими письмами (6 шт.).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации на основе выполненных исследований изложены комплексные научно-технические и технологические решения, направленные на снижение энергосиловых 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 энергосиловых 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 ЛГП 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 энергосиловых и фрикционных параметров процесса прокатки, а также на эксплуатационные 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 ($J_{0,1}$, $мм^3/Нм$). При отсутствии СМ: $J_0=(4,18...6,13 \times 10^{-9})$ $мм^3/Нм$; в случае применения СМ: $J_1=(3,48...4,12 \times 10^{-9})$ $мм^3/Нм$.

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 окалины; 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 ($\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T)$) 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 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 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 клеток, 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 клеток 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 ($W_{срi}$, т), толщину (H_i , м) и суммарную длину прокатываемых полос (ΣL_i м), а также коэффициент $\left(k_L = \frac{W_{ср}}{L_{сум}}\right)$, учитывающий суммарную длину монтажа ($L_{сум,м}$). Определены границы предложенного показателя $W_{срi}$, 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».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаджинский, А.М. Логистика – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2003. – 408 с.
2. Федосеев, С.В. Анализ тенденций развития металлургических отраслей / Н.И. Диденко // Проблемы и решения исследования и развития арктического пространства России / С.В. Федосеев, П.С. Цветков - Санкт-Петербург, 2018. - С. 51-65.
3. Северсталь. Годовой отчет 2018. – Годовые отчеты. – Режим доступа: https://www.severstal.com/files/23850/Annual_report_2018_RUS.pdf.
4. ПАО «ММК». Годовой отчет 2018. – Годовые отчеты. – Режим доступа: http://mmk.ru/upload/iblock/a5d/Annual_Report_2018_Rus.pdf.
5. Мельников, П.В. Влияние микролегирования бором на структуру и свойства сварного шва, выполненного порошковой проволокой, для сварки листового проката из высокопрочной стали с нормируемым пределом текучести 750 МПа / П.В. Мельников, В.В. Гежа, Г.Д. Мотовилина, В.А. Могильников // Вопросы материаловедения. - 2018. -№ 1 (93). - С. 169-174.
6. Высокопрочная коррозионно-стойкая свариваемая сталь марки 07X16H4B для оборудования по добыче полезных ископаемых // Изобретения и рацпредложения в нефтегазовой промышленности. - 2001. - № 1. - С. 71.
7. Жесткие требования к высокопрочным сталям // Черные металлы. - 2012. - № 6. - С. 54.
8. Хулка, К. Легированные ниобием стали: состояние и тенденции развития / К. Хулка, Х. Клинкаенберг // Черные металлы. - 2005. - № 12. - С. 45-50.
9. Пат. 2578618 РФ, МПК С22С 38/50, С22С 38/50. Способ производства полос из низколегированной свариваемой стали / Мишнев П.А., Палигин Р.Б., Филатов Н.В., Огольцов А.А., Митрофанов А.В.; заявитель и патентообладатель ПАО «Северсталь». -№ 2014146337/02; заявл. 18.11.2014; опубл. 27.03.2016, Бюл. № 9. – 10 с.
10. Румянцев, М.И. Оценивание качества тонких горячекатаных полос для определения возможности замещения холоднокатаной листовой стали общего назначения / М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, А.Н. Завалицин, В.Л. Корнилов, А.П. Буданов, А.С. Цепкин, Н.А. Пантелеева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2007. - № 4 (20). - С. 69-73.
11. Николаев, В.А. Технологические аспекты производства широкополосной стали / В.А. Николаев, А.А. Васильев // Сталь. - 2014. - № 8. - С. 65-71.

12. Кожевникова, И.А. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов: автореф. дис. д-р техн. наук: / Череповецкий государственный университет. - Череповец, 2009. – 52 с.
13. Пименов, В.А. Влияние тепловых режимов горячей прокатки на образование дефектов поверхности холоднокатаного листа / В.А. Пименов, А.К. Погодаев, Д.А. Ковалев // Производство проката. - 2018. - № 12. - С. 8-14.
14. Салганик, В.М. Развитие широкополосных станов горячей прокатки / В.М. Салганик, И.Г. Гун // Черная металлургия. Сер. Прокатное производство / Ин-т "Черметинформация". М., 1990. Вып. 1. - 33 с.
15. Интенсификация производства листовой стали на широкополосных станах / Л.В. Радюкевич, В.В. Мельцер, А.И. Стариков, В.М. Салганик и др. - М.: Металлургия, 1991. - 176 с.
16. Горячая прокатка широких полос / В.Н. Хлопонин, П.И. Полухин, В.И. Погоржельский, В.П. Полухин. - М.: Металлургия, 1991. - 198 с.
17. Прокатные станы: Справочник в 3-х томах. Т. 3. Листопрокатные станы и профилирующие агрегаты / В.Г. Антипин, Д.К. Нестеров, В.Г. Кизиев и др. - М.: Металлургия, 1992. - 428 с.
18. Салганик, В.М. Технология производства листовой стали: учебное пособие / В.М. Салганик, М.И. Румянцев – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2007. - 320 с.
19. Рамасвами, В. Современные станы Стэккеля для горячей прокатки полосы из специальных сталей: Пер. с нем. / В. Рамасвами, Ф.-Г Беннер, В. Розенталь // Черные металлы. -1996, окт. - С. 27-32.
20. Станы Стэккеля для прокатки стальных листов // Новости черной металлургии за рубежом. - 1996. - № 3. - С. 104-106.
21. Целиков, А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1988. - 680 с.
22. Королев, А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов / А.А. Королев. - М.: Металлургия, 1987. - 480 с.
23. Полухин, П.И. Прокатка толстых листов / П.И. Полухин, В.М. Клименко, В.П. Полухин и др. - М.: Металлургия, 1984. - 288 с.

24. Стариков, А.И. Разработка и внедрение нового способа широкополосной горячей прокатки / А.И Стариков, В.М. Салганик, И.Г. Гун и др. // Сталь. - 1992. - №2. - С. 37-41.
25. Сивак, Б.А. Технологические основы проектирования машин и оборудования прокатного производства / Б.А. Сивак, В.Б. Галкин. - Москва, Учеба. - 2003. - 55 с.
26. Шаталов, Р.Л. Методика оптимизации процесса горячей прокатки полос и выбора технологического оборудования / Р.Л. Шаталов, Т.А. Койнов // Труды ВНИИМЕТМАШ. "Современное оборудование и технологии в металлургической промышленности". - Москва, 2004. - С. 21 - 28.
27. Полухин, П.И. Прокатка на многовалковых станах / П.И. Полухин, В.П. Полухин, А.Ф. Пименов и др. - М.: Металлургия, 1981. - 248 с.
28. Голубченко, А.К. Перспективы развития технологии и модернизации оборудования цехов горячей прокатки широкополосной стали / А.К. Голубченко // Сталь. - 1992. - №8. - С. 36-41.
29. Стариков, А.И. Новые технологии и оборудование для совмещения операций при производстве полос / Стариков А.И., Салганик В.М, Гун И.Г. и др. // Сталь. - 1997. - №3. - С. 36-40.
30. Матвеев, Б.Н. Новое в производстве горячекатаной рулонной стали / Б.Н. Матвеев // Сталь. - 1995. - №11. - С. 34-40.
31. Никитина, Л.А. Состояние и перспективы развития производства проката в России и за рубежом / Л.А. Никитина // Производство проката. - 2000. - № 8. - С. 7-15.
32. Юрьев, А.Б. Направления инновационного развития черной металлургии / А.Б. Юрьев, Л.М. Полторацкий, И.А. Барнаев // Сталь. - 2004. - № 11. - С. 106-110.
33. Неменов, А. Металлургия: ключевые проблемы / А. Неменов // Металлург. - 2006. - № 4. - С. 10-15.
34. Юсупов, В.С. Некоторые тенденции развития листопрокатного производства / В.С. Юсупов // Производство проката. - 2005. - № 2. - С. 32-35.
35. Сафонова, М.К. Зарубежные широкополосные станы горячей прокатки / М.К. Сафонова // Черная металлургия. Сер. Прокатное оборудование / Ин-т "Черметинформация". - М.: 1986. - Вып. 6. - 34 с.

36. Салганик, В.М. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев и др. - М.: Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2003. - 506 с.
37. Коновалов, Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос / Ю.В. Коновалов – М.: Теплотехник, 2008. - 640 с.
38. Злов, В.Е. Производство горячекатаных полос с потребительскими свойствами, соответствующими холоднокатаным / В.Е. Злов, А.П. Буданов, А.И. Антипенко, Р.И. Черкасский // Сталь. - 1997. - №6. - С. 53-55.
39. Мазур, В.Л. Управление качеством тонколистового проката / В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, И.Ю. Приходько, А.И. Яценко. - Киев: Техніка, 1997. - 384 с.
40. SMS group GmbH – Selected references. – Режим доступа: <https://www.sms-group.com/plants/all-plants/hot-strip-mills-steel/>.
41. Зубов, С.П. Совершенствование технологии производства коррозионностойкого листового проката в условиях АО "Уральская сталь" / С.П. Зубов, А.А. Придеин, Л.В. Прокопенко, Е.Л. Базаев, О.В. Самохина, Д.А. Шабля // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2020. - Т. 76. - № 3. - С. 214-222.
42. Новости металлургии по странам и регионам // Черные металлы. - 2014. - № 12 (996). - С. 6-7.
43. Добронравов, А.И. Опыт применения технологических смазок при горячей прокатке полос / Материалы межзаводской школы / А.И. Добронравов, Л.Г. Тубульцев, А.А. Маслов. - М.: Черметинформация, 1980. - 52 с.
44. Грудев, А.П. Технологические смазки в прокатном производстве / А.П. Грудев, В.Т. Тилик. - М.: Металлургия, 1975. - 368 с.
45. Горбунов, А.В. Освоение системы подачи технологической смазки для прокатки трудно деформируемых марок стали на широкополосном стане горячей прокатки в условиях ОАО "ММК" / Процессы и оборудование металлургического производства: межрегиональный сборник научных трудов / Горбунов А.В., Дубовский С.В., Дудоров Е.А., Платов С.И., Терентьев Д.В., Дема Р.Р., Ярославцев А.В., Харченко М.В. - Магнитогорск, 2009. - Выпуск 8. - С. 288-296.
46. Старченко, Д.И. Влияние смазок при горячей прокатке трансформаторной стали на скорость травления окалина / Д.И. Старченко, В.И. Капланов, В.В. Швецов и др. // Изв. Вузов. Чёрная металлургия. – 1974. - №6. - С. 109 – 113.

47. Мазур, В.Л. Теория и технология прокатки: нерешенные задачи и аспекты развития / В.Л. Мазур // Металл и литье Украины. 2019. №5-6. С. 48-54.
48. Мазур, В.Л. Теория и технология прокатки (гидродинамические эффекты смазки и микрорельеф поверхности) / В.Л. Мазур, В.И. Тимошенко. - Киев: ИД «АДЕФ Украина», 2018. - 560 с.
49. Мазур, В.Л. Горячая прокатка полос с применением технологической смазки / В.Л. Мазур, В.И. Тимошенко // Сталь. - 2018. - № 4. - С. 21-27.
50. Белосевич, В.К. Эмульсия и смазки при холодной прокатке / В.К. Белосевич, Н.П. Нетесов, В.И. Мелешко, С.Д. Адамский // - М.: Металлургия, 1976. - 416 с.
51. Мазур В.Л., Добронравов А.И., Чернов П.П. Предупреждение дефектов листового проката / В.Л. Мазур, А.И. Добронравов, П.П. Чернов. - Киев: Техніка, 1985. - 141 с.
52. Румянцев, М.И. Разработка режима холодной прокатки на НШСХП / М.И. Румянцев. - Магнитогорск: МГМА, 1997. - 82 с.
53. Белосевич, А.П. Совершенствование процесса холодной прокатки / А.П. Белосевич, Н.П. Нетесов - М.: Металлургия, 1971. - 272 с.
54. Робертс, В. Холодная прокатка стали: Пер. с англ. / В. Робертс. - М.: Металлургия, 1984. - 544 с.
55. Белосевич, В.К. Трение, смазка, теплообмен при холодной прокатке листовой стали / В.К. Белосевич. - М.: Металлургия, 1989. - 256 с.
56. Коновалов, Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки: справочник // Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев. - М. Металлургия, 1986. - 430 с.
57. Тубольцев, Л.Г. Горячая прокатка листовой стали с технологическими смазками / под ред. д-р техн. наук В.И. Мелешко / Л.Г. Тубольцев, А.Ф. Кириевич, С.Д. Адамский, Н.П. Нетесов. - М., Металлургия, 1982. - 160 с.
58. Горенштейн, М.М. Трение и технологические смазки при прокатке / М.М. Горенштейн. - Киев: Техника, 1972. - 126 с.
59. Коднир, Д.С. Эластогидродинамический расчет деталей машин / Д.С. Коднир, Е.П. Жильников, Ю.И. Байбородов. - М.: Машиностроение, 1988. - 160 с.
60. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. - М.: Металлургия, 1982. - 310 с.

61. Старченко, Д.И. Влияние технологической смазки на энергосиловые параметры горячей прокатки хромоникелевой стали / Д.И. Старченко, В.И. Капланов, В.В. Швецов и др. // Изв. Вузов. Чёрная металлургия. - 1979. - №8. - С. 53 - 57.
62. Edmundson, M. R. High temperature rolling oil aid hot rolling / M.R. Edmundson // Iron and steel engineer yearbook. - 1970. - P. 522–525.
63. Мелешко В.И., Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Поступление смазки в очаг деформации при прокатке / В.И. Мелешко, В.Л. Мазур, В.И. Тимошенко // Известия вузов. Черная металлургия. - 1973. - №10. - С 92-94
64. Гаевик, Д.Т. Справочник смазчика / Д.Т. Гаевик. - М.: Машиностроение, 1990. - 352 с.
65. Гаевик, Д.Т. Смазка оборудования на металлургических предприятиях: учебник для СПТУ / Д.Т. Гаевик. - М. 1998. - 328с.
66. Дубовский, С.В. Комплексная оценка и исследование эффективности системы подачи технологической смазки в клетях № 7-9 непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" / С.В. Дубовский, Р.Р. Дёма, М.В. Харченко, А.В. Ярославцев // Производство проката. - 2011. - № - 12. - С. 6-8.
67. **Ярославцев А.В.** Повышение энергоэффективности широкополосной горячей прокатки на основе исследования системы "инструмент - заготовка" с подачей технологической смазки: дис. ... канд. техн. наук. Магнитог. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 2013.
68. **Харченко М.В.** Снижение энергозатрат при широкополосной горячей прокатке на основе моделирования и выбора эффективных режимов смазывания валков: дис. ... канд. техн. наук. Магнитог. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 2012.
69. **Амиров Р.Н.** Повышение ресурса валков листовых станов горячей прокатки за счет применения систем технологической смазки: дис. ... канд. техн. наук. Магнитог. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 2014.
70. Голубев, Т.М. Износ валкового материала / Т.М. Голубев, Л.Д. Соколов // Сталь. - 1950. - №5. - С.440-442.
71. Гимолетдинов, Р.Х. Производство центробежнолитых листопрокатных валков на ОАО "Кушвинский завод прокатных валков" / Р.Х. Гимолетдинов, А.В. Копьев, С.П. Павлов, Г.С. Мирзоян, П.В. Семенов, В.Г. Тиняков // Литейное производство. - 2007. - № 1. - С. 9-11.

72. Северденко В.П. О влиянии внешнего трения на деформацию металла при прокатке / В.П. Северденко // Сборник научных трудов: Прокатка и калибровка МИС им. И.В. Сталина. – 1940. - №16 – С. 2-62.
73. Вдовин, К.Н. Управление качеством процесса производства и эксплуатации прокатных валков / К.Н. Вдовин, М.А. Лисовская // Технология металлов. - 2013. - № 12. - С. 09-11.
74. Борисов, В.И. Исследование износа листовых валков станов кварто горячей прокатки / В.И. Борисов, В.В. Голубьев // Производство проката. - 2008. - № 5. - С. 36-41.
75. Целиков, А.И. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. - М.: Металлургия, 1982. - 335 с.
76. Гарбер, Э.А. Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Производство проката. - 2007. - №4. - С. 7-14.
77. Полухин, П.И. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / П.И. Полухин, В.А. Николаев, В.П. Полухин и др. - М. Металлургия. 1974. - 200 с.
78. Коцарь, С.Л. Технология листопрокатного производства / С.Л. Коцарь, А.Д. Белянский, Ю.А. Мухин. - М.: Металлургия, 1997. - 272 с.
79. Мазур, И.П. Развитие теории и совершенствование технологии производства листового проката на литейнопрокатных комплексах: дис. док. тех. наук (05.16.05 -обработка металлов давлением) / И.П. Мазур; науч. консультант С.Л. Коцарь. - Липецк: ЛГТУ, 2003. - 316 с.
80. Гелей, Ш. Расчет усилий и энергии при пластической деформации металлов / Ш. Гелей. - М.: Metallurgizdat, 1958.- 419 с.
81. Песин, А.М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. - 2020. - Т. 20. - № 3. - С. 81-96.
82. Мухин, Ю.А. Влияние деформационно-скоростного режима горячей прокатки в чистовой группе широкополосных станов на структуру стали

- марки СтЗсп / Ю.А. Мухин, В.Н. Соловьев, Е.Б. Бобков // Черные металлы. - 2018. - № 11. - С. 12-16.
83. Денисов, С.В. Технология горячей прокатки полос после модернизации установки ламинарного охлаждения на отводящем рольганге стана 2500 горячей прокатки / С.В. Денисов, С.Н. Горшков, А.В. Шаргунов, Г.Н. Посажеников, В.В. Галкин // Metallurg. - 2007. - № 1. - С. 53-55.
84. Генкин, А. Л. Моделирование и оптимизация процесса горячей прокатки полос / А.Л. Генкин; Российская акад. наук, Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова. - Москва: URSS, 2012. - 167 с.
85. Ячиков, И.М. Программное обеспечение для моделирования тепловых процессов в прокатном валке / И.М. Ячиков, Л.Г. Егорова, Ю.Б. Кухта // Программные продукты и системы. - 2010. - № 1. - С. 103-106.
86. Андреюк, Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев, Б.С. Прицкер // Сталь. - 1972. - № 6. - С. 522-523.
87. Василев, Я.Д. Алгоритм расчета давления металла на валки при холодной прокатке без применения итерационной процедуры / Я.Д. Василев, В.Г. Шувяков // Изв. АН СССР. Металлы. - 1986. - С. 110-115.
88. Грудев, А.П. Внешнее трение при прокатке / А.П. Грудев. - М.: Metallurgiya, 1973. - 288 с.
89. А.с. 715156 СССР, МКИ7 В21В 31/02. Комплект подушек прокатной клетки кварто / Ю.С. Артамонов, В.Н. Заверюха, А.И. Трайно 4848359/27; заявл.1305.78.; опубл. 27.02.80; Бюл. №6, 1980. с. 25.
90. Грудев, П.И.. Обработка металлов давлением / П.И. Грудев - М.: Metallurgizdat, 1953. - 223 с.
91. Анцупов, А.В. Методика прогнозирования надежности и оценка износостойкости деталей узлов трения металлургического оборудования / А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, А.В. Анцупов, М.В. Налимова, А.С. Губин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2007. - № 1 (17). - С. 80-83.
92. Воробей, С.А. Прогнозирование износа рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки / С.А. Воробей // Фундаментальные и прикладные

- проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. - Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2006. - Вип. 12. - С. 213-220.
93. Чекмарев, А.П. Калибровка прокатных валков / А.П. Чекмарев, М.С. Мутьев, Р.А. Машковцев. - Металлургия, 1971 г. - 509 с.
 94. Зайков, М.А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке / М.А. Зайков. - М.: Metallurgizdat, 1958.
 95. Голубев, Т.М. Коэффициент трения при горячей прокатке / Т.М. Голубев, М.А. Зайков // Сталь. - 1950. - № 3. - С. 237-241.
 96. Молотков, Л.Ф. Коэффициент трения при прокатке высокоуглеродистых сталей / Л.Ф. Молотков // Теория и практика металлургии. - 1940. - № 3. - С. 20-22.
 97. Бахтинов, Б.П. Калибровка прокатных валков / Б.П. Бахтинов, М.М. Штернов. - М.: Metallurgizdat, 1953.
 98. Семенюта, А.Я. Определение удельных давлений при прокатке широких полос средней толщины / А.Я. Семенюта // Обработка металлов давлением: научные труды ДМетИ. - М.: Metallurgizdat, 1967. - Т52. - С.118-123.
 99. Акулин, В.И. Теоретическое исследование распределения контактных сил трения и удельного давления при продольной прокатке: автореферат дис. на соискание учен. степ. канд. техн. наук / АН БССР. Отд-ние физ.-техн. наук. - Минск: [б. и.], 1967. - 27 с.
 100. Лепорская, Н.В. Коэффициент трения при тонколистовой прокатке с учетом натяжения полосы и инерционных сил в очаге деформации // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. - 2013. - № 27. - С. 68-72.
 101. Поляков, Б.Н. Некоторые особенности статистических взаимосвязей параметров, характеризующих коэффициент внешнего трения при горячей прокатке / Б.Н. Поляков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2010. - № 4. - С. 24-27.
 102. Кривенцов, А.М. Определение коэффициента трения при горячей, теплой и холодной прокатке черных и цветных металлов // Производство проката. - 2016. - № 1. - С. 10-13.
 103. Целиков, А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А.И. Целиков. - М.: Metallurgizdat, 1962.

104. Максименко О.П. Аналитическое и экспериментальное исследование условий поступления технологической смазки в очаг деформации при прокатке. Автореф. канд. дис. Днепропетровск. 1972.
105. Мазур, В.Л. Энергосберегающая технология горячей прокатки широкополосной стали с применением технологической смазки / В.Л. Мазур // Экология и промышленность. - 2018. - № 1. - С. 82-90.
106. Иванов, К.А. Исследование процесса горячей прокатки стали с применением технологических смазок: автореф. канд. дис. / К.А. Иванов Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины. - 1973. - 20 с.
107. Третьяков, А.В. Теория, расчёт и исследования станов холодной прокатки / А.В. Третьяков. - М.: Металлургия, 1966. - 250 с.
108. Kneppе, G. Hot strip rolling technology. Tasks for the new century / G. Kneppе, D. Rozenthal // MPT International. - 1998. - Vol. 22. - №3 - P. 56-58, 60, 62, 64, 66, 67.
109. Matsubara, Y. Approach to Clarification of Oil Film Behavior in Hot Rolling by Numerical Analysis / Y. Matsubara, Y. Hirase, T. Hiruta, Y. Takashima, K. Kabeya // ISIJ International. - 2017. - Vol. 57. - No. 2. - P. 343-348.
110. Гарбер Э.А. Определение коэффициента трения при освоении на станах холодной прокатки новых видов эмульсий / Э.А. Гарбер, А.А. Гончарский, С.В. Петров // Производство проката. - 2000. - №12. - С. 9-13.
111. Капланов, В.И. Анализ математической модели контактного трения при горячей прокатке листовой стали / В.И. Капланов, А.Г. Присяжный // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2008. - № 9. - С. 29-32.
112. Вейлер, С.Я. Действие смазок при обработке металлов давлением / С.Я. Вейлер, В.И. Лихтман. - М.: Изд-во АН СССР. - 1960. - 232с.
113. Чертавских А.К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением / А.К. Чертавских, В.К. Белосевич. - М.: Металлургия, 1968. - 361 с.
114. Васин, В.Н. Исследование толщины смазочного слоя и коэффициента трения быстроходного тяжело нагруженного роликового контакта: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / В.Н. Васин. - Калинин, 1981. - 183 с.
115. Гарбер, Э.А. Расчет мощности процесса холодной прокатки / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, Д.И. Никитин. - Череповец: ЧГУ, 2005 г.

116. Гарбер, Э.А. Расчет мощности процесса холодной прокатки с учетом работы переменных сил трения по длине очага деформации / Э.А.Гарбер, Д.И. Никитин, И.А. Шадрунова, А.И. Трайно // *Металлы*. 2003 г. № 4.— С. 60-67.
117. Гарбер, Э.А. Расчет мощности процесса холодной прокатки с учетом количества нейтральных сечений в очаге деформации / Э.А. Гарбер, Д.Л. Шалаевский, И.А. Кожевникова // *Производство проката*. - 2008. - № 8. - С. 8-17.
118. Гарбер, Э.А. Новый метод энергосилового расчета широкополосных станов горячей прокатки / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // *Вестник ЧТУ*. - 2008 г. - № 3. – С. 9-26.
119. Пат. 2131310 РФ, МПК В21В 27/10. Способ охлаждения валков клетки кварто / А.Ф. Пименов, В.Н. Скороходов, В.П. Настич, А.Е. Чеглов, А.А. Угаров, А.И. Трайно, С.Л. Коцарь. Заявл. 23.03.1998; опубл. 10.06.1999.
120. Пат. 2177845 РФ, МПК В21В 27/10. Способ охлаждения валков непрерывного стана кварто / В.Н. Скороходов, В.П. Настич, И.С. Сарычев, П.П. Чернов, А.Ф. Пименов, А.Д. Тищенко, А.Е. Чеглов, В.Н. Черкасов, С.И. Мазур, А.И. Трайно, В.А. Пименов. Заявл. 19.06.2000; опубл. 10.01.2002.
121. Пат. 2109584 РФ, МПК В21В 27/10. Способ охлаждения валков / А.Ф. Пименов, В.С. Лисин, В.Н. Скороходов, В.П. Настич, С.Л. Коцарь, А.А. Угаров, И.С. Сарычев, Ю.Л. Гадецкий, В.А. Третьяков, Е.А. Варшавский, В.В. Барышев, А.И. Трайно, Н.П. Рассказов. Заявл. 13.05.1997, опубл. 27.04.1998.
122. А.с. 1388128, МПК В21В 27/10. Способ охлаждения валков клетки стана кварто / З.М. Шварцман, А.Ю. Фиркович, Р.И. Черкасский, Ю.Н. Суховерхов, В.А. Бровкин, А.А. Колосок. Заявл. 01.09.1986.; опубл. 15.04.1988. Бюл. № 14.
123. Петров, С.В. Совершенствование методов охлаждения и профилирования валков широкополосных станов: автореферат дис. ... канд. техн. наук / С.В. Петров. - Череповец. гос. ун-т. Череповец, 2000.

124. Пат. 2600768 РФ, МПК В21В 27/10. Устройство для охлаждения валков / М. Киппинг, Й. Алькен, Р. Зайдель, Т. Мюллер. Заявл. 08.05.2013; опубл. 27.10.2016. Бюл. № 30.
125. A Guide to Spray Technology for Steel Mills, Catalog 44B [Электронный ресурс] // Spraying Systems Co. URL: https://www.sprayrus.ru/literature_pdfs/C44B_Spray-Technology-for-Steel-Mills.pdf (дата обращения: 01.08.2018).
126. Бельский, С.М. Литейно-прокатный агрегат – сумма технологий производства тонких стальных полос. Ч. 1 [Электронный ресурс]: монография / И.П. Мазур, Ю.А. Мухин, С.М. Бельский.- Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2016. - 170 с. - Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/651985>.
127. Приходько, И.Ю. Управление температурным режимом работы валков широкополосного стана горячей прокатки / И.Ю. Приходько, С.А. Воробей, А.А. Сергеенко, В.В. Разносилин, С.Е. Шатохин // Сталь. - № 11. - 2010 г.
128. Приходько И.Ю., Воробей С.А., Чернов П.П., Поляков М.Ю., Мазур С.И., Савочкин А.Г. Исследование эффективности работы системы охлаждения валков ШСГП 2000 НЛМК / И.Ю. Приходько, С.А. Воробей, П.П. Чернов, М.Ю. Поляков, С.И. Мазур, А.Г. Савочкин // Труды 6-го конгресса прокатчиков, г. Липецк, 19 – 21 октября 2005. – М.: АО Черметинформация, 2005. - т. 2. - С. 85 - 96.
129. Гарбер, Э.А. Опыт расчёта температурных полей напряжений и теплового профиля валков при холодной прокатке (Материалы для конструкторов и технологов) / Э.А. Гарбер. - Свердловск: Уралмашзавод, 1964. - 60 с.
130. Шичков, А.Н. Тепломассобмен при производстве листового проката / А.Н. Шичков, В.Г. Лайбейш. - Л.:СЗПИ, 1982. - 80 с.
131. Мухин, Ю.А. Математическая модель теплового состояния металла на отводящем рольганге стана горячей прокатки с учетом полиморфного превращения. Сообщение 1 / Ю.А. Мухин, С.И. Мазур, Е.В. Макаров, С.М. Бельский // Производство проката. - 2011. - №12. - С. 2-5.
132. Мухин, Ю.А. Математическая модель теплового состояния металла на отводящем рольганге стана горячей прокатки с учетом полиморфного превращения. Сообщение 2 / Ю.А. Мухин, С.И. Мазур, Е.В. Макаров, С.М. Бельский // Производство проката. 2012. №1. С.14-16.

133. Хлопонин, В.Н. Эффективность активного и псевдоактивного способов снижения охлаждения подката в условиях ШПС горячей прокатки / В.Н. Хлопонин, А.Н. Тинигин // - *Металлург.* - 2011. - № 10. - С. 77-82.
134. Koldin, A.V. Modeling of the thermal state of the hot rolled strip in the accelerated cooling process part I: heat transfer model / A.V. Koldin, R.R. Dema, M.V. Nalimova, E. Mihailov, A.N. Shapovalov, M.V. Kharchenko // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* - 2019. - Т. 54. - № 6. - С. 1330-1336.
135. Koldin, A.V. Modeling of the thermal state of a hot rolled strip in an accelerated cooling process part 2: a calculation of the thermal field of the strip. results and conclusions / A.V. Koldin, R.R. Dema, M.V. Nalimova, A.N. Shapovalov, E. Mihailov // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* - 2020. - Т. 55. - № 1. - С. 171-181.
136. Колдин, А.В. Теплообмен при струйном охлаждении движущегося металлического листа: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Колдин; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Магнитогорск, 2012.
137. Татару, А.С. Исследование и разработка технологии производства горячекатаного высокопрочного автолистового проката из двухфазных ферритомартенситных сталей с заданными показателями механических свойств: дис. ... канд. техн. наук / А.С. Татару; НИТУ МИСиС. Магнитогорск, 2018.
138. Румянцев, М.И. К вопросу построения модели для расчета составляющих температурного режима металла в линии широкополосного стана горячей прокатки / М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, Д.Ю. Загузов и др. // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Сб. науч. трудов.* - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. - С. 26–34.
139. Liu, Z.-H. Study on film boiling heat transfer for water jet impinging on high temperature flat plate / Z.-H. Liu, J. Wang // *Int. J. of Heat and Mass Transfer.* – Vol.44. – 2001. – P.2475–2481.
140. Miyasaka, Y. Critical heat flux and subcooled nucleate boiling in transient region between a two-dimensional water jet and a heated surface / Y. Miyasaka, S.

- Inada // Journal of chemical engineering of Japan. – 1980. – Vol.13. – №1. – P.29–35.
141. Ochi, T. Cooling of a hot plate with an impinging circular water jet / T. Ochi, S. Nakanishi, M. Kaji, S. Ishigai. Multi- phase flow and heat transfer III. Part A, Amsterdam, 1984. - P.671-681.
142. Miyasaka, Y. The effect of pure forced convection on the boiling heat transfer between a two-dimensional subcooled water jet and a heated surface / Y. Miyasaka, S. Inada // Journal of chemical engineering of Japan. -1980. -Vol.13. =№1. - P.22-28.
143. Zumbrunen, D.A. A laminar boundary layer model of heat transfer due to a nonuniform planar jet impinging on a moving plate / D.A. Zumbrunen, F.P. Incropera, R. Viskanta // Wärme-und Stoffübertragung. - Vol.27. - 1992. - P.311-319.
144. Mazur, V.L. Lubricant Action of Emulsion in Rolling: Theory and Practice / V.L. Mazur // Steel in translation. - 2017. - Vol. 47. - № 7. - P. 483-490.
145. Платов, С.И. Эффективность применения смазочного материала в производстве листового проката / С.И. Платов, Р.Н. Амиров, Р.Р. Дема, А.В. Ярославцев // В сборнике: Перспективные материалы и технологии. Международный симпозиум посвящен 40-летию ИТА НАН Беларуси. - 2015. - С. 81-83.
146. Платов, С.И. Статистическая оценка влияния смазочного материала на изменение энергосиловых параметров горячей прокатки / С.И. Платов, Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров // В сборнике: Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии X Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием.-2013. -С. 251-254.
147. Дема, Р.Р. Теоретическое исследование влияния режимов подачи смазочного материала на изменение энергозатрат при горячей прокатке на стане 2000 ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" // Р.Р. Дема, М.В. Харченко, А.А. Горбунова // Производство проката. - 2013. - № 2. - С. 11-13.
148. Платов С.И. Влияние смазочного материала на изменение энергосиловых параметров прокатки в непрерывной группе клеток стана 2000 горячей прокатки ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" / С.И. Платов, Р.Н. Амиров, Р.Р. Дема, А.В. Ярославцев, Ю.Х. Гатаулина, У.Д. Мартынова // Производство проката. - 2013. - № 11. - С. 09-14.

149. 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. Дема, М.В. Харченко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2011.- № 4 (36). - С. 19-21.
150. Дема Р.Р. Статистическая оценка влияния смазочного материала на энергосиловые параметры горячей прокатки / Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров, У.Д. Мартынова, Ю.Х. Гатаулина // Сталь. - 2015. - № 8. - С. 40-42.
151. 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. Bilichenko // Materials Science Forum. - 2016. Vol. 870. P. 446-453.
152. Леванцевич, М.А. Исследование условий образования режима адсорбционного смазывания тяжело нагруженных фрикционных пар трения с помощью моделирования процесса на лабораторной установке / М.А. Леванцевич, М.В. Харченко, Р.Р. Дема // Трение и износ. 2019. Т. 40. № 4. С. 353-361.
153. 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. Дема // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2017. - № 2 (683). - С. 70-78.
154. Total Materia. База данных материалов [электронный ресурс]. - Key to Metals AG. - URL: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=RU>. - Режим доступа: по подписке.
155. Амиров, Р.Н. Применение нейронных сетей для моделирования энергосиловых параметров клеток чистой группы НШСГП 2000 ОАО "ММК" / Р.Н. Амиров, Р.Р. Дема, С.И. Лукьянов, А.В. Ярославцев, У.Д. Мартынова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. -2012.-№ 2 (38). -С. 102-103.
156. Дема, 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. Дема, М.В.

- Харченко, А.А. Горбунова // Производство проката. - 2013. - № 3. - С. 14-16.
157. Плато, С.И. Разработка модели прогнозирования энергосиловых параметров горячей прокатки при подаче смазочного материала на валки непрерывного широкополосного стана / Платов С.И., Мартынова У.Д., Дема Р.Р., Амиров Р.Н., Ярославцев А.В. // Производство проката. - 2014. - № 4. - С. 3-9.
158. 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.
159. Целиков, А.И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. - М.: Metallurgy, 1980.
160. Целиков А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.И. Гришков - М.: Metallurgy, 1970.
161. Дема, Р.Р. Теория и практика применения технологической смазки при широкополосной горячей прокатке: монография / Р.Р. Дема, М.В. Харченко, С.И. Платов. - Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. - 99 с.
162. Terentyev, D.V. Effect of operating modes and contact surface oil absorption on lubricant film thickness in heavy-duty friction units of metallurgical plants / D.V. Terentyev, N.N. Ogarkov, S.I. Platov, A.V. Kozlov // Chernye Metally. - 2018. - № 9. - P. 60-64.
163. Горячева, И.Г. Модель эластогидродинамического контакта с ограниченным потоком смазки: сборник «Проблемы современной механики» / И.Г. Горячева, А.П. Горячев. - М.: Изд-во МГУ, 2008. - С. 133–147.
164. Елманов, И.М. Термовязкоупругость жидких смазочных материалов в тяжело нагруженных узлах трения: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.04. - Москва, 2001. - 314 с.
165. Перель, Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник / Л.Я. Перель, А.А. Филатов. - М.: Машиностроение, 1992. - 608с.
166. Платов, С.И. Снижение энергозатрат при горячей прокатке за счет создания режима эластогидродинамического трения в межвалковом контакте. Сообщение 1 / С.И. Платов, А.Н. Макаров, Г.Л. Баранов, Р.Р. Дёма, А.В.

- Ярославцев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. -2012.-№ 2 (38). -С. 95-97.
167. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. - Изд. 2-ое перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1968. - 480с.
168. Дроздов, Ю.Н. Прикладная трибология: (трение, износ, смазка в технических системах) / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов; под общ. ред. Ю.Н. Дроздова. - Москва: Эко-Пресс, 2010. - 603 с.
169. Дема, 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. Дема, О.Р. Латыпов, О.Б. Калугина, А.В. Колдин, Б.Б. Зарицкий, А.А. Ступак // Производство проката. - 2019. - № 7. - С. 21-28.
170. Дема, Р.Р., Платов С.И., Харченко М.В., Латыпов О.Р., Калугина О.Б., Колдин А.В., Кургузов С.А. 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. Дема, С.И. Платов, М.В. Харченко, О.Р. Латыпов, О.Б. Калугина, А.В. Колдин, С.А. Кургузов // Производство проката. - 2019. - № 8. - С. 8-12.
171. 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. Дема, А.В. Колдин, О.Р. Латыпов, И.И. Кинзина // Производство проката. - 2019. - № 11. - С. 13-18.
172. Дема, Р.Р. Компьютерное моделирование и исследование процесса горячей прокатки на базе программного комплекса Deform-3D / Р.Р. Дема, С.И. Платов, А.В. Козлов, О.Р. Латыпов, Р.Н. Амиров // Производство проката. - 2018. -№ 11. -С. 36-40.

173. Гарбер, Э.А. Проблемные аспекты развития методов энергосилового расчета процессов тонколистовой прокатки / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова // Производство проката. - 2010. - №12. - С. 16-24.
174. Свид. № 20111611132. «Автоматизированный расчет фрикционных параметров валкового узла «кварто» при подаче смазочного материала». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Дата регистрации 03.02.2011 г.
175. Свид. 2018615823 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет структурных параметров очага деформации при горячей прокатке сталей широкого марочного состава / Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров, О.Б. Калугина. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU). №2018615823; заявл. 26.03.2018; опублик. 17.05.2018, реестр программ для ЭВМ.
176. Свид. 2016610218 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Разработка математической модели распределения сопротивления деформации и энергосиловых параметров прокатки низкоуглеродистых сталей / К.С. Тумбасов, А.В. Ярославцев, Р.Н. Амиров, Р.Р. Дема, К.К. Ахметова. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU). №2016610218; заявл. 09.11.2015; опублик. 20.02.2016, реестр программ для ЭВМ.
177. Харченко, М.В. Универсальный испытательный комплекс по определению триботехнических характеристик смазочных материалов на базе серийной машины трения СМЦ-2 / М.В. Харченко, Р.Р. Дема, С.П. Нефедьев, О.А. Осипова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. -2017. - № 10 (691). -С. 60-68.
178. 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. - P. 8076435.
179. Сафонов, Б.П. Лабораторный практикум по курсу «Основы трения и изнашивания элементов трибомеханических систем оборудования» / Б.П. Сафонов, А.Я. Лысюк, Л.В. Лукиенко. - Новомосковский институт

- Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева. Новомосковск, 2000. - 25 с.
180. Дема, Р.Р. Определение воздействующих параметров на эффективность работы системы подачи технологической смазки непрерывных широкополосных станов горячей прокатки / Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров, М.В. Харченко, А.А. Харченко, М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, А.Н. Белый // Вестник Донецкого национального технического университета. - 2016. - № 4 (4). - С. 27-31.
181. 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. Дема, И.С. Пелымская, А.А. Харченко // Производство проката. - 2016. - № 12. - С. 8-12.
182. Харченко, М.В. Моделирование фрикционного контакта пары трения рабочий-опорный валок / М.В. Харченко, Р.Н. Амиров, О.Р. Латыпов // Сборник научных трудов: Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. - 2018. - №24. - С. 40-47
183. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.
184. Дема, Р.Р. Разработка технологии широкополосной горячей прокатки с использованием системы подачи технологической смазки / Р.Р. Дема, М.В. Харченко, В.А. Мустафин, Р.Н. Амиров, Д.Н. Романенко, Е.П. Терехин, А.А. Кожухов // В сборнике: Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. -2016. -С. 44-48.
185. Анцупов, А.В. Разработка аналитического метода оценки износостойкости и способа продления ресурса опорных валков листовых станов: дис. канд. техн. наук / А.В. Анцупов. - Магнитогорск. 2007. - 121 с.
186. Костецкий, Б.И. Исследование энергетического баланса при внешнем трении металлов / Б.И. Костецкий, Ю.И. Линник // Доклады Академии наук СССР. - Т.183. - 1968. - №5. -С. 1052-1055.
187. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х книгах. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. - М.: Машиностроение, 1978. - Кн 1. - С. 46-57.

188. Щербаниц, Э.Н. Износ опорных валков и изменение шлифовочного профиля рабочих валков дрессировочного стана / Э.Н. Щербаниц, К.Н. Савранский, Н.И. Великий, В.Г. Надутов // *Металлург*. - 1971. - № 11. - С 42-43.
189. Платов, С.И. Математическое моделирование процесса изнашивания рабочих валков клетки кварто при подаче смазочного материала / С.И. Платов, Р.Н. Амиров, Р.Р. Дема, А.В. Ярославцев, И.В. Казаков // *Горный журнал*. -2012. -№ S3. -С. 54-56.
190. Платов, С.И. Математическая модель процесса изнашивания и прогнозирования срока службы рабочих валков клетки кварто при подаче смазочного материала / С.И. Платов, Р.Н. Амиров, Р.Р. Дема, А.В. Ярославцев // *Производство проката*. -2012. -№ 9. -С. 38-43.
191. Платов, С.И. Применение статистических подходов для определения величины износа рабочих валков станов горячей прокатки / С.И. Платов, Р.Н. Амиров, Р.Р. Дема, А.В. Ярославцев // В сборнике: Перспективные материалы и технологии. Международный симпозиум посвящен 40-летию ИТА НАН Беларуси. - 2015. - С. 76-80.
192. Дема, Р.Р. Опыт применения отечественного смазочного материала "РОСОЙЛ-МГП" в технологии производства полосы на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки / Р.Р. Дема, М.В. Харченко, В.Ю. Шолом, А.Н. Абрамов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. -2018. -№ 11. -С. 27-32.
193. Дема, Р.Р. Результаты опытной эксплуатации и сравнительная оценка эффективности отечественного смазочного материала "РОСОЙЛ-МГП" в технологии производства горячего проката / Р.Р. Дема, М.В. Харченко // В сборнике: Трибология - машиностроению Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. - 2018. -С. 168-171.
194. Дема, Р.Р. Профиль формообразующего инструмента с системой подачи технологической смазки для непрерывных широкополосных станов горячей прокатки / Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров, О.С. Железков, Е.Ф. Романенко, А.Н. Шаповалов // *Сталь*. - 2017. - № 3. - С. 37-40.
195. Дема, Р.Р. Определение текущей величины износа рабочих валков при широкополосной горячей прокатке / Р.Р. Дема, С.И. Платов, А.В. Козлов, О.Р. Латыпов, Р.Н. Амиров // *Сталь*. -2018. -№ 10. -С. 30-34.
196. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618127 «Математическое моделирование процесса изнашивания и

- прогнозирование срока службы рабочих валков клетки кварто при подаче смазочного материала в условиях НШСГП». Авторы Амиров Р.Н., А.В., Платов С.И., Дёма Р.Р. и др. Правообладатель ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».
197. Платов С.И., Дёма Р.Р., Ярославцев А.В., Мартынова У.Д. Расчет и анализ энергосиловых параметров процесса горячей прокатки металла с учетом подачи жидких смазочных материалов на валки НШСГП //учебное пособие. Электронный ресурс / Магнитогорск, 2013.
 198. Дёма Р.Р., Ярославцев А.В., Ахметова К.К., Мартынова У.Д. Подача смазочного материала на валки и повышение энергоэффективности процесса прокатки путем выбора рациональных режимов смазывания / 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.
 199. 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.
 200. Дёма, Р.Р. Подача смазочного материала на валки широкополосной горячей прокатки и оценка энергоэффективности процесса на примере стана – 2000 ОАО "ММК" / Р.Р. Дёма, А.В. Ярославцев, К.К. Ярославцева. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. - 72с.
 201. Платов С.И. Разработка рациональных режимов подачи технологической смазки на опорные валки клеток чистовой группы станов горячей прокатки / С.И. Платов, Р.Р. Дёма, М.В. Харченко, А.В. Ярославцев, С.В. Дубовский, С.В. Михайлицын // Моделирование и развитие процессов ОМД. - 2011. - № 1. - С. 20-24.
 202. Платов С.И., Дёма Р.Р., Ярославцев А.В., Мартынова У.Д., Ахметова К.К., Амиров Р.Н. Исследование и оценка загруженности главных приводов непрерывной группы клеток стана 2000 горячей прокатки в зависимости от сортамента выпускаемой продукции // Производство проката. 2014. № 2. С. 13-16
 203. Дёма, Р.Р. Исследование процессов энергоэффективности при горячей прокатки методами статистического моделирования на примере стана 2000 г.п. ПАО «ММК». Сталь. - 2018. - №12.- С.31- 33.
 204. Уонг, Х.. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг. - М.: Атомиздат, 1979. - 290 с.

205. Баскаков, А.П. Теплотехника / А.П. Баскаков. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 240 с.
206. Colas, R. Modelling heat transfer during hot rolling of steel strip / R. Colas // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. - 1995. - Vol.3. - P. 437-453.
207. Devadas, C. Heat transfer during hot rolling of steel strip / C. Devadas, I.V. Samarasekera // Ironmaking and Steelmaking. 1986. - Vol.13. - №6. - P.311-321.
208. Yanagi, K.-i. Prediction of strip temperature for hot strip mills. / K.-i Yanagi // Transactions ISIJ. - Vol. 16. - 1976. -P. 1-19.
209. Астахов, А.А. Разработка модели для исследования теплового состояния рабочих валков станов горячей прокатки / А.А. Астахов, И.П. Мазур // Вестник воронежского государственного технического университета. 2011. С. 83-86.
210. Свид. 2018618671 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет температурного поля полосы широкополосных станов горячей прокатки / Р.Р. Дема, А.В. Колдин, Р.Н. Амиров. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU). №2018618671; заявл. 13.06.2018; опубл. 17.07.2018, реестр программ для ЭВМ.
211. Маковский, В.А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали / В.А. Маковский // Сталь. - 1972. - № 1. - С. 87-89.
212. Тимошпольский, В.И. Анализ теплофизических свойств сталей с целью применения для решения нелинейных задач теории нагрева / В.И. Тимошпольский, С.М. Кабишов, Е.В. Калиневич, Р.Б. Вайс // Литье и металлургия. - 2016. - № 2(38). - С. 17-22.
213. Колдин, А.В. Охлаждение металлической горизонтальной полосы с помощью струйной системы / А.В. Колдин // Материалы 59-ой научной конференции студентов и молодых ученых, посвященной Международному году физики. - Алматы: КазНУ, 2005. - с. 60.
214. Назмеев, Ю.Г. Теплоэнергетические системы и энергобалансы промышленных предприятий: Учебное пособие для студентов вузов. / Ю.Г. Назмеев, И.А. Конахина. - М.: Издательство МЭИ, 2002. - 407 с.

215. Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1984.
216. Hatta, N. Experimental Study of Deformation Mechanism of a Water Droplet Impinging on Hot Metallic Surfaces Above the Leidenfrost Temperature / N. Hatta, H. Fujimoto, K. Kinoshita, H. Takuda // Journal of Fluids Engineering. - 1997. - Vol. 119. - No. 3. - P. 692-699
217. Colburn, A.P. A method of correlating forced convection heat-transfer data and a comparison with fluid friction \ A.P. Colburn // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 1964. - Vol. 7. - No. 12. - P. 1359-1384.
218. Риферт, В.Г. Движение тонкого слоя жидкости по поверхности неподвижного диска / В.Г. Риферт, Н.Н. Голянд, А.А. Мужилко // Промышленная теплотехника. Т.12. - №5. - 1989. - С.35-39.
219. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. чл.-корр. АН СССР В.А. Григорьева и В.М. Зорина. 2-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 560 с.
220. Толмачев, Е.М. Тепловой режим охлаждаемой оправки прошивного стана / Е.М. Толмачев, А.П. Баскаков, А.Н. Добыт // Сталь. - №3. - 2006. - С.55-58.
221. Траянов, Г.Г. Принудительное охлаждение проката и слябов в черной металлургии / Г.Г. Траянов, Ю.И. Липунов. - М.: Металлургия, 1989. - 181 с.
222. Франценюк, И.В. Современные технологии производства металлопроката на Ново-Липецком металлургическом комбинате / И.В. Франценюк, Л.И. Франценюк. - М.: Академкнига, 2003. - 208 с.
223. Inada, S. A Study on the Laminar-flow Heat Transfer Between a Two-dimensional Water Jet and a Flat Surface with Constant Heat Flux \ S. Inada, Y. Miyasaka, R. Izumi // Bulletin of JSME. - 1981. - Vol. 24. - No. 196. - P 1803-1810.
224. Франценюк, И.В. Тонколистовая прокатка. Технология и оборудование / И.В. Франценюк, А.Д. Белянский, Л.А. Кузнецов. - М.: Металлургия, 1994. - 380 с.
225. Франценюк, И.В. Ускоренное охлаждение листа / И.В. Франценюк, А.Е. Захаров. - М.: Металлургия, 1992. - С. 12-13.

226. Biswas, S.K. Optimal temperature tracking for accelerated cooling processes in hot rolling of steel / S.K. Biswas, S.-J. Chen, A. Satyanarayana // Dynamics and control. - 1997. - №7. - P.327-340.
227. Blazevic, D.T. Comparison of cooling methods: sprays, water curtains, laminar tubes and aspirated sprays / D.T. Blazevic // 35th MWSP Proc. ISS-AIME. - 1994. -Vol.31. -P.297-310.
228. Дёма Р.Р. Разработка и внедрение способа гидроудаления (гидроподавления) вторичной окалины на чистовых клетях станов горячей прокатки. Сообщение 1. Теоретическое обоснование проблемы окалинообразования на участке чистовых групп клетей станов горячей прокатки / Дёма Р.Р., Кувшинов Д.А., Амиров Р.Н., Степанищев А.Е. // Производство проката. -2015. -№ 8. -С. 7-11.
229. Дёма Р.Р. Разработка и внедрение способа гидроудаления (гидроподавления) вторичной окалины на чистовых клетях станов горячей прокатки. Сообщение 2. Математическое моделирование температурного режима прокатки для определения условий работы системы гидроудаления окалины / Р.Р. Дёма, Д.А. Кувшинов, Р.Н. Амиров, Ю.Х. Гатаулина // Производство проката. -2015. -№ 9. -С. 3-9.
230. Дёма Р.Р. Разработка и внедрение способа гидроудаления (гидроподавления) вторичной окалины в чистовых клетях станов горячей прокатки. Сообщение 3. Разработка и проектирование системы гидроудаления окалины в чистовых группах клетей станов горячей прокатки листового металла / Р.Р. Дёма, Д.А. Кувшинов, Р.Н. Амиров, С.П. Нефедьев, Н.Ш.Тютеряков // Производство проката. -2015. -№ 10. -С. 27-33.
231. Дёма Р.Р. Разработка и внедрение способа гидроудаления (гидроподавления) вторичной окалины на чистовых клетях станов горячей прокатки. Сообщение 4. Экспериментальное и теоретическое исследование проблемы окалинообразования на участке чистовых групп клетей станов горячей прокатки с целью снижения экологической нагрузки на окружающую среду и обслуживающий персонал / Р.Р. Дёма, Д.А. Кувшинов, Р.Н. Амиров, М.В. Харченко, С.П. Нефедьев, Н.Ш. Тютеряков, Е.В. Нефедова // Производство проката. -2016. -№ 2. -С. 3-9.
232. Воробей, С.А. Моделирование температурного режима рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки / С.А. Воробей, И.Ю. Приходько

- // Научные новости. Современные проблемы металлургии. Пластическая деформация металлов, том 8, г. Днепропетровск. - 2005. - С. 232-235.
233. Yoshida H. An integrated mathematical simulation of temperatures, rolling loads and metallurgical properties in hot strip mills / H. Yoshida, A. Yorifuji, S. Kosei, M. Saeki // *ISIJ International*. - 1991. - Vol. 31. - No. 6.- P. 571-576.
234. Горбатюк, С.М. Компьютерное моделирование системы охлаждения валков чистовой клетки широкополосного стана горячей прокатки и разработка новой схемы охлаждения / С.М. Горбатюк, Р.С. Петрович, И.Г. Морозова // *Металлург*. - 2019. - № 8. - С. 59-62.
235. Sun, C.G. Prediction of Roll Thermal Profile in Hot Strip Rolling by the Finite Element Method / C.G. Sun and S.M. Hwang // *ISIJ International*. – 2000. - Vol. 40. - No. 8. - P. 794-801.
236. Zhang, H. Numerical Simulation of Thermal Field of Work Roll during Top Side-pouring Twin-roll Casting of Steel / H. Zhang, Ch. Zhou, Ch. Wei. // *ISIJ International*. – 2017. - Vol. 57, - No. 10. - P. 1811–1820.
237. Azene, Y.T. Work Roll System Optimisation using Thermal Analysis and Genetic Algorithm / Y.T. Azene // School of Applied Science. Manufacturing Department. PhD Thesis. - 2011.
238. Horsky, J. Optimization of working roll cooling in hot rolling / J. Horsky, P. Kotrbacek, J. Kvapil, K. Schoerhuber // HEFAT2012, 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 16-18 July 2012, Malta.
239. Benasciutti, D. Harmonic Model for Numerical Simulation of Thermal Stresses in Work Roll of Hot Rolling Mill / D. Benasciutti, F. De Bona, M.Gh. Munteanu // ECCM 2010, IV European Conference on Computational Mechanics, Palais des Congrès, Paris, France, May 16-21, 2010.
240. Benasciuttia, D. Finite elements prediction of thermal stresses in work roll of hot rolling mills / D. Benasciuttia, E. Brusab, G. Bazzaroc // *Procedia Engineering* 2 (2010) 707–716.
241. Ma, C.-F. Jet impingement nucleate boiling / C.-F. Ma, A.E. Bergles // *Int. J. Heat Mass Transfer*. - 1986. -Vol.29. - №8. - P. 1095-1101.
242. Mitsutake, Y. Heat transfer during transient cooling of high temperature surface with an impinging jet / Y. Mitsutake, M. Monde // *Heat and Mass Transfer*. - - 2001. -Vol.37. - P.321-328.
243. Гарбер, Э.А. Моделирование теплового режима валков широкополосного стана горячей прокатки для определения эффективных режимов их

- охлаждения / Э.А. Гарбер, М.В. Хлопотин, А.И. Трайно, Е.С. Попов, А.Ф. Савиных // *Металлы*. - 2009. - №3. - С. 34-47.
244. Колдин, А.В. Исследование теплообмена в подвижном металлическом листе при струйном охлаждении / А.В. Колдин, Н.И. Платонов, В.П. Семенов // *Вестник Челябинского государственного университета*. -2008. № 25. Физика. - Вып. 3. - С. 60-67.
245. Румянцев, М.И. Особенности автоматизированного проектирования режимов прокатки на ШСГП при решении задачи обеспечения стабильности контрольных параметров процесса и полосы / М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, А.О. Попов, В.И. Шурыгин // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. - 2012. - № 4 (40). - С. 42-45.
246. Румянцев, М.И. Методика разработки режимов листовой прокатки и ее применение / Румянцев М.И. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. - 2003. - № 3 (3). - С. 16-18.
247. Гейн, С.В. Метод независимых потоков для численного решения многомерного уравнения теплопроводности / С.В. Гейн, Н.А. Зайцев, В.С. Посвянский, Ю.Б. Радвогин.- Москва, 2003.
248. Patula, E.J. Steady-state temperature distribution in rotating roll subject to surface heat fluxes and convective cooling / E.J. Patula // *Transaction of the ASME*. - 1981. - Vol.103. -P.36-41.
249. Свид. 2018618325 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет температурного поля твердого тела в полярной системе координат / Р.Р. Дема, А.В. Колдин, Р.Н. Амиров. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU). №2018618325; заявл. 31.05.2018; опубл. 11.07.2018, реестр программ для ЭВМ.
250. Свид. 2016610434 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Автоматизированный расчет теплового состояния поверхностного слоя рабочего вала стана с учетом положения охлаждающих коллекторов / А.Н. Ворожищев, А.В. Ярославцев, Р.Р. Дема. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное

- образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU). №2016610434; заявл. 25.11.2015; опубл. 20.02.2016, реестр программ для ЭВМ.
251. Платов, С.И. Исследование теплового состояния прокатных валков с целью улучшения температурных условий их эксплуатации / С.И. Платов, Р.Р. Дема, М.В. Зубарева, И.М. Ячиков // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ", 2011. С. 25-30.
252. 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. - P. 667-673.
253. 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. - P. 1007-1012.
254. Свид. 2017615800 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Тепловое и деформированное состояния рабочих валков станов горячей прокатки / Р.Н. Амиров, Р.Р. Дема. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU). № 2017615800; заявл. 05.04.2017; опубл. 24.05.2017, реестр программ для ЭВМ.
255. Зубарева М.В. Исследование теплового состояния прокатных валков с целью улучшения температурных условий их эксплуатации / М.В. Зубарева, Р.Р. Дема, И. М. Ячиков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. -2010. -Т. 1. -№ 68. -С. 315-318.
256. Антонюк В.В. Опыт настройки и управления тепловым состоянием рабочих валков широкополосного стана 2000 г.п. ПАО "Магнитогорский металлургический комбинат" / В.В. Антонюк, А.Г. Федин, В.А. Мустафин, Р.Р. Дема, С.И. Платов, Р.Н. Амиров, А.В. Колдин, М.В. Харченко // В сборнике: XI МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС ПРОКАТЧИКОВ Материалы конгресса. - 2017. - С. 84-87.

257. Ворожищев А.Н. Моделирование теплового состояния массивного тела в зависимости от объема поступающего охладителя, на примере прокатных валков стана горячей прокатки / А.Н. Ворожищев, Р.Р. Дема, Т.В. Казакова // В сборнике: ПромИнжиниринг труды II международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). -2016. -С. 99-102.
258. Салганик, В.М. Технология производства листовой стали: учебное пособие / В. М. Салганик, М. И. Румянцев; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г. И. Носова". - Магнитогорск, 2007.
259. Румянцев, М.И. Развитие методики синтеза частных обжатий горизонтальными валками при горячей прокатке на широкополосных станах / М.И. Румянцев // Калибровочное бюро. - 2016. - № 8. - С. 23-32.
260. Румянцев, М.И. Развитие методики синтеза режима обжатий при горячей прокатке на широкополосных станах. Сообщение 1. Выбор числа активных чистовых клетей / М.И. Румянцев // Калибровочное бюро. - 2015. - № 6. - С. 100-107.
261. Румянцев, М.И. Развитие методики синтеза режима обжатий при горячей прокатке на широкополосных станах. Сообщение 2. Выбор толщины промежуточного раската / М.И. Румянцев // Калибровочное бюро. - 2015. - № 6. - С. 108-114.
262. Румянцев, М.И. Развитие методики синтеза режима обжатий при горячей прокатке на широкополосных станах. Сообщение 3. Выбор ширины промежуточного раската / М.И. Румянцев // Калибровочное бюро. - 2015. - № 6. - С. 115-121.
263. Свид. 2015616747 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет энергозатрат на широкополосных станах горячей прокатки / Р.Р. Дема, С.И. Платов, А.В. Ярославцев, К.К. Ахметова, Р.Н. Амиров, У.Д. Мартынова. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический

- университет им. Г.И. Носова» (RU). №2015616747; заявл. 23.04.2015; опубл. 20.07.2015, реестр программ для ЭВМ.
264. Свид. 2013612829 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Разработка технологии прокатки горячекатаной полосы при подаче смазочного материала в межвалковый зазор / А.В. Ярославцев, С.И. Платов, Р.Р. Дема, М.И. Румянцев, Р.Н. Амиров, К.К. Ахметова, У.Д. Мартынова, И.И. Мацко, М.В. Обломец. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU). №2013612829; заявл. 29.01.2013; опубл. 20.06.2013, реестр программ для ЭВМ.
265. Харченко, М.В. Разработка технологии подачи смазки при горячей прокатке на опорные валки для производства высокопрочных марок сталей. Актуальные проблемы современной науки, техники и образования / М.В. Харченко, Р.Р. Дема, А.В. Ярославцев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. Т. 1. № 1. С. 307.
266. 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. Дема, М.В. Харченко, К.Е. Ларкин, А.В. Горбунов, А.В. Кузнецов, А.Г. Ветренко // Сталь. - 2012. - № 2. - С. 52-55.
267. Platov, S.I. Experience of application of liquid lubricating materials during wide strip hot rolling / S.I. Platov, R.R. Dema, M.V. Kharchenko, R.N. Amirov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering "3rd International Scientific and Technical Conference on Scientific and Technical Progress in Ferrous Metallurgy, SATPIFM 2017". - 2018. - P. 012011.
268. 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. Т. 40. № 4. С. 277-283
269. 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.

270. 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. Дема, С.И. Лукьянов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. -2012.- № 2 (38). - С. 100-101.
271. Дема, Р.Р. Совершенствование системы охлаждения прокатных валков черновой группы клетей на листовом стане горячей прокатки / Р.Р. Дема // Производство проката. -2018. -№ 12. -С. 15-21.
272. Платов С.И. Совершенствование системы охлаждения рабочих валков черновой группы клетей стана 2000 г.п. ОАО "ММК" / С.И. Платов, Р.Р. Дема, М.В. Зубарева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. -2011. -Т. 2. -№ 69. -С. 171-173.
273. Совершенствование системы охлаждения рабочих валков черновой группы клетей стана 2000 г.п.: отчет о НИР / ОАО «ММК»; исполн.: Дема Р.Р., Платов С.И. Магнитогорск, 2011. – 80 с. – Инв. № 181078.
274. Дема Р.Р., Зубарева М.В. Исследование теплового состояния прокатных валков черновой группы клетей стана 2000 г.п. ОАО «ММК» Процессы и оборудование металлургического производства: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. С.И. Платова Вып. 8. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. С .282 – 288.
275. 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.
276. Пат. 152330 РФ, МПК В21В 27/06. Устройство для охлаждения прокатных валков / Р.Р. Дёма, Р.Н. Амиров, С.П. Нефедьев, А.В. Ярославцев, В.С. Гливенко; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». - № 2015100354/02; заявл. 12.01.2015; опубл. 20.05.2015, Бюл. № 14. -6 с.
277. Свид. 2016610433 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет оптимального положения коллектора охлаждения рабочего валка стана для максимального соответствия заданному диапазону температур / А.Н. Ворожищев, А.В. Ярославцев, Р.Р. Дема. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.

- Носова» (RU). №2016610433; заявл. 25.11.2015; опубл. 20.02.2016, реестр программ для ЭВМ.
278. Пат. 2457913 РФ, МПК В21В 27/10. Способ охлаждения рабочих валков станов горячей прокатки / С.В. Дубовский, С.И. Платов, Д.В. Терентьев, Р.Р. Дема, М.В. Зубарева, М.В. Харченко, А.В. Ярославцев; заявитель и патентообладатель ОАО «ММК». - № 2011104961/02; заявл. 10.02.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. №22. - 6 с.
279. Пат. 110663 РФ, МПК В05В 1/34. Устройство для распыления жидкости / С.И. Платов, Р.Р. Дёма, Д.А. Кувшинов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». - № 2011123996/05; заявл. 14.06.2011; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33. - 11 с.
280. 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.

ПРИЛОЖЕНИЯ



АКТ ИСПЫТАНИЙ
По результатам диссертационной работы Демы Р.Р.
«Разработка математической модели управления системой охлаждения рабочих валков в клетях №№7-13, а также системой антишелушения в клетях №№7-9 стана 2000 г.п. ПАО «ММК»»
 договор № 232152 от 02.06.2017 г.

Краткое описание выполненной работы

С целью повышения стойкости рабочих валков непрерывной чистой группы клетей стана 2000 г.п. была разработана и реализована математическая модель управления системой охлаждения рабочих валков в клетях №№7-13, а также системой антишелушения в клетях №№7-9.

На основе разработанной математической модели определено местоположение для коллекторов системы охлаждения рабочих валков клетей №№ 7-13, а также для коллекторов системы антишелушения в клетях №№7-9. Выпущены соответствующие технологические письма: ТД 0565 от 12.09.2018 г (о настройке системы охлаждения) и ТД 0566 от 12.09.2018 г. (о настройке системы антишелушения).

Произведена настройка существующей системы охлаждения, по результатам которой выданы конкретные рекомендации по назначению расходов охладителя в зависимости от характеристик прокатываемого монтажа. Выпущено соответствующее технологическое письмо ТД 0564 от 12.09.2018 г (определение расходов охладителя по клетям) и произведены опытные прокатки монтажей для клетей №№7-13 чистой группы.

Результаты испытания

Оценка эффективности результатов настройки существующей системы охлаждения, в зависимости от характеристик прокатываемого монтажа, производилась путем сравнения средних значений величин съемов и температурного состояния прокатных валков чистой группы клетей. Данные по монтажам, при прокатке полос с базовой настройкой системы охлаждения прокатных валков и с учетом ее корректировки, получены из цехового журнала учета данных, результаты которых систематизированы и представлены в таблицах 1-2. Замеры температурного состояния прокатных валков производились при помощи тепловизора (SDS HotFind-DXT (-20-1500 uh C)), результаты которых представлены в таблицах 3-4.

Таблица 1. Величина съема рабочих валков в зависимости от характеристики прокатанного монтажа с базовой настройкой системы охлаждения чистовой группы клетей.

Характеристики прокатанного монтажа, согласно ТД 0564 от 12.09.2018	т/км	Прокатываемый монтаж	Положение рабочего валка	Чистовая группа клетей стана 2000 г.п. ПАО «ММК»							
				7	8	9	10	11	12	13	
				Величина съема, мм							
$W_{\text{сумм}} < 2150$ $k_L \leq 0,025$	1740/94	48027 от 13.08.18	Верхний	0,3	0,4	0,4	0,4	1	1	0,5	
			Нижний	0,3	0,4	0,4	0,4	1	1	0,5	
	2100/105	48038 от 15.08.18	Верхний	0,2	0,5	0,2	1	1,5	0,8	0,6	
			Нижний	0,2	0,5	0,2	1	1,5	0,8	0,6	
	1900/46	48059 от 18.08.18	Верхний	0,4	0,8	0,5	1,6	1,3	1	0,5	
			Нижний	0,4	0,8	0,5	1,8	1,3	1	0,5	
	2100/72	48082 от 22.08.18	Верхний	0,3	0,8	0,4	1	0,9	0,8	0,5	
			Нижний	0,3	0,8	0,4	0,9	0,9	0,8	0,8	
	1770/87	48091 от 23.08.10	Верхний	0,4	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,7	
			Нижний	0,4	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,7	
	Средние значения:			Верхний	0,32	0,6	0,4	0,96	1,1	0,88	0,56
				Нижний	0,32	0,6	0,4	0,98	1,1	0,88	0,62
$2150 < W_{\text{сумм}} < 2850$ $k_L \leq 0,025$	2400/86	48058 от 18.08.18	Верхний	0,3	0,5	0,5	0,6	1	1	0,7	
			Нижний	0,3	0,5	0,5	0,6	1	1	0,7	
	2700/122	48061 от 19.08.18	Верхний	0,2	0,4	0,4	0,6	1	0,7	0,3	
			Нижний	0,2	0,4	0,4	0,6	1	1,8	0,3	
	2400/114	48067 от 20.08.18	Верхний	0,4	0,3	0,5	0,5	0,6	1	0,6	
			Нижний	0,4	0,3	0,5	0,6	0,6	1	0,6	
	2520/113	48075 от 21.08.18	Верхний	0,4	0,5	0,4	0,8	1	0,8	0,8	
			Нижний	0,4	0,5	0,4	0,8	1	0,8	0,8	
	2200/91	48134 от 31.08.18	Верхний	0,4	0,4	0,3	0,7	0,4	0,8	0,8	
			Нижний	0,4	0,4	0,3	0,7	0,4	0,8	0,8	
	Средние значения:			Верхний	0,34	0,42	0,42	0,64	0,8	0,86	0,64
				Нижний	0,34	0,42	0,42	0,66	0,8	1,08	0,64
$2850 < W_{\text{сумм}} < 3150$ $k_L \leq 0,025$	6200/112	48056 от 18.08.18	Верхний	0,3	0,3	0,4	1,3	1,4	0,3	0,3	
			Нижний	0,3	0,3	0,4	1,2	1,4	0,3	0,3	
	3200/97	48076 от 21.08.18	Верхний	0,3	0,5	0,5	0,8	0,7	1	0,5	
			Нижний	0,3	0,5	0,5	0,8	0,7	1	0,5	
	3200/108	48077 от 21.08.18	Верхний	0,4	1	0,5	1,3	1	0,5	0,6	
			Нижний	0,4	1	0,5	1,3	1	0,3	0,6	
	4300/88	48078 от 21.08.18	Верхний	0,5	0,3	0,5	1,2	1,3	0,9	0,5	
			Нижний	0,5	0,3	0,5	1,2	1,3	0,9	0,5	
	3131/80	48087 от 23.08.18	Верхний	0,3	0,3	0,4	0,6	1	0,8	0,5	
			Нижний	0,3	0,3	0,4	0,6	1	0,8	0,8	
	Средние значения:			Верхний	0,36	0,48	0,46	1,04	1,08	0,7	0,48
				Нижний	0,36	0,48	0,46	1,02	1,08	0,66	0,54

Таблица 2. Величина съема рабочих валков в зависимости от характеристики прокатанного монтажа с учетом выданных рекомендаций по настройке системы охлаждения чистой группы клетей.

Характеристики прокатанного монтажа, согласно ТД 0564 от 12.09.2018	т/км	Прокатываемый монтаж	Положение рабочего валка	Чистовая группа клетей стана 2000 г.п. ПАО «ММК»						
				7	8	9	10	11	12	13
				Величина съема, мм						
$W_{\text{сумм}} < 2150$ $k_L \leq 0,025$	2100/101	48243 от 17.09.18	Верхний	0,3	0,3	0,3	0,4	1	1,4	0,7
			Нижний	0,3	0,3	0,3	0,2	1	1,4	0,7
	1968/46	48251 от 17.09.18	Верхний	0,2	0,4	0,5	0,5	1,2	0,8	1
			Нижний	0,2	0,4	0,5	0,5	1,2	0,8	1
	2100/108	48256 от 19.09.18	Верхний	0,4	0,5	0,5	0,5	0,9	1,0	0,8
			Нижний	0,4	0,5	0,5	0,5	2,2	0,7	1
	2060/117	48270 от 20.09.18	Верхний	0,2	0,4	0,2	1,1	0,5	1,1	0,5
			Нижний	0,2	0,4	0,2	1,1	0,6	1,1	0,5
	2100/159	48281 от 22.09.18	Верхний	0,3	0,3	0,3	0,9	0,9	0,8	0,1
			Нижний	0,3	0,3	0,3	0,9	0,9	0,8	0,8
Средние значения:			Верхний	0,28	0,38	0,36	0,68	0,9	1,02	0,62
			Нижний	0,28	0,38	0,36	0,64	1,18	0,96	0,8
$2150 < W_{\text{сумм}} < 2850$ $k_L \leq 0,025$	2200/122	48273 от 21.09.18	Верхний	0,3	0,7	0,5	1	1	0,8	0,5
			Нижний	0,3	0,7	0,5	0,9	1	0,8	0,5
	2300/128	48276 от 21.09.18	Верхний	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,5	0,6
			Нижний	0,3	0,3	0,3	0,6	0,4	0,3	0,6
	2300/129	48277 от 21.09.18	Верхний	0,3	0,3	0,4	0,3	1,1	1	0,6
			Нижний	0,3	0,3	0,4	0,4	1,1	1	0,6
	2400/125	48289 от 23.09.18	Верхний	0,3	0,5	0,5	0,9	0,2	1	0,8
			Нижний	0,3	0,5	0,5	0,8	0,2	1	0,8
	2490/115	48298 от 24.09.18	Верхний	0,3	0,3	0,3	0,9	1	0,5	0,6
			Нижний	0,3	0,3	0,3	0,9	1	0,5	0,6
Средние значения:			Верхний	0,3	0,42	0,4	0,72	0,8	0,76	0,62
			Нижний	0,3	0,42	0,4	0,72	0,74	0,72	0,62
$2850 < W_{\text{сумм}} < 3350$ $k_L \leq 0,025$	3000/120	48283 от 22.09.18	Верхний	0,4	0,4	0,4	0,9	1,4	0,9	0,4
			Нижний	0,4	0,4	0,4	0,9	1,4	0,9	0,4
	3000/92	48311 от 26.09.18	Верхний	0,2	0,5	0,5	1	0,8	0,5	0,5
			Нижний	0,2	0,5	0,5	1	0,8	0,3	0,5
	3160/130	48342 от 30.09.18	Верхний	0,3	0,4	0,4	1	0,5	0,5	0,7
			Нижний	0,3	0,4	0,4	1	0,5	0,5	0,7
	2900/106	48367 от 3.10.18	Верхний	0,4	0,3	0,3	0,9	0,2	0,5	0,5
			Нижний	0,4	0,3	0,3	0,9	0,2	0,5	0,5
	3350/120	48370 от 4.10.18	Верхний	0,3	0,4	0,5	0,4	0,8	0,6	0,5
			Нижний	0,3	0,4	0,5	0,4	0,8	0,6	0,5
Средние значения:			Верхний	0,32	0,4	0,42	0,84	0,74	0,6	0,52
			Нижний	0,32	0,4	0,42	0,84	0,74	0,56	0,52

Таблица 3. Температура рабочих валков в зависимости от характеристики прокатанного монтажа с базовой настройкой системы охлаждения чистой группы клетей.

Характеристики прокатанного монтажа, согласно ТД 0564 от 12.09.2018	т/км	Прокатываемый монтаж	Положение рабочего валка	Чистовая группа клетей стана 2000 г.п. ПАО «ММК»						
				7	8	9	10	11	12	13
				Температура рабочих валков чистой группы, °С						
$W_{\text{сумм}} < 2150$ $k_L \leq 0,025$	1740/94	48027 от 13.08.18	Верхний	87	88	81	80	75	70	68
			Нижний	85	87	77	76	72	67	60
	2100/105	48038 от 15.08.18	Верхний	84	84	79	82	78	72	66
			Нижний	85	80	76	78	74	66	60
	1900/46	48059 от 18.08.18	Верхний	78	80	76	75	72	68	64
			Нижний	79	78	74	71	70	62	58
	2100/72	48082 от 22.08.18	Верхний	78	80	78	77	72	68	66
			Нижний	84	79	78	71	69	63	60
1770/87	48091 23.08.10	Верхний	82	83	79	78	74	62	60	
		Нижний	84	82	76	74	70	60	58	
Средние значения:			Верхний	82	83	81,8	83,0	78,6	78,4	74,2
			Нижний	82	81	83,4	81,2	76,2	74,0	71,0
$2150 < W_{\text{сумм}} < 2850$ $k_L \leq 0,025$	2400/86	48058 от 18.08.18	Верхний	88	88	87	85	72	79	66
			Нижний	84	89	85	83	69	75	67
	2700/122	48061 от 19.08.18	Верхний	89	88	86	79	77	70	73
			Нижний	85	87	84	77	76	71	67
	2400/114	48067 от 20.08.18	Верхний	87	89	84	84	77	76	71
			Нижний	85	87	81	79	76	69	64
	2520/113	48075 от 21.08.18	Верхний	87	89	86	76	74	66	73
			Нижний	89	84	86	78	75	63	67
2200/91	48134 от 31.08.18	Верхний	82	87	88	84	70	69	67	
		Нижний	80	86	85	82	72	64	64	
Средние значения:			Верхний	87	90	86,6	88,2	86,2	81,6	74,0
			Нижний	85	89	84,6	86,6	84,2	79,8	73,6
$2850 < W_{\text{сумм}} < 3200$ $k_L \leq 0,025$	6200/112	48056 от 18.08.18	Верхний	87	86	80	82	70	78	67
			Нижний	85	84	79	76	72	66	61
	3200/97	48076 от 21.08.18	Верхний	88	84	81	89	72	81	69
			Нижний	85	86	82	81	73	67	64
	3200/108	48077 от 21.08.18	Верхний	83	86	80	84	74	73	65
			Нижний	84	83	75	80	73	68	63
	4300/88	48078 от 21.08.18	Верхний	81	83	80	81	72	71	67
			Нижний	85	84	80	79	71	64	62
3131/80	48087 от 23.08.18	Верхний	84	90	88	82	73	66	62	
		Нижний	89	85	78	76	70	61	64	
Средние значения:			Верхний	87	87	84,6	85,8	81,8	83,6	72,2
			Нижний	88	87	85,6	84,4	78,8	78,4	71,8

Таблица 4. Температура рабочих валков в зависимости от характеристики прокатанного монтажа с учетом выданных рекомендаций по настройке системы охлаждения чистой группы клетей.

Характеристики прокатанного монтажа, согласно ТД 0564 от 12.09.2018	т/км	Прокатываемый монтаж	Положение рабочего валка	Чистовая группа клетей стана 2000 г.п. ПАО «ММК»						
				7	8	9	10	11	12	13
				Температура рабочих валков чистой группы, °С						
$W_{\text{сумм}} < 2150$ $k_L \leq 0,025$	2100/101	48243 от 17.09.18	Верхний	79	85	80	76	74	75	76
			Нижний	85	83	79	80	69	74	67
	1968/46	48251 от 17.09.18	Верхний	83	84	78	80	74	75	72
			Нижний	86	83	75	79	71	71	66
	2100/108	48256 от 19.09.18	Верхний	79	73	71	74	71	72	68
			Нижний	77	76	72	72	68	69	62
	2060/117	48270 от 20.09.18	Верхний	80	79	72	72	71	65	71
			Нижний	80	78	73	74	67	69	67
	2100/159	48281 от 22.09.18	Верхний	83	80	81	83	74	69	65
			Нижний	83	81	73	73	67	64	63
Средние значения:			Верхний	82	84	80,8	80,2	76,4	77,0	72,8
			Нижний	83	85	82,2	80,2	74,4	75,6	68,4
$2150 < W_{\text{сумм}} < 2850$ $k_L \leq 0,025$	2200/122	48273 от 21.09.18	Верхний	84	89	83	77	73	80	76
			Нижний	86	86	81	79	71	74	69
	2300/128	48276 от 21.09.18	Верхний	92	86	86	76	76	79	71
			Нижний	88	87	81	77	77	72	67
	2300/129	48277 от 21.09.18	Верхний	79	77	74	81	71	73	70
			Нижний	73	71	74	75	69	66	66
	2400/125	48289 от 23.09.18	Верхний	83	80	86	77	70	75	73
			Нижний	81	81	85	72	68	69	69
	2490/115	48298 от 24.09.18	Верхний	85	84	80	79	73	66	67
			Нижний	86	82	81	77	71	68	66
Средние значения:			Верхний	83	84	84,6	83,2	81,8	78,0	72,6
			Нижний	83	80	82,8	81,4	80,4	76,0	71,2
$2850 < W_{\text{сумм}}$ $k_L \leq 0,025$	3000/120	48283 от 22.09.18	Верхний	88	88	78	80	71	78	66
			Нижний	89	88	77	81	69	72	65
	3000/92	48311 от 26.09.18	Верхний	77	87	82	90	74	78	72
			Нижний	81	83	74	75	73	71	67
	3160/130	48342 от 30.09.18	Верхний	85	77	71	77	71	73	70
			Нижний	84	77	67	69	72	66	63
	2900/106	48367 от 3.10.18	Верхний	74	80	80	81	70	73	70
			Нижний	80	81	72	71	68	70	65
	3350/120	48370 от 4.10.18	Верхний	81	80	82	80	72	68	65
			Нижний	84	82	71	77	70	65	64
Средние значения:			Верхний	81	81	81,0	82,4	78,6	81,6	71,6
			Нижний	86	80	83,6	82,2	72,2	74,6	70,4

Произведено сопоставление средних значений величин съемов и температурного состояния прокатных валков по характеристикам монтажей, результаты которых представлены в таблицах 5-6.

Таблица 5. Величина съема прокатных валков в зависимости от характеристики прокатанного монтажа.

Характеристика монтажа	Положение валка	Номер клетки:													
		7		8		9		10		11		12		13	
$W_{\text{сумм}} < 2150$ $k_L \leq 0,025$	верх.	$\frac{0,32}{0,28}$	+0,04	$\frac{0,6}{0,38}$	+0,22	$\frac{0,4}{0,36}$	+0,04	$\frac{0,96}{0,68}$	+0,28	$\frac{1,1}{0,9}$	+0,2	$\frac{0,88}{1,02}$	-0,14	$\frac{0,56}{0,62}$	-0,06
	нижн.	$\frac{0,32}{0,28}$	+0,04	$\frac{0,6}{0,38}$	+0,22	$\frac{0,4}{0,36}$	+0,04	$\frac{0,98}{0,64}$	+0,34	$\frac{1,1}{1,18}$	-0,02	$\frac{0,88}{0,96}$	-0,08	$\frac{0,62}{0,8}$	-0,18
$2150 < W_{\text{сумм}} < 2850$ $k_L \leq 0,025$	верх.	$\frac{0,36}{0,3}$	+0,06	$\frac{0,48}{0,42}$	+0,06	$\frac{0,460}{4}$	+0,06	$\frac{1,04}{0,72}$	+0,32	$\frac{1,08}{0,8}$	+0,28	$\frac{0,7}{0,76}$	-0,06	$\frac{0,48}{0,62}$	-0,14
	нижн.	$\frac{0,36}{0,3}$	+0,06	$\frac{0,48}{0,42}$	+0,06	$\frac{0,46}{0,4}$	+0,06	$\frac{1,02}{0,72}$	+0,3	$\frac{1,08}{0,74}$	+0,34	$\frac{0,66}{0,72}$	-0,06	$\frac{0,54}{0,62}$	-0,08
$2850 < W_{\text{сумм}}$ $k_L \leq 0,025$	верх.	$\frac{0,36}{0,32}$	+0,04	$\frac{0,48}{0,4}$	+0,08	$\frac{0,46}{0,42}$	+0,04	$\frac{1,04}{0,84}$	+0,2	$\frac{1,08}{0,74}$	+0,34	$\frac{0,7}{0,6}$	+0,1	$\frac{0,48}{0,52}$	-0,04
	нижн.	$\frac{0,36}{0,32}$	+0,04	$\frac{0,48}{0,4}$	+0,08	$\frac{0,46}{0,42}$	+0,04	$\frac{1,02}{0,84}$	+0,18	$\frac{1,08}{0,74}$	+0,34	$\frac{0,66}{0,56}$	+0,1	$\frac{0,54}{0,52}$	0,02

Примечание:
в числителе указаны данные величин съема без корректировки системы охлаждения прокатных валков чистой группы клеток / в знаменателе данные с учетом настройки системы охлаждения валков чистой группы клеток.

Таблица 6. Изменение средних значений температурного состояния прокатных валков.

Характеристика монтажа	Положение валка	Номер клетки:						
		7	8	9	10	11	12	13
$W_{\text{сумм}} < 2150$ $k_L \leq 0,025$	верх.	-1,0	-2,8	-2,2	-1,4	-1,4	3,2	5,6
	нижн.	-1,2	-1,0	-1,8	1,6	-2,6	5,8	5,8
$2150 < W_{\text{сумм}} < 2850$ $k_L \leq 0,025$	верх.	-2,0	-5,0	-4,4	-3,6	-1,4	2,6	1,4
	нижн.	-1,8	-5,2	-3,8	-3,8	-2,4	1,4	1,6
$2850 < W_{\text{сумм}}$ $k_L \leq 0,025$	верх.	-3,6	-3,4	-3,2	-2,0	-0,6	0,2	2,6
	нижн.	-2,0	-2,2	-6,6	-3,8	-1,4	3,6	2,0

Примечание: «-» указывает на снижение температуры прокатных валков, градус °С;
«+» указывает на повышение температуры прокатных валков, градус °С.

Заключение по результатам испытаний

Произведено испытание практических рекомендаций полученных в результате реализации математической модели управления системой охлаждения рабочих валков в клетях №№7-13, а также системой антишелушения в клетях №№7-9 стана: ТД 0565 от 12.09.2018 г (о настройке системы охлаждения), ТД 0566 от 12.09.2018 г. (о настройке системы антишелушения) и ТД 0564 от 12.09.2018 г (определение расходов охладителя по клетям).

Начальник ЛПЦ-10

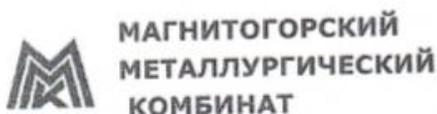
Зам. начальника ЛПЦ-10
по технологии

Научный руководитель
к.т.н., доцент


Д.А. Захарьин
Подпись, дата
А.Г. Федин
Подпись, дата
Р.Р. Дема
Подпись, дата

Шураидан ЕВ и.о. н.с. у.г.

Ш.А. Бурганов



**МАГНИТОГОРСКИЙ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ
КОМБИНАТ**

Открытое акционерное общество
«Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»)
Ул. Кирова, 93, г. Магнитогорск, Челябинская область, 455000т.
24-41-66, ф. 24-80-16

ЛИСТОПРОКАТНЫЙ ЦЕХ № 10

**Справка
перевалок рабочих валков чистовой группы
для мониторинга результатов испытания по теме НИОКР:**

«Разработка математической модели управления системой охлаждения рабочих валков в клетях №№7-13, а также системой антишелушения в клетях №№7-9 стана 2000 г.п. ПАО «ММК»».

Величина съема прокатных валков 7-13-ой клетей чистовой группы стана 2000 г.п. ПАО «ММК» на период 01.08.2018 - 31.08.2018 г с базовыми настройками системы охлаждения валков.

Характеристики прокатанного монтажа, согласно ТД 0564 от 12.09.2018	т/км	Прокатываемый монтаж	Положение рабочего валка	Чистовая группа клетей стана 2000 г.п. ПАО «ММК»						
				7	8	9	10	11	12	13
				Величина съема, мм						
$W_{сумм} < 2150$ $k_L \leq 0,025$	1740/94	48027 от 13.08.18	Верхний	0,3	0,4	0,4	0,4	1	1	0,5
			Нижний	0,3	0,4	0,4	0,4	1	1	0,5
	2100/105	48038 от 15.08.18	Верхний	0,2	0,5	0,2	1	1,5	0,8	0,6
			Нижний	0,2	0,5	0,2	1	1,5	0,8	0,6
	1900/46	48059 от 18.08.18	Верхний	0,4	0,8	0,5	1,6	1,3	1	0,5
			Нижний	0,4	0,8	0,5	1,8	1,3	1	0,5
	2100/72	48082 от 22.08.18	Верхний	0,3	0,8	0,4	1	0,9	0,8	0,5
			Нижний	0,3	0,8	0,4	0,9	0,9	0,8	0,8
	1770/87	48091 от 23.08.10	Верхний	0,4	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,7
			Нижний	0,4	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,7
$2150 < W_{сумм} < 2850$ $k_L \leq 0,025$	2400/86	48058 от 18.08.18	Верхний	0,3	0,5	0,5	0,6	1	1	0,7
			Нижний	0,3	0,5	0,5	0,6	1	1	0,7
	2700/122	48061 от 19.08.18	Верхний	0,2	0,4	0,4	0,6	1	0,7	0,3
			Нижний	0,2	0,4	0,4	0,6	1	1,8	0,3
	2400/114	48067 от 20.08.18	Верхний	0,4	0,3	0,5	0,5	0,6	1	0,6
			Нижний	0,4	0,3	0,5	0,6	0,6	1	0,6
	2520/113	48075 от 21.08.18	Верхний	0,4	0,5	0,4	0,8	1	0,8	0,8
			Нижний	0,4	0,5	0,4	0,8	1	0,8	0,8
	2200/91	48134 от 31.08.18	Верхний	0,4	0,4	0,3	0,7	0,4	0,8	0,8
			Нижний	0,4	0,4	0,3	0,7	0,4	0,8	0,8
$2850 < W_{сумм} < 3131$ $k_L \leq 0,025$	6200/112	48056 от 18.08.18	Верхний	0,3	0,3	0,4	1,3	1,4	0,3	0,3
			Нижний	0,3	0,3	0,4	1,2	1,4	0,3	0,3
	3200/97	48076 от 21.08.18	Верхний	0,3	0,5	0,5	0,8	0,7	1	0,5
			Нижний	0,3	0,5	0,5	0,8	0,7	1	0,5
	3200/108	48077 от 21.08.18	Верхний	0,4	1	0,5	1,3	1	0,5	0,6
			Нижний	0,4	1	0,5	1,3	1	0,3	0,6
	4300/88	48078 от 21.08.18	Верхний	0,5	0,3	0,5	1,2	1,3	0,9	0,5
			Нижний	0,5	0,3	0,5	1,2	1,3	0,9	0,5
	3131/80	48087 от 23.08.18	Верхний	0,3	0,3	0,4	0,6	1	0,8	0,5
			Нижний	0,3	0,3	0,4	0,6	1	0,8	0,8

Величина съема прокатных валков 7-13-ой клетей чистой группы стана 2000 г.п. ПАО «ММК» на период 01.09.2018 - 04.10.2018 г с учетом корректирующих настроек системы охлаждения валков.

Характеристики прокатанного монтажа, согласно ТД 0564 от 12.09.2018	т/км	Прокатываемый монтаж	Положение рабочего валка	Чистовая группа клетей стана 2000 г.п. ПАО «ММК»						
				7	8	9	10	11	12	13
				Величина съема, мм						
$W_{сумм} < 2150$ $k_L \leq 0,025$	2100/101	48243 от 17.09.18	Верхний	0,3	0,3	0,3	0,4	1	1,4	0,7
			Нижний	0,3	0,3	0,3	0,2	1	1,4	0,7
	1968/46	48251 от 17.09.18	Верхний	0,2	0,4	0,5	0,5	1,2	0,8	1
			Нижний	0,2	0,4	0,5	0,5	1,2	0,8	1
	2100/108	48256 от 19.09.18	Верхний	0,4	0,5	0,5	0,5	0,9	1,0	0,8
			Нижний	0,4	0,5	0,5	0,5	2,2	0,7	1
	2060/117	48270 от 20.09.18	Верхний	0,2	0,4	0,2	1,1	0,5	1,1	0,5
			Нижний	0,2	0,4	0,2	1,1	0,6	1,1	0,5
	2100/159	48281 от 22.09.18	Верхний	0,3	0,3	0,3	0,9	0,9	0,8	0,1
			Нижний	0,3	0,3	0,3	0,9	0,9	0,8	0,8
$2150 < W_{сумм}$ < 2850 $k_L \leq 0,025$	2200/122	48273 от 21.09.18	Верхний	0,3	0,7	0,5	1	1	0,8	0,5
			Нижний	0,3	0,7	0,5	0,9	1	0,8	0,5
	2300/128	48276 от 21.09.18	Верхний	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,5	0,6
			Нижний	0,3	0,3	0,3	0,6	0,4	0,3	0,6
	2300/129	48277 от 21.09.18	Верхний	0,3	0,3	0,4	0,3	1,1	1	0,6
			Нижний	0,3	0,3	0,4	0,4	1,1	1	0,6
	2400/125	48289 от 23.09.18	Верхний	0,3	0,5	0,5	0,9	0,2	1	0,8
			Нижний	0,3	0,5	0,5	0,8	0,2	1	0,8
	2490/115	48298 от 24.09.18	Верхний	0,3	0,3	0,3	0,9	1	0,5	0,6
			Нижний	0,3	0,3	0,3	0,9	1	0,5	0,6
$2850 < W_{сумм}$ $k_L \leq 0,025$	3000/120	48283 от 22.09.18	Верхний	0,4	0,4	0,4	0,9	1,4	0,9	0,4
			Нижний	0,4	0,4	0,4	0,9	1,4	0,9	0,4
	3000/92	48311 от 26.09.18	Верхний	0,2	0,5	0,5	1	0,8	0,5	0,5
			Нижний	0,2	0,5	0,5	1	0,8	0,3	0,5
	3160/130	48342 от 30.09.18	Верхний	0,3	0,4	0,4	1	0,5	0,5	0,7
			Нижний	0,3	0,4	0,4	1	0,5	0,5	0,7
	2900/106	48367 от 3.10.18	Верхний	0,4	0,3	0,3	0,9	0,2	0,5	0,5
			Нижний	0,4	0,3	0,3	0,9	0,2	0,5	0,5
	3350/120	48370 от 4.10.18	Верхний	0,3	0,4	0,5	0,4	0,8	0,6	0,5
			Нижний	0,3	0,4	0,5	0,4	0,8	0,6	0,5

Ведущий специалист ЛПЦ-10



Калужских А.В.

УТВЕРЖДАЮ

И.о. начальника технического департамента
ПАО «ММК»



Е.В. Брайчев

2018 г.

АКТ

**передачи научно – технической продукции
в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
по результатам диссертационной работы Демы Р.Р.**

Краткое описание выполненной работы

Для достижения оптимального эффекта в снижении энергосиловых параметров при горячей прокатке с применением системы подачи технологической смазки на опорные валки клетей №7-9 стана 2000 г.п. разработаны рекомендации по настройке режимов расхода смазочного материала.

Полученный результат

1. Значения расхода смазочного материала в зависимости от группы выкатываемости стали приведены в таблице.
2. Указанные значения расхода смазочного материала (СМ) рекомендованы к использованию в промышленных условиях на стане 2000 г.п.

Таблица. Рекомендованные значения расхода смазочного материала

группа выкатываемости	рекомендуемый расход СМ на клеть (л/мин)		
	7-ая клеть	8-ая клеть	9-ая клеть
1	0,09-0,10	0,13-0,15	0,20-0,24
2	0,12-0,14	0,11-0,13	0,17-0,20
3	0,05-0,10	0,08-0,10	0,10-0,13
4	0,04-0,05	0,09-0,10	0,10-0,12
5	0,03-0,06	0,08-0,10	0,11-0,13
6	без изменений		

Начальник ЛПЦ – 10

Д.А. Захарьин

Зам. начальника ЛПЦ-10
по технологии

А.Г. Федин

Исполнитель:

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

к.т.н., доцент каф. МИТОДИМ

Р.Р. Дема

д.т.н., проф. каф. МИТОДИМ

С.И. Платов

УТВЕРЖДАЮ

И.о. начальника технического департамента
ПАО «ММК»

«» Е.В. Брайчев

2018 г.

АКТ

**передачи научно – технической продукции
в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
по результатам диссертационной работы Демы Р.Р.**

Краткое описание выполненной работы

Согласно разработанным рекомендациям по назначению расхода технологической смазки на опорные валки клетей №№7-9 стана 2000 г.п. зафиксировано снижение энергосиловых параметров процесса прокатки.

Полученный результат

Зафиксированные значения снижения энергосиловых параметров процесса прокатки при использовании технологической смазки приведены в таблице.

Таблица. Зафиксированные значения снижения энергосиловых параметров процесса прокатки при использовании технологической смазки

Снижение технологических параметров, %									
№ клетки	7-ая клеть			8-ая клеть			9-ая клеть		
	Усилие прокатк и (Р)	Ток (I)	Момент прокатк и (Мпр)	Усилие прокатк и (Р)	Ток (I)	Момент прокатк и (Мпр)	Усилие прокатк и (Р)	Ток (I)	Момент прокатк и (Мпр)
1-ая группа выкатываемости									
1,2- 2,0 мм;	4,6	4,2	3,3	5,1	5,0	4,3	5,1	4,5	3,5
2,1 - 4,0 мм	4,7	4,3	3,4	5,2	5,0	4,5	5,3	4,9	3,7
4,1-8,0 мм	5,8	5,0	4,5	5,0	4,7	4,0	5,7	4,7	4,0
свыше 8 мм	4,0	4,1	3,8	5,1	4,9	4,8	5,0	4,3	3,9
2-ая группа выкатываемости									
1,2- 2,0 мм;	4,0	4,0	3,1	5,7	4,6	3,9	5,0	4,8	3,5
2,1 - 4,0 мм	3,9	4,1	3,2	5,8	4,7	4,0	5,2	4,7	3,7
4,1-8,0 мм	4,9	4,0	4,0	5,7	5,6	5,0	5,9	4,0	3,2
свыше 8 мм	5,0	4,1	3,9	6,2	5,2	4,7	5,3	4,2	3,5
3-ая группа выкатываемости									
1,2- 2,0 мм;	4,3	3,6	3,2	6,5	5,2	4,0	6,2	4,9	4,5
2,1 - 4,0 мм	4,2	3,7	3,5	6,8	5,8	4,2	6,9	5,0	4,7
4,1-8,0 мм	4,9	4,0	3,6	5,5	4,8	4,0	6,2	5,0	4,5
свыше 8 мм	5,0	4,0	3,2	5,7	4,1	3,5	5,1	4,7	5,7
4-ая группа выкатываемости									
1,2- 2,0 мм;	6,8	5,7	4,5	4,4	3,8	3,6	5,6	4,5	3,0
2,1 - 4,0 мм	6,7	5,3	4,4	4,2	3,7	3,5	5,7	4,7	3,3
4,1-8,0 мм	7,8	6,0	5,5	4,9	4,0	3,6	5,3	4,9	4,2
свыше 8 мм	5,0	5,1	4,8	5,0	4,0	3,2	5,2	4,7	3,8

ГИ - 2465
06 АЕК 2011

СМК ТУ (4) - 15 - f

Начальнику ТУ	Г.В. Щурову
Начальнику ЦЛК	Б.А. Сарычеву
Начальнику ЛПЦ - 10	И.В. Казакову

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПИСЬМО

Срок действия с 06.12.2011 по 31.12.2012

С целью увеличения эффективности работы системы охлаждения рабочих валков 6-ой клетки стана 2000 г.п.

ПРЕДЛАГАЮ:

1. Начальнику ЛПЦ - 10 И.В. Казакову, отключить коллектор для подачи охладителя на верхний опорный валок
2. Начальнику ЛПЦ - 10 И.В. Казакову, начальнику ЦЛК Б.А. Сарычеву контролировать состояние валков - температуру, наличие поверхностных дефектов, износ, съемы.

Главный инженер ОАО «ММК»

С.Н. Ушаков

СОГЛАСОВАНО:

Начальник ТУ

Г.В. Щуров

Начальник ЦЛК

Б.А. Сарычев

Начальник ЛПЦ - 10

И.В. Казаков

Ведущий специалист по стандартизации
и сертификации продукции ТГ ТУ

А.В. Логинов

РАЗРАБОТЧИК:

ГОУ ВПО «МГТУ им Г.И. Носова»
первый проректор, д.т.н., проф.

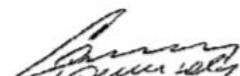
С.И. Платов

к.т.н. доц.

Р.Р. Дёма

ОАО «ММК» ЦЛК
Начальник лаборатории по
контролю прокатных валков

И.В. Боровков


2 12 11


2 12 2011


02.12.2011

528/18AK
05 АЕК 2011

ТД - 0471 11 НОЯ 2015

СМК №(6)15-3

Начальнику НТЦ Д.В. Куряеву
Начальнику ЛПЦ-10 В.В. Антоныку

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПИСЬМО

Срок действия с 11 НОЯ 2015 до 31.12.2016 г.

С целью оценки эффективности применения усовершенствованной системы охлаждения рабочих валков клетей №№4,5 стана 2000 г. пр., в рамках выполнения опытно-конструкторской работы по договору №221549 от 16.04.2014 г., между ОАО «ММК» и ФГБОУ ВПО «МГТУ»

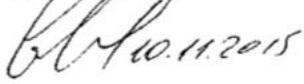
ПРЕДЛАГАЮ:

1 Начальнику ЛПЦ-10 В.В. Антоныку

Произвести настройку системы охлаждения непрерывной черновой группы клетей №№4,5 стана 2000 г. пр. согласно приложению А настоящего письма.

2 Начальнику ЛПЦ-10 В.В. Антоныку, начальнику НТЦ Д.В. Куряеву

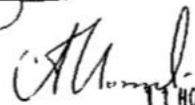
Провести мониторинг состояния поверхности, износа, температуры рабочих валков клетей №№4, 5 стана 2000 г. пр. с учетом работы новой системы охлаждения. При наличии замечаний вернуться к первоначальной конструкции.

Технический директор  11.11.2015 Г.В. Щуров

СОГЛАСОВАНО:

Начальник НТЦ  Д.В. Куряев

Начальник ЛПЦ-10  В.В. Антонык

Ведущий специалист бюро стандартизации и сертификации продукции ТГ  А.В. Логинов
11 НОЯ 2015

РАЗРАБОТЧИКИ:

ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова»  Р.Р. Дена 29-84-80
Доцент каф. МиТОД

Начальник ЛКПВ НТЦ  В.А. Мустафин 24-02-42
09.11.2015


Юрий Меремшин ЮВ
11.11.2015

ПРИЛОЖЕНИЕ А к ТД- 0771 от 11 ноя 2015

Таблица 1 - Характеристика системы охлаждения

Тип коллектора	Сварная полутруба
Количество коллекторов, шт.	4
Количество форсунок, 1/шт.	48
Тип форсунок проскофакельные, производитель Lechler типоразмер №664.964.30.00.00.0	49
Рабочая среда	Вода техническая чистая
Тонкость фильтрации, мкм	500
Рабочие давление воды на входе в коллектор, МПа	0,2-0,3
Рабочие давление на выходе из форсунок, МПа	0,4
Расход воды через коллектор, м ³ /час	147
Расход воды через одну форсунку при давлении 08 МПа, л/мин.	50
Температура воды, °С	+28 +42

Таблица 2 - Настройка системы охлаждения непрерывной черновой группы клетей №№4,5 стана 2000 г. пр.

Положение коллекторов		
	Охлаждение верхнего рабочего вала	Охлаждение нижнего рабочего вала
Клеть №4	координата X (относительно оси прокатки) - 500мм координата Y (относительно оси прокатных валков) - 800 мм. <i>Примечание: коллектор от проектного положения смещен вниз на 400 мм.</i> угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки 37...43 °.	координата X (относительно оси прокатки) без изменения координата Y (относительно оси прокатных валков) без изменения угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки на положительный угол 15...23°.
Клеть №5	координата X (относительно оси прокатки) - 400мм координата Y (относительно оси прокатных валков) - 700 мм. <i>Примечание: коллектор от проектного положения смещен вниз на 200 мм.</i> угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки 37...43 °.	координата X (относительно оси прокатки) без изменения координата Y (относительно оси прокатных валков) без изменения угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки на положительный угол 37...45°.
Положение форсунок		
Клеть №4	Угол перекрытия 15 град	Угол перекрытия 15 град
	Шаг между форсунками 80 мм	Шаг между форсунками 80 мм
Клеть №5	Угол форсунок 15 град	Угол перекрытия 15 град
	Шаг между форсунками 80 мм	Шаг между форсунками 80 мм

УТВЕРЖДАЮ 

И.о.главного прокатчика ОАО «ММК»

Казаков О.В.

« ____ » _____ 2011 г.

Акт

промышленных испытаний

усовершенствованной конструкции системы охлаждения прокатных валков на 6-ой клетки стана 2000 г/п.

(в рамках выполнения договора №181078 от 06.04.2010г.)

В рамках выполнения договора №181078 от 06.04.2010г. 06.09.2011 г. был произведен монтаж, и настройка и испытание усовершенствованной конструкции системы охлаждения прокатных валков на 6-ой клетки стана 2000 г/п. совместно с ЛПЦ-10 ОАО «ММК».

Усовершенствованная система охлаждения-включает коллектор новой конструкции разработанной ФГБОУ ВПО «МГТУ» с 48 плоскофакельными форсунками типа 664.964, разработанными фирмой «Спрейинг-Системс».

Проведенные испытания усовершенствованной системы охлаждения 6-ой клетки стана 2000 г.п. зафиксировали снижение температуры рабочих валков на 6..10⁰С (составила 69..74 ⁰С,) при прокатки монтажей 8000-10500 т, и на 4...6 ⁰С, (составила 70-74 ⁰С) при прокатке монтажей от 11000 до 23000т.

Отмечено снижение перепада температуры краев и в центре бочки валка, с 25..38 градусов до 18..25 градусов.

Температура верхнего опорного валка не изменилась и составляет 41...44⁰С, что соответствует требованиям (Г)ТИ-101-П-ГЛ10-384-2009.

Испытания усовершенствованной системы охлаждения не выявили наличие внешних дефектов на поверхностях валков (трещин, термических трещин, поверхностных и внутренних повреждений, механических повреждений, повреждений при прокатке). Визуальный осмотр показал, что внешних дефектов на поверхностях валков не наблюдается. Получение несоответствующей продукции по дефекту "вкатанная окалина" в ЛПЦ-5 на подкате с ЛПЦ-10 в 2011г: 07.09.11-15.09.11 – не зафиксировано.

Начальник ЛПЦ-10 

Зам начальника по технологиям ЛПЦ-10

И.В. Казаков

 А.В. Кузнецов

УТВЕРЖДАЮ
Начальник НТЦ ОАО «ММК»

Д.В. Куряев

« _____ » _____ 2015 г.



М.П.

Акт испытания

усовершенствованной системы охлаждения черновой группы клетей
(4,5) стана 2000 г.п. по договору № №221549 от 16.04.2014 г

Краткое описание выполненной работы

С целью повышения стойкости рабочих валков непрерывной черновой группы клетей (4,5) стана 2000 г.п. была разработана и изготовлена (силами Исполнителя), смонтирована и испытана (силами Заказчика) усовершенствованная система охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей.

Усовершенствованная система охлаждения включает в себя установку новых коллекторов с плоскофакельными форсунками на 4-ую и 5-ую клетки, на верхние и нижние рабочие валки стана 2000 г.п. в количестве 4 шт. Силами Исполнителя произведен шеф-монтаж оборудования и определено новое местоположения коллекторов: коллектор для охлаждения верхнего рабочего валка опущен вниз от проектного положения на 400 мм и повернут относительно вертикальной оси валка на отрицательный угол $37...43^{\circ}$. Коллектор для охлаждения нижнего рабочего валка от проектного положения повернут на положительный угол $15...23^{\circ}$.

Полученный результат

1. Непосредственно силами Заказчика произведены монтаж и настройка усовершенствованной системы охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей стана 2000 г.п., включающее в себя замену и настройку новых коллекторов на верхние и нижние рабочие валки 4-ой и 5-ой клетки.
2. В период с 27.12.2014 г. совместно с ЛПЦ-10. произведено испытание усовершенствованной системы охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей стана 2000 г.п. (4, 5 клетки). Анализ полученных результатов зафиксировал снижение температуры валков, который составил:
 - для 4-ой клетки в среднем на 12 % (с $60^{\circ}\text{C} \dots 66^{\circ}\text{C}$ до $56^{\circ}\text{C} \dots 59^{\circ}\text{C}$);
 - для 5-ой клетки в среднем на 18% (с $62^{\circ}\text{C} \dots 67^{\circ}\text{C}$ до $56^{\circ}\text{C} \dots 61^{\circ}\text{C}$).
3. Зафиксировано снижение съема рабочего слоя валка, которое в среднем составило для 4-ой клетки на 17 %, для 5-ой клетки на 19%.

4. Испытания усовершенствованной системы охлаждения не выявили наличие внешних дефектов на поверхностях валков (трещин, термических повреждений, поверхностных и внутренних повреждений, механических повреждений, повреждений при прокатке). Визуальный осмотр показал, что внешних дефектов на поверхностях валков не наблюдается.

5. Температура верхнего опорного и нижнего опорного валка не изменилась (составляет 41...44⁰С), что соответствует требованиям (Г)ТИ-101-П-ГЛ10-384-2009.

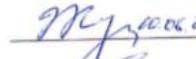
Дата фактического внедрения ___январь _____2015г.

Ответственный от цеха,
Зам. начальника ЛПЦ-10
по технологии



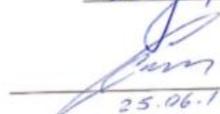
2.06.2015 А.Г. Федин

Главный прокатчик ОАО «ММК»



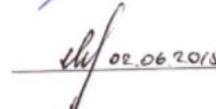
25.06.15 В.В. Селезнев

Главный специалист по
Прокатному производству



25.06.15 С.В. Денисов

Начальник лаборатории по
контролю прокатных валков



02.06.2015 В.А. Мустафин

Научный руководитель
к.т.н., доцент



01.06.15 Р.Р. Дема

вед. спец-т ЛПЦ-10 / Иванова В.Ю.



УТВЕРЖДАЮ
Начальник НТЦ



ОАО «ММК» Б.А. Сарычев

« ____ » _____ 2012 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов работ по договору № 181078 от 06.04.2010г.
по теме: Совершенствование системы охлаждения рабочих валков черновой группы клетей стана 2000 г.п.». Договор №181078 от 06.04.2010г.

Краткое описание выполненной работы

1. Произведен комплексный анализ существующей системы охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей стана 2000 г.п. ОАО «ММК» включающая в себя: коллектор для охлаждения верхнего опорного валка, коллектор для охлаждения верхнего рабочего валка коллектор для охлаждения нижнего рабочего валка. В результате проведенного анализа выявлен следующий недостаток: перегрев верхнего рабочего валка 6-ой клетки (температура составляет 80...85⁰С) вследствие неправильного распределения охладителя; нижний рабочий валок 6-ой к находится в удовлетворительном состоянии (67...70⁰С) что соответствует требованиям (Г)ТИ-101-П-ГЛ10-384-2009 «Подготовка, эксплуатация и учет стойкости прокатных валков стана 2000 горячей прокатки ЛПЦ-10». В результате проведенного анализа принято решение провести ряд мероприятий направленных на снижение температуры верхнего рабочего валка.
2. Для 6-ой клетки стана 2000 г.п., согласно технологическому письму ГИ-2044 от 06.10.2011, произведено перераспределение охладителя с коллектора охлаждения верхнего опорного валка на систему охлаждения верхнего и нижнего рабочего валка
3. Для системы охлаждения рабочих валков 6-ой клетки стана 2000 г.п., с целью снижения температуры верхнего рабочего валка, спроектирован и изготовлен коллектор новой конструкции с 48 плоскофакельными форсунками типа 664.964 разработанными фирмой «Леклер». Определено наиболее рациональное место расположение коллектора новой конструкции в клетки. Коллектор смещен вниз на 200 мм, в сторону оси прокатки на 70 мм, установлен угол наклона форсунок к оси валка 15⁰, а самого коллектора по отношению к оси прокатки 50⁰.

4. Согласно технологическому письму ГИ-2765 от 06.12.2011. произведено полное отключение коллектора для охлаждения верхнего опорного валка, а весь объем охладителя перераспределен в систему охлаждения верхнего и нижнего рабочего валка.

Полученный результат

Внедрение результатов по совершенствованию системы охлаждения рабочих валков для 6-ой клетки стана 2000 г.п. позволило снизить температуру верхних рабочих валков на 5...15⁰С (с 75...85⁰С до 70⁰, при межперевалочном периоде 8000-10500 т.), и на 2...6⁰С, (с 72...76⁰С до 70⁰С, при межперевалочном периоде 11000 – 23000т.), что соответствует требованиям (Г)ТИ-101-П-ГЛ10-384-2009.

Отмечено снижение перепада температуры по длине бочки верхнего рабочего валка, с 25...38⁰С до 18...25⁰С, что привело к снижению уровня термонапряжений в контактном слое.

Зафиксировано снижение температуры нижнего рабочего валка на 2...3⁰С которая составляет 65...68⁰С., что соответствует требованиям (Г)ТИ-101-П-ГЛ10-384-2009.

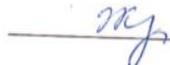
Температура верхнего опорного и нижнего опорного валка не изменилась (составляет 41...44⁰С), что соответствует требованиям (Г)ТИ-101-П-ГЛ10-384-2009.

Расчет фактического экономического эффекта будет представлен 01.11.2012 г

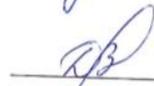
Дата фактического внедрения _____ 2011г.

Срок полезного использования - _____ года

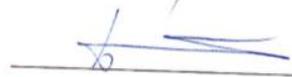
Начальник ЛПЦ-10

 И.В. Казаков

И.о. зам. начальника ЛПЦ-10
по технологии

 Д.А.Захарьин

Научный руководитель
д.т.н., профессор

 С.И. Платов

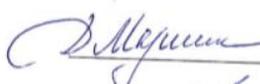
Согласовано:

И.о. главного прокатчика ОАО «ММК»  О.В. Казаков.

И.о. начальника ЦЛК 
2.02.2012 С.В. Денисов

И.о. начальник лаборатории по контролю прокатных валков  В.А. Мустафин

от ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова»
к.т.н., доцент каф. МиТОД  Р.Р. Дема

Инженер  Д.Н. Мазнин

Аспирант каф. МиТОД  М.В. Харченко

Аспирант каф. МиТОД  Р.Н. Амиров


01.02.2012

УТВЕРЖДАЮ
Начальник НТЦ ОАО «ММК»
Д.В. Куряев
«17» _____ 2015 г.
М.П.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов работ по договору №221549 от 16.04.2014 г.,
по теме « **Разработка и внедрение мероприятий с целью
повышения стойкости рабочих валков непрерывной черновой
группы клетей (4,5) стана 2000 г.п. путем совершенствования
системы охлаждения»**

Краткое описание выполненной работы

С целью повышения стойкости рабочих валков непрерывной черновой группы клетей (4,5) стана 2000 г.п. была разработана и изготовлена (силами Исполнителя), смонтирована и испытана (силами Заказчика) усовершенствованная система охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей.

Усовершенствованная система охлаждения включает в себя новые коллектора с 49-ю плоскофакельными форсунками на 4-ую и 5-ую клетки, на верхние и нижние рабочие валки стана 2000 г.п. в количестве 4 шт. Силами Исполнителя определено новое местоположения коллекторов. Выпущено технологическое письмо (ТД 0771 от 11.11.2015 г.), регламентирующее эксплуатацию усовершенствованной системы охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей стана 2000 г.п.

Полученный результат

1. Произведено внедрение усовершенствованной системы охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей стана 2000 г.п. (4,5 клетки).
2. Зафиксировано снижение температуры валков: для 4-ой клетки в среднем на 15% (что составляет 8⁰С), для 5-ой клетки в среднем на 16% (что составляет 6⁰С). Средняя температура валков составляет: для 4-ой клетки 45⁰С, для 5-ой клетки 50⁰С.
3. Зафиксировано снижение перепада температуры у краев и в центре бочки валка, которое составило с 10..15⁰С до 8..12⁰С. Снижение перепада приводит к сохранению теплового профиля валка и снижению уровня термонапряжений в контактном слое.
4. За счет стабилизации температурного режима прокатных валков зафиксировано уменьшение величины съема валков при их последующей перешлифовке для клетки №4 на 13,91%, для клетки №5 на 9,72%.

5. Температура верхнего опорного вала составляет 48...52⁰С, что соответствует требованиям (Г)ТИ-101-П-ГЛ10-384.
6. Испытания усовершенствованной системы охлаждения не выявили наличие внешних дефектов на поверхностях валков (трещин, термических трещин, поверхностных и внутренних повреждений, механических повреждений, повреждений при прокатке). Визуальный осмотр показал, что внешних дефектов на поверхностях валков не наблюдается.

Расчет фактического экономического эффекта будет представлен 01.11.2016 г.

Дата фактического внедрения: 10.11.2015г.

Срок полезного использования - 2 года

Начальник ЛПЦ-10



V.V. Антонюк

Зам. начальника ЛПЦ-10
по технологии



A.G. Федин

Научный руководитель
к.т.н., доцент



R.P. Дема

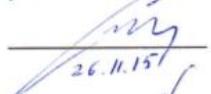
Согласованно

Главный прокатчик ОАО «ММК»



I.V. Селезнев

Главный специалист (по
прокатному производству) НТЦ



26.11.15

S.V. Денисов

Начальник лаборатории по
контролю прокатных валков



19/11/2015

V.A. Мустафин


Р.Р. Дема
10.11.2015г.


В.А. Мустафин

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ЛПЦ-10

ОАО «ММК» В.В. Антонюк

« _____ » _____ 2015 г.



Акт испытания

**усовершенствованной системы охлаждения черновой группы клетей
(4,5) стана 2000 г.п. по договору № №221549 от 16.04.2014 г**

Краткое описание выполненной работы

С целью повышения стойкости рабочих валков непрерывной черновой группы клетей (4,5) стана 2000 г.п. была разработана и изготовлена (силами Исполнителя), смонтирована и испытана (силами Заказчика) усовершенствованная система охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей.

Усовершенствованная система охлаждения включает в себя установку новых коллекторов с плоскофакельными форсунками на 4-ую и 5-ую клетки, на верхние и нижние рабочие валки стана 2000 г.п. в количестве 4 шт. Силами Исполнителя определено новое местоположения коллекторов: коллектор для охлаждения верхнего рабочего валка опущен вниз от проектного положения на 400 мм и повернут относительно вертикальной оси валка на отрицательный угол $37...43^{\circ}$. Коллектор для охлаждения нижнего рабочего валка от проектного положения повернут на положительный угол $15...23^{\circ}$.

Полученный результат

1. В период с 01.01.2015 г. совместно с ЛПЦ-10 произведено испытание усовершенствованной системы охлаждения рабочих валков непрерывной черновой группы клетей стана 2000 г.п. (4, 5 клетки). Анализ полученных результатов зафиксировал среднее снижение температуры валков по 4-ой клетки в среднем на 12 %, по 5-ой клетки в среднем на 18%.

2. Зафиксировано снижение перепада температуры у краев и в центре бочки валка. До реконструкции перепад температур составлял 25..38 градусов, после проведение реконструкции составляет 18..25 градусов.

3. Снижение перепада приводит к сохранению теплового профиля валка и снижению уровня термонапряжений в контактном слое.

221549
ММК СМК УЭ (2)-6-0 2017

РАСЧЕТ
годового экономического эффекта
(от проектов технического перевооружения, энергоэффективных проектов, организационно-технических мероприятий, НИОКР)
Разработка и внедрение мероприятий с целью повышения стойкости рабочих валков непрерывной черновой группы клетей (4,5) стана 2000 г.п. путем совершенствования системы охлаждения

Регистрационный № 221549 от 16.04.2014г.
Используется с 10.11.2015г на клетях №№ 4,5 стана 2000 г.п. ЛПЦ-10
Расчет годового экономического эффекта производится за период с 01.01.2017г. по 31.12.2017г. за 2 год использования (базовый период с 01.01.2015г. по 31.12.2015г.)

Исходные данные для расчета:

№ пп.	Показатели	Ед. измер.	До внедрения	После внедрения	Дополнительная прибыль, тыс.руб.
1	Дополнительная прибыль от снижения расхода валков	тыс.руб.			1 867,0
1.1	цена валков в расчетном периоде	руб./натур.ед		6 626 813	
1.2	стойкость валков в базовом и расчетном периодах	т/валок	1 862 043	1 914 504	
1.3	количество комплектов. Комплект состоит из 2-х валков.	шт		5	
2	Текущие затраты	тыс.руб.		1 150,1	
2.2	количество переточек в базовом и расчетном периодах	шт./валок	105	107	
2.3	цена услуг по переточке в расчетном периоде	руб./валок		6 144	
2.4	Амортизация	тыс.руб.		1 150	
3	Прибыль от реализации НИОКР	тыс.руб.			717,0
4	Налог на имущество	тыс.руб.			
5	Налог на прибыль	тыс.руб.		143,4	
6	Амортизация	тыс.руб.		1 150	
7	Затраты по договору на выполнение НИОКР сторонними организациями	тыс.руб.		2 300	
8	срок полезного использования результатов НИОКР	лет		2	

Итоговый экономический эффект составляет семьсот шестнадцать тысяч девятьсот шестьдесят девять рублей 62 копейки (716969 руб.)

Старший менеджер ОПЭ ГЭПЦ ПАО «ММК»

Главный специалист группы по развитию НТЦ ПАО «ММК»

Начальник ЛПЦ-10 ПАО «ММК»

Заместитель начальника ЛПЦ-10 ПАО «ММК»

Экономист ГЭПЦ ПАО «ММК»

Научный руководитель проекта
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова»

Т.А.Волкова
(подпись, И.О.Ф., дата)
07.11.2017

С.В.Денисов
(подпись, И.О.Ф., дата)

Д.А.Захарьин
(подпись, И.О.Ф., дата)

А.Г.Федин
(подпись, И.О.Ф., дата)

А.А.Петренко
(подпись, И.О.Ф., дата)

Р.Р.Дема
(подпись, И.О.Ф., дата)

№ 1549
№ 16
ММК СМК УЭ (2)-6-0

РАСЧЕТ
годового экономического эффекта
(от проектов технического перевооружения, энергоэффективных проектов, организационно-технических мероприятий, НОИКР)

Разработка и внедрение мероприятий с целью повышения стойкости рабочих валков непрерывной черновой группы клетей (4,5) стана 2000 г.п. путем совершенствования системы охлаждения

Регистрационный № 221549 от 16.04.2014г.
Используется с 10.11.2015г на клетях №№ 4,5 стана 2000 г.п. ЛПЦ-10
Расчет годового экономического эффекта производится за период с 01.01.2016г. по 31.12.2016г. за 1 год использования (базовый период с 01.01.2015г. по 31.12.2015г.)

Исходные данные для расчета:

№ пп.	Показатели	Ед. измер.	До внедрения	После внедрения	Дополнительная прибыль, тыс.руб.
1	Дополнительная прибыль от снижения расхода валков	тыс.руб.			1 816,5
1.1	цена валков в расчетном периоде	руб./натур.ед		6 974 480	
1.2	стойкость валков в базовом и расчетном периодах	т/валок	1 862 043	1 910 540	
1.3	количество комплектов. Комплект состоит из 2-х валков.	шт		5	
2	Текущие затраты	тыс.руб.		1 150,1	
2.2	количество переточек в базовом и расчетном периодах	шт./валок	105	108	
2.3	цена услуг по переточке в расчетном периоде	руб./валок		5 887	
2.4	Амортизация	тыс.руб.		1 150	
3	Прибыль от реализации НОИКР	тыс.руб.			666,4
4	Налог на имущество	тыс.руб.			
5	Налог на прибыль	тыс.руб.		133,3	
6	Амортизация	тыс.руб.		1 150	
7	Затраты по договору на выполнение НОИКР сторонними организациями	тыс.руб.		2 300	
8	срок полезного использования результатов НОИКР	лет		2	
9	Чистый денежный поток	тыс.руб.			1 683,1
10	Простой срок окупаемости	лет			1,4

Итоговый экономический эффект составляет шестьсот шестьдесят шесть тысяч четыреста восемнадцать рублей 29 копеек (666418 руб.)

Старший менеджер ОПЭ ГЭПЦ ПАО «ММК»

Главный специалист группы по развитию НТЦ ПАО «ММК»

Начальник ЛПЦ-10 ПАО «ММК»

Заместитель начальника ЛПЦ-10 ПАО «ММК»

Экономист ГЭПЦ ПАО «ММК»

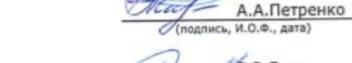
Научный руководитель проекта
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова»


 Т.А. Волкова
 (подпись, И.О.Ф., дата)


 С.В. Денисов
 (подпись, И.О.Ф., дата)


 Д.А. Эвхарьин
 (подпись, И.О.Ф., дата)


 А.Г. Федин
 (подпись, И.О.Ф., дата)


 А.А. Петренко
 (подпись, И.О.Ф., дата)


 Р.Р. Дема
 (подпись, И.О.Ф., дата)

181078
ММК СМК УЭ (2)-6-0-2014

РАСЧЕТ
годового экономического эффекта
(от проектов технического перевооружения, энергоэффективных проектов, организационно-технических мероприятий, НИОКР)

Совершенствование системы охлаждения рабочих валков черновой группы клетей стана 2000 г/п

Регистрационный №181078 от 06.04.2010г.

Используется с 21.02.2012 г на участке стана 2000 г.п. цеха ЛПЦ-10 прокатная клеть № 6

Расчет годового экономического эффекта производится за период с 01.01.2014г. по 31.12.2014г. за 3 год использования (базовый период с 01.01.2011г. по 31.12.2011г.)

Исходные данные для расчета:

№ пп.	Показатели	Ед. измер.	До внедрения	После внедрения	Дополнительная прибыль, тыс.руб.
1	Дополнительная прибыль от снижения расхода валков	тыс.руб.			1 122,6
1.1	цена валков в расчетном периоде	руб./натур.ед		4 400 947	
1.2	стойкость валков в базовом и расчетном периодах	т/валок	1 812 506	1 858 741	
1.3	количество комплектов. Комплект состоит из 2-х валков.	шт		5	
2	Текущие затраты	тыс.руб.		272,7	
2.2	количество переточек в базовом и расчетном периодах	шт./валок	103	105	
2.3	цена услуг по переточке в расчетном периоде	руб./валок		4 774	
2.4	Амортизация	тыс.руб.		225	
3	Прибыль от реализации НИОКР	тыс.руб.			849,9
4	Налог на имущество	тыс.руб.			
5	Налог на прибыль	тыс.руб.		170,0	
6	Амортизация	тыс.руб.		225	
7	Затраты по договору на выполнение НИОКР сторонними организациями	тыс.руб.		900,0	
8	срок полезного использования результатов НИОКР	лет		4	

Итоговый экономический эффект составляет восемьсот сорок девять тысяч восемьсот девяносто один рубль 87 копеек (849891 руб.)

Старший менеджер ОПЭ ГЭПЦ ПАО «ММК»

Главный специалист группы по развитию НТЦ ПАО «ММК»

Начальник ЛПЦ-10 ПАО «ММК»

Заместитель начальника ЛПЦ-10 ПАО «ММК»

Экономист ГЭПЦ ПАО «ММК»

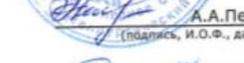
Научный руководитель проекта
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова»


 Т.А. Волкова
 (подпись, И.О.Ф., дата)


 С.В. Денисов
 (подпись, И.О.Ф., дата)


 Д.А. Захарьин
 (подпись, И.О.Ф., дата)


 А.Г. Федин
 (подпись, И.О.Ф., дата)


 А.А. Петренко
 (подпись, И.О.Ф., дата)


 Р.Р. Дема
 (подпись, И.О.Ф., дата)

181078
ММК СМК УЭ (2)-6-010152

РАСЧЕТ
годового экономического эффекта
(от проектов технического перевооружения, энергоэффективных проектов, организационно-технических мероприятий, НОИКР)

Совершенствование системы охлаждения рабочих валков черновой группы клетей стана 2000 г/п

Регистрационный №181078 от 06.04.2010г.

Используется с 21.02.2012 г на участке стана 2000 г.п. цеха ЛПЦ-10 прокатная клеть № 6

Расчет годового экономического эффекта производится за период с 01.01.2015г. по 31.12.2015г. за 4 год использования (базовый период с 01.01.2011г. по 31.12.2011г.)

Исходные данные для расчета:

№ пп.	Показатели	Ед. измер.	До внедрения	После внедрения	Дополнительная прибыль, тыс.руб.
1	Дополнительная прибыль от снижения расхода валков	тыс.руб.			1 222,3
1.1	цена валков в расчетном периоде	руб./натур.ед		4 472 133	
1.2	стойкость валков в базовом и расчетном периодах	т/валок	1 812 506	1 862 043	
1.3	количество комплектов. Комплект состоит из 2-х валков.	шт		5	
2	Текущие затраты	тыс.руб.		281,4	
2.2	количество переточек в базовом и расчетном периодах	шт./валок	103	105	
2.3	цена услуг по переточке в расчетном периоде	руб./валок		5 638	
2.4	Амортизация	тыс.руб.		225	
3	Прибыль от реализации НОИКР	тыс.руб.			940,9
4	Налог на имущество	тыс.руб.			
5	Налог на прибыль	тыс.руб.		188,2	
6	Амортизация	тыс.руб.		225	
7	Затраты по договору на выполнение НОИКР сторонними организациями	тыс.руб.		900,0	
8	срок полезного использования результатов НОИКР	лет		4	

Итоговый экономический эффект составляет девятьсот сорок тысяч восемьсот восемьдесят пять рублей 79 копеек (940885 руб.)

Старший менеджер ОПЭ ГЭПЦ ПАО «ММК»

Главный специалист группы по развитию НТЦ ПАО «ММК»

Начальник ЛПЦ-10 ПАО «ММК»

Заместитель начальника ЛПЦ-10 ПАО «ММК»

Экономист ГЭПЦ ПАО «ММК»

Научный руководитель проекта
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова»



Т.А. Волкова
(подпись, И.О.Ф., дата)

С.В. Денисов
(подпись, И.О.Ф., дата)

Д.А. Захарьин
(подпись, И.О.Ф., дата)

А.Г. Федин
(подпись, И.О.Ф., дата)

А.А. Петренко
(подпись, И.О.Ф., дата)

Р.Р. Дема
(подпись, И.О.Ф., дата)



**МАГНИТОГОРСКИЙ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ
КОМБИНАТ**

Открытое акционерное общество
«Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»)
Ул. Кирова, 93, г. Магнитогорск, Челябинская область, 455000г.
24-41-66, ф. 24-80-16

ЛИСТОПРОКАТНЫЙ ЦЕХ № 10

Справка по величине съема прокатных валков 1180x2000

для мониторинга эффекта по НИОКР:

- 1) «Совершенствование системы охлаждения рабочих валков черновой группы клетей стана 2000 г/п»;
- 2) «Разработка и внедрение мероприятий с целью повышения стойкости рабочих валков непрерывной черновой группы клетей (4,5) стана 2000 г.п. путем совершенствования системы охлаждения».

Величина съема прокатных валков 4-6-ой клетей черновой группы стана 2000 г.п.
ОАО «ММК» на период 2011 г.-2013 г.

Материал валков	Величина съема валков , мм	Период
ASI80X(сталь) (GP), Германия	0,95..2,4 мм (до монтажа коллектора)	01.01.2011 г.- 31.12.2011 г
ASI80X(сталь) (GP), Германия	0,74..1,6 мм (после монтажа коллектора)	01.01.2012 г.- 31.12.2012 г
ASI80X(сталь) (GP), Германия	0,9....1,6 мм (после монтажа коллектора)	01.01.2013 г.- 31.12.2013 г
ASI80X(сталь) (GP), Германия	1,26....1,5 мм (после монтажа коллектора)	01.01.2014 г.- 31.12.2014 г
ASI80X(сталь) (GP), Германия	0,99....1,3 мм (после монтажа коллектора)	01.01.2015 г.- 31.12.2015 г
ASI80X(сталь) (GP), Германия	0,68....1,3 мм (после монтажа коллектора)	01.01.2016 г.- 31.12.2016 г
ASI80X(сталь) (GP), Германия	0,7....1,3 мм (после монтажа коллектора)	01.01.2017 г.- 31.12.2017г

Ведущий специалист ЛПЦ-10



Калужских А.В.

Справка по стойкости прокатных валков 1180x2000

для мониторинга эффекта по НИОКР :

"Совершенствование системы охлаждения рабочих валков черновой группы клетей стана 2000 г/п"

"Разработка и внедрение мероприятий с целью повышения стойкости рабочих валков непрерывной черновой группы клетей (4,5) стана 2000 г.п. путем совершенствования системы охлаждения"

Период	Клеть	Размер бочки	Поставщик	Марка валков	Кол-во пар в эксплуатации	Средний показатель на 1 валок (по износу)	
						Стойкость, т/в	Кол-во установок в клеть, шт
2011	2- 6	1180x2000	GONTERMANN-PEIPERS	ASI80X	5	1 812 506	103
2012	2- 6	1180x2000	GONTERMANN-PEIPERS	ASI80X	5	1 845 093	104
2013	2- 6	1180x2000	GONTERMANN-PEIPERS	ASI80X	5	1 846 405	104
2014	2- 6	1180x2000	GONTERMANN-PEIPERS	ASI80X	5	1 858 741	105
2015	2- 6	1180x2000	GONTERMANN-PEIPERS	ASI80X	5	1 862 043	105
2016	2- 6	1180x2000	GONTERMANN-PEIPERS	ASI80X	5	1 910 540	108
2017	2- 6	1180x2000	GONTERMANN-PEIPERS	ASI80X	5	1 914 504	107

Ведущий специалист ЛПЦ-10

Заместитель начальника ЛПЦ-10 по технологии

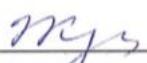
Ведущий специалист по контролю прокатных валков



 Д.А. Якунин
 А.Г. Федин
 В.А. Мустафин

УТВЕРЖДАЮ

Главный прокатчик ОАО «ММК»

 И.В. Селезнев

« 6 » 01. 2016г.

АКТ

**передачи научно – технической продукции в ОАО
«Магнитогорский металлургический комбинат» по результатам
диссертационной работы Дема Р.Р.**

Краткое описание выполненной работы

С целью повышения стойкости рабочих валков непрерывной черновой группы клетей (№№4-6) и непрерывной чистовой группы клетей стана (№№7-13) стана 2000 г.п. разработан методологический подход для настройки системы охлаждения. Результаты расчетов по настройке системы охлаждения приведены в таблице 1.

Полученный результат

1. В период с 01.01.2015 г. совместно с ЛПЦ-10 произведена настройка системы охлаждения рабочих валков непрерывной черновой и чистовой группы клетей стана 2000 г.п. Результаты исследований приведены в таблице 2.

2. Зафиксировано снижение температуры рабочих валков которое составило в среднем на **8...10** градусов в черновой группе клетей (№№4-6) и **6..10** градусов чистовой группы клетей стана (№№7-13) стана 2000 г.п.

3. Зафиксировано снижение перепада температуры у краев и в центре бочки валка которое составило с 10..15 градусов до 8..12 градусов.

4. Зафиксировано, уменьшение величины съема валков при их последующей перешлифовке: для черновой группы клетей (№№4-6) в среднем на **13,91 %**, для чистовой группы клетей (№№7-13) в среднем на **5,3%**.

Начальник ЛПЦ – 10



В.В. Антонюк

Зам. начальника ЛПЦ-10
по технологии

А.Г. Федин

Исполнитель:

ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова»
к.т.н., доцент каф МитОД



Р.Р. Дема

Таблица 1 .Настройка системы охлаждения непрерывной черновой группы клетей (№№4-6) и непрерывной чистой группы клетей стана (№№7-13) стана 2000 г.п.

Положение рабочих валков валька	Положение коллектора			Тип коллектора			Рядность	Угол перекрытия, град	Шаг между форсунками/рядами, мм	Расход воды через коллектор, м ³ /ч, при давлении охлаждения не менее 08 МПа	Тип форсунок
	Относительные координаты (X), мм	Относительные координаты (Y), мм	Угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки (положительный угол)	Количество форсунок	Клеть №	Угол перекрытия, град					
Непрерывная черновая группа клетей											
Верхний	Кл.4: 500	Кл.4: 800	37...43°	Верхний ряд 24	2	15	80/100	Клеть №4,5,6 860	Верхний ряд прософакельные, Lechleg типоразмер №664.964.30		
	Кл.5: 500 Кл.6: 500	Кл.5: 700 Кл.6: 600		Нижний ряд 24					Нижний ряд прософакельные, Lechleg типоразмер №664.964.30		
Нижний	Кл.4: 500	Кл.4: -400	15...23°	Верхний ряд 24	2	15	80/100	Клеть №4,5,6 840	Верхний ряд прософакельные, Lechleg типоразмер №664.964.30		
	Кл.5: 500 Кл.6: 500	Кл.5: -400 Кл.6: -400		Нижний ряд 24					Нижний ряд прософакельные, Lechleg типоразмер №664.964.30		
Непрерывная чистовая группа клетей											
Верхний	Кл.7:-600	Кл.7:730	20	Верхний ряд 32	2	60	60/110	Клеть №7-1270	Верхний ряд прософакельные, Lechleg типоразмер №665.014.		
	Кл.8:-600 Кл.9:-580 Кл.10:-580	Кл.8: 730 Кл.9:710 Кл.10:710		Нижний ряд 31				Клеть №8-1270 Клеть №9-1126	Нижний ряд прософакельные, Lechleg типоразмер №665.964		
Нижний	Кл.7:-600	Кл.7:-730	65	Верхний ряд 31	2	60	60/110	Клеть №10-976 Клеть №9-746	Верхний ряд прософакельные, Lechleg типоразмер №664.964.		
	Кл.8:-600 Кл.9:-580 Кл.10:-580	Кл.8: -730 Кл.9:-710 Кл.10:-710		Нижний ряд 32					Нижний ряд прософакельные, Lechleg типоразмер №665.014		
Выходная сторона	Кл.7:600	Кл.7:730	20	Верхний ряд 32	3	60	60/110		Верхний ряд прософакельные, Lechleg типоразмер №664.964.		
	Кл.8:600 Кл.9:580	Кл.8: 730 Кл.9:710		Средний ряд					Средний ряд прософакельные,		

	Кл.10:-580	Кл.10:710		31 Нижний ряд					Lechler типоразмер№654.044 Нижний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер№665.084	
Нижний	Кл.7:-600 Кл.8:-600 Кл.9:-580 Кл.10:-580	Кл.7:-420 Кл.8:-420 Кл.9:-410 Кл.10:-410	0	32 Верхний ряд 32 Средний ряд 31 Нижний ряд	3	60	60/110		Верхний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер №665.084. Средний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер№665.014 Нижний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер№664.964	
	Клеть № 11,12,13									
Верхний	Кл.11:-570 Кл.12:-570 Кл.13:-560	Кл.11:710 Кл.12: 700 Кл.13:700	20	32 Верхний ряд 31 Нижний ряд	2	60	60/110	Клеть №11- 860 Клеть №12- 860 Клеть №13- 746	Верхний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер №669.284. Нижний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер №6695.283	
Нижний	Кл.11:-580 Кл.12:-570 Кл.13:-570	Кл.11:-710 Кл.12:-700 Кл.13:-700	65	31 Верхний ряд 32 Нижний ряд	2	60	60/110		Верхний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер №669.284. Нижний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер №6695.283	
Верхний	Кл.11:570 Кл.12:570 Кл.13:560	Кл.11:710 Кл.12: 700 Кл.13:700	20	32 Верхний ряд 32 Нижний ряд	2	60	60/110		Верхний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер №669.284. Нижний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер №6695.283	
Нижний	Кл.11:-570 Кл.12:-570 Кл.13:-560	Кл.11:-410 Кл.12:-400 Кл.13:-400	0	32 Верхний ряд 32 Нижний ряд	2	60	60/110		Верхний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер №669.284. Нижний ряд проскофакельные, Lechler типоразмер №6695.283	
Входная сторона										
Выходная сторона										



В.В. АНТОНЮК

Начальник ЛПЦ – 10

Таблица 2 Снижение температуры и съема рабочих валков непрерывной черновой и чистовой группы клетей стана 2000 после настройки системы охлаждения

Номер клетки	Температура до внедрения, град	Температура после внедрения, град	Среднее значение падения температуры, град/%	Среднее значение уменьшение съема, %
Черновая группа клетей				
4	53	45	8 (15)	13,91
5	56	50	6(16)	9,72
6	62	52	10 (18)	12,2
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
Примечание Величина съема до внедрения, составляла 0,6...0,9 мм. Величина съема после внедрения, составила 0,5...0,8мм.				

Начальник ЛПЦ-10



В.В. Антонюк

ТД-0565 от 12.09.2018

ММК СМК НТЦ (61)-15-5

Главному специалисту НТЦ
Начальнику ЛПЦ-10

Е.В. Брайчеву
Д.А. Захарьину

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПИСЬМО

Срок действия с 12.09.2018 г. до 31 декабря 2019 г.

С целью повышения эффективности работы системы охлаждения валков чистой группы клетей №№7-13 стана 2000 г.п. (договор № 232152 от 02.06.2017 г. между ПАО «ММК» и ФГБОУ ВО «МГТУ»)

ПРЕДЛАГАЮ:

1. Начальнику ЛПЦ-10 Д.А. Захарьину провести настройку системы охлаждения чистой группы клетей №№7-13 согласно приложению А настоящего письма;
 - 1.1 прокатку металла на стане 2000 г.п. осуществлять в соответствии с действующими НД.
2. Начальнику ЛПЦ-10 Д.А. Захарьину, главному специалисту НТЦ Е.В. Брайчеву:
 - 2.1 проводить замеры и учет износа, съёмов при перешлифовках и стойкости рабочих валков клетей №№7 - 13 стана 2000 г.п.;
 - 2.2 проводить оценку состояния поверхности и замеры температуры рабочих валков клетей № 7-13 во время перевалок.
4. ФГБОУ ВО «МГТУ» Р.Р. Дема, оценить эффективность предлагаемых мероприятий на стане 2000 г.п. ПАО «ММК» и при необходимости вносить оперативные корректировки в предложенные мероприятия.

И.о. начальника технического департамента



Е.В. Брайчев

СОГЛАСОВАНО:

Главный специалист группы
по прокатному производству НТЦ



Е.В. Брайчев

Начальник ЛПЦ-10



Д.А. Захарьин

Ведущий специалист ТГ НТЦ



А.В. Логинов

РАЗРАБОТЧИК:

ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова»
Доцент каф. «МитОДИМ»



Р.Р. Дема

Профессор каф. «МитОДИМ»



С.И. Платов




ПРИЛОЖЕНИЕ А к ТД-1665 от 12.09.18

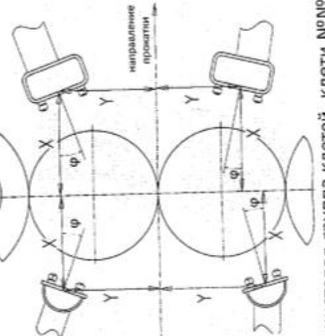
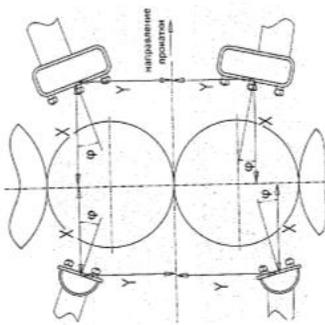
Система охлаждения непрерывной чистовой группы клеток №№7-13 стана 2000 г.п.

Положение рабочих валков вала	Положение коллектора			Тип коллектора						Тип форсунок
	Расстояние Х, мм	Расстояние Y, мм	Угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки φ, град	Угол перекрестия, град	Рядность	Шаг между форсунками/рядами, мм	Максимальный расход воды через коллектор, м³/ч, при давлении охлаждающей воды не менее 0,8 МПа	10		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Входная сторона	Верхний	Кл.7: 600 Кл.8: 600 Кл.9: 580 Кл.10: 580	Кл.7: 730 Кл.8: 730 Кл.9: 710 Кл.10: 710	20	Верхний ряд 32 Нижний ряд 31	2	60	60/110	Верхний ряд плоскоструйные, Lechler типоразмер № 665.014. Нижний ряд плоскоструйные, Lechler типоразмер № 665.964.	
	Нижний	Кл.7: 600 Кл.8: 600 Кл.9: 580 Кл.10: 580	Кл.7: 730 Кл.8: 730 Кл.9: 710 Кл.10: 710	65	Верхний ряд 31 Нижний ряд 32	2	60	60/110	Верхний ряд плоскоструйные, Lechler типоразмер № 664.964. Нижний ряд плоскоструйные, Lechler типоразмер № 665.014.	
Выходная сторона	Верхний	Кл.7: 600 Кл.8: 600 Кл.9: 580 Кл.10: 580	Кл.7: 730 Кл.8: 730 Кл.9: 710 Кл.10: 710	20	Верхний ряд 32 Средний ряд 31 Нижний ряд 32	3	60	60/110	Верхний ряд плоскоструйные, Lechler типоразмер № 664.964. Средний ряд плоскоструйные, Lechler типоразмер № 654.044. Нижний ряд плоскоструйные, Lechler типоразмер № 665.084.	
	Нижний	Кл.7: 600 Кл.8: 600 Кл.9: 580 Кл.10: 580	Кл.7: 420 Кл.8: 420 Кл.9: 410 Кл.10: 410	0	Верхний ряд 32 Средний ряд 31 Нижний ряд 32	3	60	60/110	Верхний ряд плоскоструйные, Lechler типоразмер №665.084. Средний ряд плоскоструйные, Lechler типоразмер № 665.014. Нижний ряд плоскоструйные, Lechler типоразмер № 664.964.	

Непрерывная чистовая группа клетей №№ 11,12,13									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Входная сторона	Верхний	Кл.11: 570 Кл.12: 570 Кл.13: 560	Кл.11: 710 Кл.12: 700 Кл.13: 700	20	Верхний ряд 32 Нижний ряд 31	2	60	60/110	Верхний ряд плоскоструйные, Leschig типоразмер № 669.284. Нижний ряд плоскоструйные, Leschig типоразмер № 669.283. Верхний ряд плоскоструйные, Leschig типоразмер № 669.284. Нижний ряд плоскоструйные, Leschig типоразмер № 669.283. Верхний ряд плоскоструйные, Leschig типоразмер № 669.284. Нижний ряд плоскоструйные, Leschig типоразмер № 669.283.
	Нижний	Кл.11: 580 Кл.12: 570 Кл.13: 570	Кл.11: 710 Кл.12: 700 Кл.13: 700	65	Верхний ряд 31 Нижний ряд 32	2	60	60/110	
Выходная сторона	Верхний	Кл.11: 570 Кл.12: 570 Кл.13: 560	Кл.11: 710 Кл.12: 700 Кл.13: 700	20	Верхний ряд 32 Нижний ряд 32	2	60	60/110	Клеть №11-860 Клеть №12-860 Клеть №13-746 Верхний ряд плоскоструйные, Leschig типоразмер № 669.284. Нижний ряд плоскоструйные, Leschig типоразмер № 669.283. Верхний ряд плоскоструйные, Leschig типоразмер № 669.284. Нижний ряд плоскоструйные, Leschig типоразмер № 669.283.
	Нижний	Кл.11: 570 Кл.12: 570 Кл.13: 560	Кл.11: 410 Кл.12: 400 Кл.13: 400	0	Верхний ряд 32 Нижний ряд 32	2	60	60/110	

Примечание: В качестве начала отсчета приняты: X – горизонтальная ось прокатки, мм.
Y – вертикальная ось прокатки, мм (отсчет производится от линии отводящих роликов).
φ – угол наклона коллектора, град (отсчет производится от горизонтальной оси прокатки).

Схема расположения коллекторов приведены на рисунке ниже.

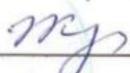


Непрерывная чистовая группа клетей, клетки №№ 7,8,9,10

Непрерывная чистовая группа клетей, клетки №№ 11,12,13

УТВЕРЖДАЮ

Главный прокатчик ОАО «ММК»

 И.В. Селезнев

« 6 » 01 2016г.

АКТ

**передачи научно – технической продукции в ОАО
«Магнитогорский металлургический комбинат» по результатам
диссертационной работы Дема Р.Р.**

Краткое описание выполненной работы

С целью повышения стойкости рабочих валков непрерывной чистовой группы клетей (№№7-13) стана 2000 г.п. произведена настройка системы антишелушения рабочих валков установленных в клетях №№7-10. Результаты настройки системы приведены в таблице 1.

Полученный результат

- 1.В период с 01.01.2015 г. совместно с ЛПЦ-10 произведены настройка системы антишелушения рабочих валков установленных в клетях №№7-10.
2. Зафиксировано снижение температуры рабочих валков которое составило в среднем **2..5** градусов.
3. Зафиксировано снижение перепада температуры у краев и в центре прокатной полосы, что позволило снизить дефект «локальная разнотолщинность» в среднем на **10..15%**.

Начальник ЛПЦ – 10

Зам. начальника ЛПЦ-10
по технологии

Исполнитель:

ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова»
к.т.н., доцент каф МитОД

 В.В. Антонюк

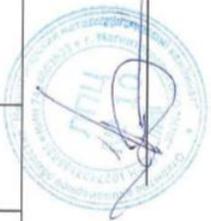
 А.Г. Федин

 Р.Р. Дема

Таблица 1. Настройка системы антишелушения рабочих валков установленных в №№7-10 клетях читовой группы стана 2000 г.п. ОАО "ММК"

Положение рабочих валков	Положение коллектора			Тип коллектора				Тип форсунок		
	Относительные координаты прокатки (X), мм	Относительные координаты прокатки (Y), мм	Угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки (положительный угол)	Количество форсунок	Рядность	Угол перекрытия, град	Шаг между форсунками, мм	Расход воды через коллектор, м ³ /ч, при давлении охладителя не менее 03 МПа	Тип форсунок	
Верхний	Кл.7: -430	Кл.7: 200	35.	15	1	15	120	55	прософакельные, Lechler типоразмер №665.084.30	
	Кл.8: -440	Кл.8: 210								
	Кл.9: -450	Кл.9: 220								
	Кл.10: -460	Кл.10: 220								
Нижний	Кл.7: -420	Кл.7: -200	35.	15	1	15	120	55	прософакельные, Lechler типоразмер №665.084.30	
	Кл.8: -410	Кл.8: -210								
	Кл.9: -430	Кл.9: -220								
	Кл.10: -450	Кл.10: -230								

Непрерывная чистовая группа клетей
Клеть № 7,8,9,10.



Начальник ЛПЦ-10

В.В. АНТОНЮК

0568
ТД- от 12.09.2018

ММК СКМ НТЦ (61)-15-5

Главному специалисту НТЦ
Начальнику ЛПЦ-10

Е.В. Брайчеву
Д.А. Захарьину

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПИСЬМО

Срок действия с 12.09.2018 г. до 31 декабря 2019 г.

С целью повышения эффективности работы системы антишелушения в клетях №№7-9 стана 2000 г.п. (договор № 232152 от 02.06.2017 г. между ПАО «ММК» и ФГБОУ ВО «МГТУ»)

ПРЕДЛАГАЮ:

1. Начальнику ЛПЦ-10 Д.А. Захарьину провести настройку системы антишелушения в клетях №№7-9 согласно приложению А настоящего письма;
 - 1.1 прокатку металла на стане 2000 г.п. осуществлять в соответствии с действующими НД.
2. Начальнику ЛПЦ-10 Д.А. Захарьину, главному специалисту НТЦ Е.В. Брайчеву:
 - 2.1 проводить замеры и учет износа, съемов при перешлифовках и стойкости рабочих валков клетей №№7 - 9 стана 2000 г.п.;
 - 2.2 проводить оценку состояния поверхности и замеры температуры рабочих валков клетей № 7-9 во время перевалок.
4. ФГБОУ ВО «МГТУ» Р.Р. Дема, оценить эффективность предлагаемых мероприятий на стане 2000 г.п. ПАО «ММК» и при необходимости вносить оперативные корректировки в предложенные мероприятия.

И.о. начальника технического департамента

Е.В. Брайчев

СОГЛАСОВАНО:

Главный специалист группы
по прокатному производству НТЦ

Е.В. Брайчев

Начальник ЛПЦ-10

Д.А. Захарьин

Ведущий специалист ТГ НТЦ

А.В. Логинов

РАЗРАБОТЧИК:

ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова»

Доцент каф. «МитОДиМ»

Р.Р. Дема

Профессор каф. «МитОДиМ»

С.И. Платов

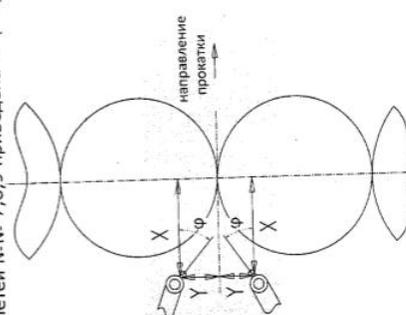
ПРИЛОЖЕНИЕ А к ТД-1986 от 11.09.2018

Система антишелушения в клетях №№7-9 стана 2000 г.п.

Положение рабчих валков вала	Положение коллектора				Тип коллектора				Тип форсунок
	Расстояние X, мм	Расстояние Y мм	Угол наклона коллектора по отношению к оси прокатки φ, град	Количество форсунок, шт	Рядность	Угол перекрытия, град	Шаг между форсунками, мм	Максимальный расход воды через коллектор, м ³ /ч, при давлении охладителя не менее 0,3 МПа	
Верхний	Кл.7: 430	Кл.7: 200 Кл.8: 210 Кл.9: 220 Кл.10: 220	35	15	1	15	120	55	плоскоструйные, Lechler, типоразмер №665.084.30
	Кл.8: 440								
	Кл.9: 450								
	Кл.10: 460								
Нижний	Кл.7: 420	Кл.7: 200 Кл.8: 210 Кл.9: 220 Кл.10: 230	35	15	1	15	120	55	плоскоструйные, Lechler, типоразмер №665.084.30
	Кл.8: 410								
	Кл.9: 430								
	Кл.10: 450								

Непрерывная чистовая группа клетей №№ 7,8,9

Примечание: В качестве начала отсчета приняты: X – горизонтальная ось прокатки, мм.
 Y – вертикальная ось прокатки, мм (отсчет производится от линии отводящих роликов).
 φ – угол наклона коллектора, град (отсчет производится от горизонтальной оси прокатки).



Непрерывная чистовая группа клетей, клетки №№ 7,8,9

УТВЕРЖДАЮ

Главный прокатчик ОАО «ММК»

Титов А.В.

« ____ » _____ 2007г.

Акт

промышленных испытаний

опытной конструкции системы обеспыливания (гидроудаления окалины)
установленной на 10-ой и 9-ой клетки стана 2500 г.п.

(в рамках выполнения опытно-конструкторской работы по договору
№144093 от 12.10 2006 г.)

В рамках выполнения договора №144093 от 12.10 2006 г., в период с апреля по август 2007 года была спроектирована, изготовлена и установлена на 10-ую и 9-ую клетки стана опытная конструкция системы обеспыливания (гидроудаления окалины). Конструктивное исполнение системы обеспыливания подразумевает установку коллекторов в верхние проводки клеток стана. Для эффективного и равномерного распыления охладителя разработана и изготовлена специальная конструкция форсунки.

Во время проведения испытаний для наиболее эффективного распределения охладителя над поверхностью полосы экспериментально определены оптимальные углы позиционирования сопел форсунок.

Проведенные промышленные испытания выявили работоспособность предложенной конструкции. Внедрение разработанной системы обеспыливания (гидроудаления окалины) на 10-ой и 9-ой клетки стана 2500 г.п. в условиях действующего производства что позволяют предположить, что в результате снижения общего уровня запыленности произойдет между и рабочими и опорными валками, произойдет повышение стойкости подшипников качения прокатных валков чистовой группы клеток стана 2500 г/п на 1,4 %, а также снижение расхода рабочих валков на 1 %.

Исполнитель, доцент, к.т.н.



Р.Р. Дема

Согласовано:

Начальник ЛПЦ-4

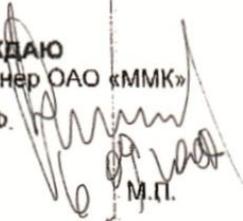


О.В. Казаков

Начальник стана 2500 г.п.

В.Ю. Перепелкин

УТВЕРЖДАЮ
 Главный инженер ОАО «ММК»
 Дьяченко В.Ф.



М.П.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов работ по договору № 144093 от 12.10.2006г.
по теме: Разработка способа обеспыливания (гидроудаления
окалины) на чистой группе клетей стана 2500 г.п.»

Краткое описание выполненной работы

Разработан способ обеспыливания (гидроудаления окалины) включает в себя установку дополнительных коллекторов с форсунками в верхнюю и нижнюю проводку клетей стана. Для эффективного и равномерного распыления охладителя разработана и изготовлена специальная конструкция форсунки, на которую подана заявка на изобретение в ОРИП ОАО «ММК».

Полученный результат

В настоящее время система гидроудаления окалины и способ обеспыливания внедрены в условиях действующего производства на 11 –ой клетке стана 2500 г.п.

Использование разработанной конструкции системы обеспыливания (гидроудаления окалины) позволило уменьшить уровень запыленности межвалкового рабочего пространства что снижению попадания абразивных частиц в подшипниковые опоры и зазоры между опорными и рабочими валками. Экономический эффект от внедрения определяется путем снижения абразивного износа опорных валков (с $8,3 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $8,1 \cdot 10^{-5}$ кг/т) и рабочих валков (с $4,0 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $3,9 \cdot 10^{-5}$ кг/т) соответственно.

Расчет фактического экономического эффекта будет представлен 01.10.2008 г

Дата фактического внедрения июнь 2007г.

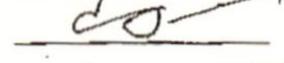
Срок полезного использования - 2 года

Начальник ЛПЦ - 4



О.В. Казаков

Зам. начальника ЛПЦ-4



В.В. Белохонов

Научный руководитель
 д.т.н., профессор



С.И. Платов

Исполнитель
 к.т.н., доцент



Р.Р. Дема

Согласовано:

Главный специалист
 главный прокатчик «ОАО ММК»



А.В. Титов

Начальник ОРИП
 (при охраноспособном результате)



В.П. Тарохтий

*Заявка на изобретение подана, комиссия в стадии рассмотрения
 05.09.2008
 В.П. Тарохтий*

*Савина Л.П.
 05.09.2008*

ТД-0564 от 12.09.2018

ММК СМК НТЦ (61)-15-5

Главному специалисту НТЦ
Начальнику ЛПЦ-10

Е.В. Брайчеву
Д.А. Захарьину

+ 1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПИСЬМО

Срок действия с 12.09.2018 до 31 декабря 2019 г.

С целью оптимальной настройки системы охлаждения валков чистой группы клеток №№7-13 стана 2000 г.п. в рамках реализации договора НИОКР № 232152 от 02.06.2017

ПРЕДЛАГАЮ:

1. Начальнику ЛПЦ-10 Д.А. Захарьину производить прокатку полос на стане 2000 г.п. со следующими настройками системы охлаждения валков чистой группы клеток №№7-13 (приложение А);
 - 1.1 прокатку металла на стане 2000 г.п. осуществлять в соответствии с действующими НД.
2. Начальнику ЛПЦ-10 Д.А. Захарьину, главному специалисту НТЦ Е.В. Брайчеву:
 - 2.1 проводить замеры и учет износа, съемов при перешлифовках и стойкости рабочих валков клеток №№7 - 13 стана 2000 г.п.;
 - 3.2 проводить оценку состояния поверхности и замеры температуры рабочих валков клеток № 7-13 во время перевалок.
4. ФГБОУ ВО «МГТУ», Р.Р. Дема оценить эффективность предлагаемых мероприятий на стане 2000 г.п. ОАО «ММК»

И.о. начальника технического департамента



Е.В. Брайчев

СОГЛАСОВАНО:

Главный специалист группы
по прокатному производству НТЦ



Е.В. Брайчев

Начальник ЛПЦ-10



Д.А. Захарьин

Ведущий специалист ТГ НТЦ



А.В. Логинов

РАЗРАБОТЧИК:

ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова»
Доцент каф. «МИТОДИМ»



Р.Р. Дема

Профессор каф. «МИТОДИМ»

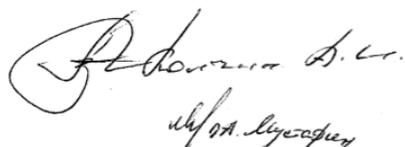


С.И. Платов

Аспирант каф. «МИТОДИМ»



О.Р. Латыпов


И.о. начальника технического департамента

ПРИЛОЖЕНИЕ А к ТД- _____ от _____
 Настройка системы охлаждения непрерывной чистовой группы клетей №№7-13 стана 2000 г.п.

Значение $W_{ср,Г}$	Характеристики монтажа	Чистовая группа клетей стана 2000 г.п. ПАО «ММК»						
		7	8	9	10	11	12	13
$W_{ср} < 2150$	Значение коэффициента k_L	Процент открытия гидрозатора системы СОВ (%)						
		$k_L \leq 0,025$	100	100	100	95	90	85
$2150 \leq W_{ср} \leq 2850$	$k_L > 0,025$	$k_L \leq 0,025$	100	100	95	90	85	75
		$k_L > 0,025$	100	100	95	95	90	85
		$k_L > 0,025$	100	100	95	95	95	85
$W_{ср} > 2850$	$k_L \leq 0,025$	$k_L \leq 0,025$	100	100	100	95	95	90
		$k_L > 0,025$	100	100	100	95	95	90

Примечание
 $W_{ср}$ – средний вес прокатываемого монтажа.
 $W_{ср} = \frac{W_{ср,н}}{n}$, где $W_{ср,н}$ – суммарный вес прокатанных полос в монтаже, n – количество прокатанных полос в монтаже, шт.
 k_L – коэффициент, учитывающий суммарную длину монтажа $L_{ср,н}, м$:
 $k_L = \frac{W_{ср}}{L_{ср,н}}$

Если прокатываемый монтаж не укладывается в классификацию указанную в таблице приложения А, а также для уточнения процента открытия гидрозатора системы СОВ (%) по текущим монтажа, рекомендуется произвести расчет по программному продукту, выполненному в рамках договора НИОКР № 232152 от 02.06.2017

003614



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г. И. Носова»**

(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»)
пр. Ленина, д. 38, г. Магнитогорск, Челябинская обл., 455000
Тел.: 8 (3519) 29-84-02; Факс: 8 (3519) 23-57-59, 29-84-26
E-mail: mgtu@mgtu.ru; <http://www.mgtu.ru>
ОКПО 02069384, ОГРН 1027402065437,
ИНН/КПП 7414002238/745601001

02.11.2018 № 42.04-3761

На/To № _____ от/dated _____

Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation
Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education
**«Nosov Magnitogorsk State
Technical University»**

(FSBEIHE «NMSTU»)
38, Lenin Street, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000
Tel.: +7 3519 298 402; Fax: +7 3519 235 759, +7 3519 298 426
E-mail: mgtu@mgtu.ru; <http://www.mgtu.ru>
ОКПО 02069384, OGRN 1027402065437
INN/KPP 7414002238/745601001

Начальнику ЛПЦ-10
Захарьину Д.А.
Главному специалисту НТЦ
Брайчеву Е.В.
455000, г. Магнитогорск,
Ул. Кирова,93

Уважаемые коллеги!

Информируем Вас о том, что в рамках выполнения НИОКР «Разработка математической модели управления системой охлаждения рабочих валков в клетях №№7-13, а также системой антишелушения в клетях №№7-9 стана 2000 г.п. ПАО «ММК»» (договор № 232152 от 02.06.2017, научный руководитель Дема Р.Р.) разработаны следующие методики:

- «Методика измерения температуры рабочих валков» (приложение А);
- «Методика определения температуры рабочих валков в процессе прокатки» (приложение Б).

Считаем целесообразным использовать данные методики при определении температуры прокатных валков.

Проректор по НИИР



О.Н. Тулулов

исполнитель
Дема Р.Р.
8(3519)29-84-80

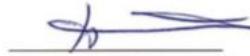
Расчет экономической эффективности продолжение таблицы

Наименование показателя	ед.изм.	база 2013 года	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Всего за 5 лет	Изменение расхода за 5 лет
Расход валков на клетях №№7-9	шт.	136								
	тонн	1851								
	кг/т	0,315								
В.т.ч. с использованием технологической смазки	шт.	51	48	47	47	43	45	47	277	32
	тонн	696	655	637	638	585	619	633	3 766	435
	тыс. руб.	62 915	58 854	58 241	62 914	58 845	70 381	81 438	390 673	45 102
	кг/т	0,315	0,294	0,286	0,285	0,265	0,274	0,288	0,282	0,033
	%									10,3%
Расход технологической смазки	тонн	108,38	103,78	103,86	104,09	102,64	105,04	102,08	621,48	32,71
	кг/т	0,049	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	-0,02
	тыс. руб.	13 451	15 011	20 659	22 086	19 268	17 841	12 373	107 238	5 644
Итого:	тыс. руб.									83 557

*Расчет экономической эффективности произведен без взаимных финансовых обязательств

Исполнители:
от ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

д.т.н., профессор кафедры МиТОДиМ



С.И. Платов

к.т.н., доцент кафедры МиТОДиМ



Р.Р. Дёма

к.т.н., доцент кафедры МиТОДиМ



Р.Н. Амиров

Согласовано от ПАО «ММК»

Начальник ЛПЦ-10



В.С. Банщиков

Зам. начальника ЛПЦ-10 по технологии



А.Г. Федин

Зам. главного прокатчика



И.В. Брянцев

