

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



На правах рукописи

ЛАТЫПОВ ОЛЕГ РАФИКОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ
ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ОСНОВЕ
НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ
СИСТЕМЫ «ПОЛОСА-ВАЛОК»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Научный руководитель

Платов Сергей Иосифович,

доктор технических наук, профессор.

Магнитогорск – 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ПОЛОСА-ВАЛОК» НА СТАНАХ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ	13
1.1 Современное состояние и тенденции развития производства стальной полосы	13
1.2 Общее устройство и направления развития широкополосных станов горячей прокатки	15
1.3 Анализ оборудования систем охлаждения рабочих валков в чистовой группе клетей	19
1.4 Анализ исследований тепловых процессов в системе «полоса-валок»	20
1.4.1 Исследования теплового состояния полосы	20
1.4.2 Исследования теплового состояния рабочих валков	23
1.5 Анализ методов прогнозирования технологических параметров прокатки	30
1.6 Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования и определения параметров процесса прокатки	34
1.7 Постановка цели и задач исследования	35
2 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЧИСТОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ ШСГП	38
2.1 Статистическая оценка технологических факторов, влияющих на конечную температуру рабочих валков	38
2.2 Подготовка данных для статической обработки и обучения нейронных сетей	42
2.3 Прогнозирование толщины полосы перед чистовой группой клетей с помощью искусственной нейронной сети	43
2.3 Прогнозирование скоростей прокатки на широкополосном стане горячей прокатки	46
2.4 Прогнозирование температуры полосы перед чистовой группой клетей	49
2.5 Определение пауз прокатки	50

2.6 Разработка методики прогнозирования технологических параметров в чистовой группе клетей широкополосного стана горячей прокатки	51
2.7 Анализ погрешностей расчета технологических параметров прокатки в чистовых клетях применительно к ШСГП 2000 ПАО «ММК»	53
Выводы по второй главе	59
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ПОЛОСА-ВАЛОК» И АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	62
3.1 Моделирование теплового состояния полосы в чистовой группе клетей	62
3.1.1 Разработка математической модели.	63
3.1.2 Регрессионная модель распределения температуры полосы по ее ширине	65
3.2 Моделирование теплового состояния рабочего вала в чистовой группе клетей	69
3.3 Численная реализация модели теплового состояния рабочих валков	76
3.4 Адаптация математической модели теплового состояния рабочих валков для действующих условий производства с помощью искусственной нейронной сети	81
Выводы по третьей главе	91
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕПЛОВОГО ПРОФИЛЯ РАБОЧИХ ВАЛКОВ. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ С СОХРАНЕНИЕМ КАЧЕСТВА ПОЛОСЫ	93
4.1 Исследование теплового состояния рабочих валков при прокатке на ШСГП 2000 ПАО «ММК».....	93
4.2 Исследование изменения теплового профиля рабочего вала при прокатке на ШСГП 2000 ПАО «ММК».....	96
4.3 Разработка и внедрение мероприятий, направленных на повышение стойкости рабочих валков ШСГП 2000 ПАО «ММК».....	100
4.3.1 Разработка рациональных режимом охлаждения.....	100

4.3.2 Совершенствование конструкции коллектора охлаждения	103
4.4 Оценка эффекта от внедрения разработанных мероприятий, направленных на повышение стойкости рабочих валков	106
4.4.1 Оценка повышения стойкости рабочих валков чистовой группы клетей на ШСГП 2000 ПАО «ММК».....	107
4.4.2 Оценка изменений качества полосы ШСГП 2000 ПАО «ММК» ...	109
Выводы по четвертой главе.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
Список литературы	117
Приложение А	130
Приложение Б	132
Приложение В	133
Приложение Г	135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Снижение эксплуатационных затрат при производстве стальных полос на широкополосных станах горячей прокатки (ШСГП) является одной из важнейших задач металлургической отрасли.

В последнее время в технологии производства широкополосных горячекатаных полос наблюдается тенденция к уменьшению их толщины, которая достигает 1 мм. Прокатка тонких горячекатаных полос на существующих станах осуществляется с минимальными технологическими паузами, что приводит к увеличению времени контакта рабочих валков с полосой, а, следовательно, к нарушению теплового режима эксплуатации рабочих валков. Нарушение теплового режима приводит к перегреву валков и негативно влияет на их стойкость, а также на качество прокатываемой полосы.

Несмотря на многолетние исследования процессов охлаждения и нагрева рабочих валков множество вопросов в данной области остаются не изученными. В частности, остаются открытыми следующие моменты: определение коэффициентов теплопередачи в процессе прокатки и определение рациональных режимов охлаждения в зависимости от содержания программ прокатки на стане.

В связи с этим исследования, направленные на повышение стойкости рабочих валков и совершенствование технологии и оборудования систем охлаждения рабочих валков, являются актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности проблемы

Большой вклад в исследование теплового состояния валков и полосы при листовой горячей прокатке внесли отечественные и зарубежные ученые: Целиков А.И., Шичков А.Н., Третьяков А.В., Рудской А.И., Гарбер Э.А., Мазур И.П., Грачев А.В., Коновалов Ю.В., Кохан Л.С., Роберов И.Г., Гинцбург В.Б., Робертс В.Л., Зиновьев А.В., Шаталов Р.Л., Румянцев М.И.,

Хлопонин В.Н., Колесников А.Г., Горбатюк С.М., Дема Р.Р., Колбасников Н.Г., Хлопотин М.В. и др.

Несмотря на успехи в области теории и практики производства широкополосного горячекатаного проката, многие задачи, связанные с технологией прокатки, эксплуатацией и охлаждением рабочих валков, а также с совершенствованием оборудования для рациональной реализации режимов охлаждения, в настоящее время остаются не до конца исследованными.

Анализ литературных данных показывает, что при описании теплового состояния рабочих валков на основе известных теоретических подходов, необходимо знать коэффициенты теплопередачи от полосы рабочему валку и от рабочего валка охладителю, а также постоянно заниматься адаптацией коэффициентов к условиям действующих производств. Значения коэффициентов теплопередачи задаются, исходя из литературных данных, или определяются с использованием специальных стендов и дорогостоящего оборудования. С учетом того, что сортамент горячекатаных полос постоянно совершенствуется (по химическому составу), проведение дорогостоящих испытаний не всегда является целесообразным. Поэтому необходимо искать новые альтернативные решения, позволяющие определять (прогнозировать) теплофизические коэффициенты без проведения дорогостоящих и длительных испытаний. Одним из таких решений может быть использование искусственных нейронных сетей (ИНС). В данной работе применяются ИНС для прогнозирования и определения технологических параметров горячей прокатки и коэффициентов теплопередачи в системе «полоса-валок». Где под системой «полоса-валок» понимаются закономерности технологических и тепловых процессов при взаимодействии рабочего валка с полосой в клети чистовой группы ШСГП.

Диссертационные исследования проводились:

– при поддержке Правительства РФ в виде стипендии президента для аспирантов 2020/2021 гг.;

– при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по проекту № FZRU-2020-0011;

– в рамках завершённой с практическим внедрением научно-исследовательской и опытно-конструкторской (хоздоговорной) работы между ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» и ПАО «ММК» в 2019-2020 гг.

Объект исследования – система «полоса-валок» четырехвалковых клеток непрерывно-чистовой группы широкополосных станов горячей прокатки.

Предмет исследования - деформационные режимы и тепловые процессы в системе «полоса-валок» четырехвалковых клеток непрерывно-чистовой группы широкополосных станов горячей прокатки.

Цель работы.

Разработка и научное обоснование путей повышения стойкости рабочих валков широкополосных станов горячей прокатки на основе моделирования деформационных режимов и теплового состояния в системе «полоса-валок» с использованием искусственных нейронных сетей.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **научно-технических задач:**

1. Изучить влияние технологических параметров процесса широкополосной горячей прокатки на тепловое состояние рабочих валков. С помощью статических методов и ИНС построить модели прогнозирования наиболее значимых технологических параметров.

2. Разработать модель расчета теплового состояния рабочих валков на основе математического описания деформационных режимов и теплового состояния в системе «полоса-валок». Произвести адаптацию разработанной модели к условиям действующего производства.

3. Произвести теоретические исследования влияния технологических факторов на изменение теплового состояния рабочих валков, а также разработать рекомендации для его регулирования в процессе прокатки.

4. Разработать и внедрить новые научно-технические и технологические решения, направленные на повышение стойкости рабочих валков широкополосных станов горячей прокатки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика, разработанная на основе совместного использования регрессионных и нейросетевых моделей, позволяющая прогнозировать технологические параметры процесса горячей прокатки для условий ШСГП, в частности, обжатия (ε , %), скорости (V , м/с) и паузы (t , с) прокатки в каждой клетке и температуры полос ($T_{п}$, °С) перед чистовой группой клетей.

2. Математическая модель, описывающая тепловое состояние рабочих валков при горячей прокатке для условий ШСГП, для реализации которой применена нейросетевая модель, позволяющая определять коэффициенты теплопередачи: от полосы рабочему валку ($\alpha_{\text{конт.}}$, Вт/(м²·°С) и от рабочего валка охладителю ($\alpha_{\text{р.в.}}$, Вт/(м²·°С).

3. Результаты внедрения технологических и технических решений, направленных на повышение стойкости рабочих валков в чистовой группе клетей ШСГП, выраженное в снижении удельного расхода с $6,9 \dots 8,5 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $6,21 \dots 7,65 \cdot 10^{-5}$ кг/т.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Предложена методика прогнозирования основных технологических параметров процесса широкополосной горячей прокатки, отличительной особенностью которой является определение температуры полосы перед чистовой группой клетей ($T_{п}$), скоростей (V) и пауз (t) прокатки с помощью регрессионных уравнений в зависимости от конечной толщины проката, а также использование нейросетевых моделей для определения обжатий (ε) в клетях.

2. На основе предложенной методики разработана математическая модель расчета теплового состояния в системе «полоса-валок», учитывающая градиент температуры по ширине прокатываемой полосы в очаге

деформации, отличающиеся от известных тем, что градиент определяется в зависимости от условной группы сортамента полосы.

3. С использованием методов нейросетевого моделирования предложен подход для определения коэффициентов теплопередачи от полосы рабочему валку ($\alpha_{\text{конт.}}$) и от рабочего валка охладителю ($\alpha_{\text{р.в.}}$) в зависимости от геометрии полосы ($B_{\text{ср}}, h_{1\text{ср}}, L_{\text{ср}}$) и технологических параметров ($T_{\text{пср}}, V_{\text{ср}}$) прокатки в клетях чистовой группы ШСГП, отличающийся от известных подходов тем, что при определении коэффициентов учитывается средняя пауза прокатки ($t_{\text{ср}}$) и суммарное количество полос в программе прокатки ($n_{\text{сум}}$).

Практическая значимость

1. Для непрерывно-чистовой группы четырехвалковых клеток ШСГП разработана методика, позволяющая рекомендовать технологические режимы процесса прокатки на основе применения полученных нейросетевых моделей и регрессионных уравнений. Произведена адаптация разработанной методики к условиям ШСГП 2000 ПАО «ММК». Относительная погрешность расчетов составила не более 12%.

2. С помощью нейросетевой модели определены коэффициенты теплопередачи для рабочих валков в каждой клетке чистовой группы ШСГП 2000 ПАО «ММК»: от полосы рабочему валку ($\alpha_{\text{конт.}}$) 3669, 3552, 3745, 3480, 3398, 3249, 3243 Вт/(м²×°С); от рабочего валка охладителю ($\alpha_{\text{в.р.}}$) 3575, 3461, 3649, 3391, 3311, 3165, 3160 Вт/(м²×°С).

3. Внесены изменения в классификацию программ прокатки, согласно которым предложено учитывать коэффициент ($B_{\text{пр}}$), характеризующий ширину прокатываемых полос. С использованием классификации определено влияние программ прокатки на тепловое состояние рабочих валков непрерывной чистовой группы клеток ШСГП. С учетом предложенной классификации получены следующие технические и технологические решения:

– разработаны и внедрены рациональные режимы подачи охладителя на поверхность рабочих валков (реализован программный продукт, на который получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021665573);

– предложены и внедрены изменения в конструкцию коллекторов охлаждения (подана заявка на изобретение РФ).

4. В результате внедрения на ШСГП 2000 ПАО «ММК» предложенных решений зафиксировано повышение стойкости рабочих валков, выраженное в снижении удельного расхода с $6,9...8,5 \times 10^{-5}$ кг/т до $6,21...7,65 \times 10^{-5}$ кг/т и увеличении ресурса рабочих валков на 7...10 эксплуатационных часов работы (7...10%).

5. Увеличение срока эксплуатации рабочих валков в чистовой группе клетей ШСГП 2000 ПАО «ММК» позволило получить экономический эффект в 3,2 млн. руб.

Апробация работы

Основные результаты работы представлены на следующих конференциях, симпозиумах и форумах: 76-79 международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, 2018-2021 гг.); международной научной конференции «Современные материалы и передовые производственные технологии» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Беларусь, г. Витебск, 2019 г.); XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Уфа, 2019 г.); национальной научной школе-конференции «Современные достижения университетских научных школ» (г. Магнитогорск, 2019 г.); 2nd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (Турция, г. Стамбул, 2020 г.); International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (г. Севастополь, 2019 г., 2021 г.); научно-технической конференции «Наука и производство Урала»

(г. Новотроицк, 2021). Соискатель является лауреатом премии конкурса молодых ученых в рамках 24 международной промышленной выставки «Металл-Экспо» (г. Москва, 2018 г.).

Реализация результатов работы.

Результаты исследований внедрены в условиях действующего производства на ШСГП 2000 ПАО «ММК» Предложенный и разработанный автором метод прогнозирования технологических параметров с использованием ИНС при незначительной адаптации может использоваться на аналогичных ШСГП.

Методы исследований и достоверность результатов работы.

Работа представляет комплексное исследование, основанное на использовании современных методов в области машин и технологий обработки давлением в области прокатного производства. При решении поставленных задач использовано современное исследовательское и экспериментальное оборудование: инфракрасные пирометры TI213EL и TI315EL, тепловизор SDS HotFind-DXT, тензометрические датчики и др.

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

Личный вклад автора состоит в организации, проведении и непосредственном участии в теоретических и экспериментальных исследованиях. Автором лично произведен анализ, обобщение результатов исследований и проведено обоснование всех выносимых на защиту положений.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ в научно-технических изданиях, из которых: 4 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 3 статьи в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах Scopus

и Web of Science, а также получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 136 страницы машинописного текста, содержит 57 иллюстраций, 21 таблицу, 4 приложения, объём библиографического списка составляет 107 наименований.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ПОЛОСА-ВАЛОК» НА СТАНАХ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

1.1 Современное состояние и тенденции развития производства стальной полосы

Российская федерация является одной из крупнейших стран производителей горячекатаного проката. По данным [1] Всемирной стальной ассоциации (World Steel Association) в 2019 году объем произведенного горячекатаного проката в России составил 49 984 тыс. тонн (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Объем произведенного горячекатаного проката в России согласно World Steel Association [1]

Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Объем, тыс. тонн	42959	45351	46653	46966	48653	48106	48079	48640	49201	49984

Увеличение объемов производства горячекатаного проката в России происходит благодаря следующим преимуществам отечественной металлургии: развитая железорудная и топливно-энергетическая база; современные мощности по выплавке чугуна, стали и производству металлопродукции; созданные вертикально-интегрированные структуры [2].

Вместе с тем, в настоящее время наблюдаются следующие тенденции в прокатном производстве:

- увеличение доли продукции, поставляемой на внутренний рынок;
- увеличение поставок на экспорт продукции с увеличением глубины переработки;
- рост импортозамещения;
- повышение требований к служебным характеристикам продукции, совершенствование ее сортамента и конкурентоспособности;
- ресурсо- и энергосбережение, снижение негативного экологического воздействия на окружающую среду;

- внедрение новой техники и технологий.

С 2015 года можно наблюдать повышение среднемировой себестоимости производства горячекатаных рулонов, что связано с повышением цен на сырьё, так и показателями загрузки мощностей (рис. 1.1) [3].

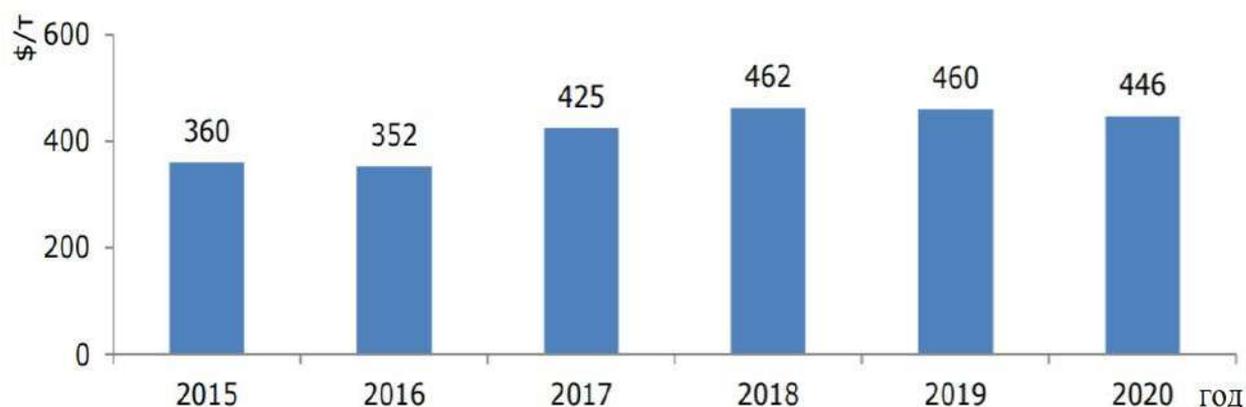


Рисунок 1.1 - Динамика среднемировой себестоимости производства горячекатаных рулонов в мире, \$/т [3]

На рисунке 1.2 показана структура себестоимости горячекатаного листа [4] по данным ПАО «Северсталь».



Рисунок 1.2 – Структура себестоимости по данным ПАО «Северсталь» [4]

Главным условием развития производства горячекатаной полосы это внутренний спрос на продукцию, благодаря которому возможно развитие новых технологий в прокатном производстве.

Рост спроса на отечественном рынке возможен благодаря следующим комплексным мероприятиям, проводимым в настоящее время [2]:

- строительство новых предприятий и развитие инфраструктуры регионов Дальневосточного и Сибирского федеральных округов и Арктической зоны;
- техническое обновление отраслей машиностроительного комплекса;
- реконструкция жилищного фонда и развитие жилищного строительства;
- реализация региональных проектов по развитию промышленности, транспорта и строительства.

Таким образом, понижение себестоимости производства горячекатаной полосы является актуальным.

1.2 Общее устройство и направления развития широкополосных станов горячей прокатки

На непрерывных широкополосных станах горячей прокатки (ШСГП) приходится основная доля объемов производства стальной полосы. Также стальная полоса производится на реверсивных универсальных станах и станах Стеккеля [5,6,7,8,9,10].

К современным станам относят непрерывные (в последнее десятилетие все чаще применяют полунепрерывные станы [7,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25] с одной – двумя реверсивными клетями в черновой группе). Также стоит отметить, что в последнее время внедряются в производство технологии совмещенного процесса литье – прокатка, прокатка полос из тонких слябов, прокатка полос непосредственно из жидкого металла [23,24,25]. Широко используется прокатка полосы на тонкослябовых литейно-прокатных агрегатах [26].

Устройство ШСГП обычно следующее [7,11]: методические печи, две группы клеток (черновая и непрерывная чистовая), устройства межклетевого и ламинарного охлаждения полосы, группа моталок для смотки полос, промежуточный рольганг, на котором перед чистовой группой установлены летучие ножницы. Устройство ламинарного охлаждения полосы расположено на отводящем рольганге. Окалинوماتели устанавливаются перед черновой и чистовой группами клеток [8].

На рисунке 1.3 приведена схема непрерывного ШСГП 2000 ПАО «ММК» [8]. В станах такого типа в черновой группе отсутствуют реверсивные клетки.

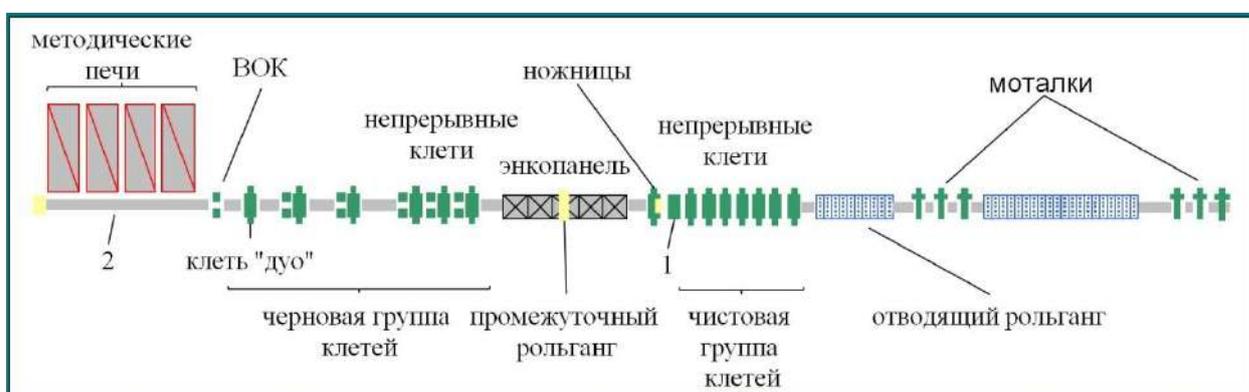


Рисунок 1.3 – Схема непрерывного ШСГП 2000 ПАО «ММК» [8]:
1 – чистовой окалинوماتель; 2 – печной рольганг; ВОК – вертикальный окалинوماتель

В полунепрерывных станах (рис. 1.4) черновая группа состоит из одной или двух четырехвалковых реверсивных клеток [27]. Полунепрерывные ШСГП обладают относительно малой протяженностью, а их строительство гораздо менее затратное.

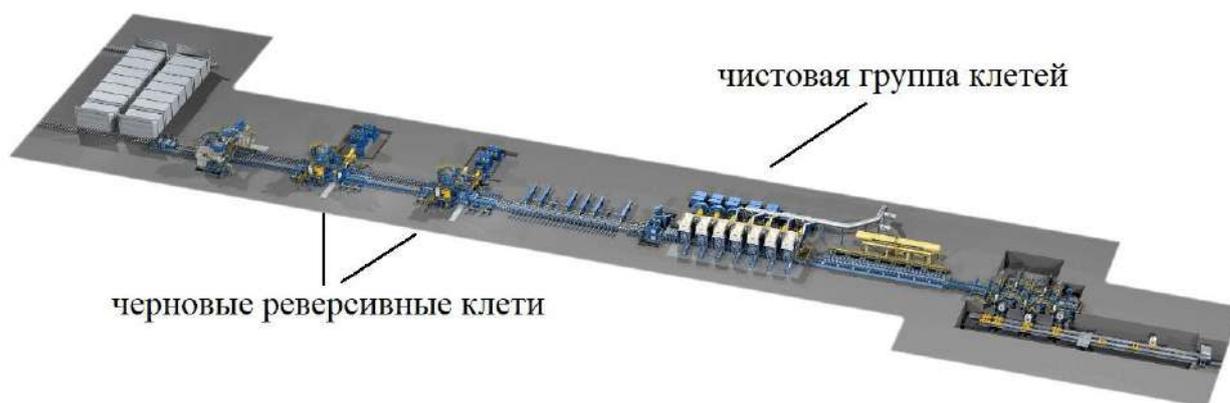


Рисунок 1.4 – Изображение полунепрерывного ШСГП [27]

С помощью комбинированных ШСГП [28] возможно производство толстолиствого (50 мм) и тонколистового (полосы) проката. В черновой группе станах такого типа используются две реверсивные клетки. Реверсивные клетки при прокатке полос используются как черновая группа, после которой полоса-подкат проходит через чистовую непрерывную группу, обычно состоящую из шести-семи непрерывных четырехвалковых клеток.

При необходимости на производстве прокатки полос и толстых листов комбинированные ШСГП являются эффективным решением. Но стоит отметить, что при производстве толстолиствого проката простаивает ряд оборудования: чистовая группа клеток, отводящий рольганг, моталки [28].

Черновая группа 3/4-непрерывных ШСГП (рис 1.5) состоит из одной или двух реверсивных и непрерывной подгруппы из двух нереверсивных клеток [28]. Преимуществами 3/4-непрерывного ШСГП выделяют относительно короткую технологическую линию производства по сравнению со станами, использующими четырехвалковые нереверсивные клетки. Также наличие реверсивных клеток позволяет применять больше разновидностей схем прокатки по числу проходов.

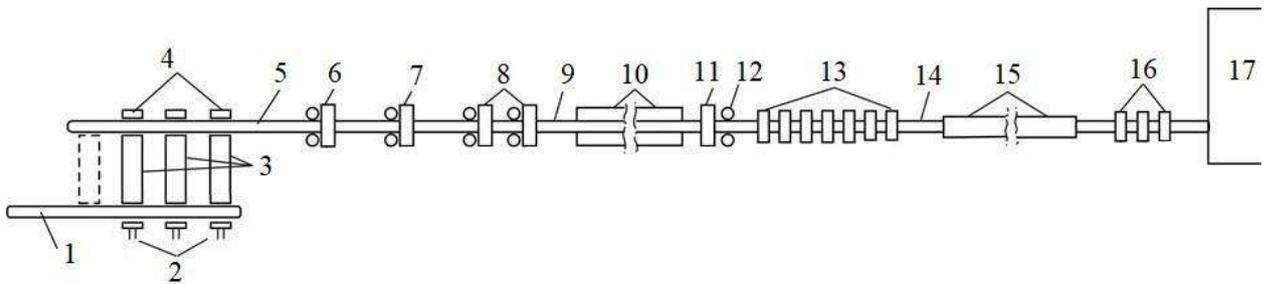


Рисунок 1.5 – Схема $\frac{3}{4}$ - непрерывного ШСГП 2050 «Baosteel» [28]:

1 – печной рольганг; 2 – толкатели слябов; 3 – методические печи; 4 – устройство выдачи слябов; 5 – приемный рольганг; 6 – двухвалковая реверсивная клеть; 7 – четырехвалковая реверсивная клеть; 9 – промежуточный рольганг; 10 – энкопанель; 11 – кривошипные ножницы; 12 – роликовая направляющая проводка; 13 – чистовая непрерывная группа клетей; 14 – отводящий рольганг; 15 – душирующая установка; 16 – моталки; 17 – адьюстаж

Прокатные станы, строящиеся с 2010 года, кардинально не отличаются от станов приведенных выше. Например, компания SMS group GmbH, Германия [27] за последнее десятилетие ввела в эксплуатации станы горячей прокатки на следующих предприятиях.

- компания PT Krakatau Steel (PTKS), г. Чилегон, о. Ява (устройство стана: печь с шагающими балками, четырехвалковая реверсивная черновая клеть; 6 четырехвалковых чистовых клетей и т.д.);

- компания Çolakoğlu Metalurji, Турция (устройство компактного стана: 4 четырехвалковых реверсивных черновых клетей; койлбокс; 7 четырехвалковых чистовых клетей и т.д.);

- компания HBIS Laoting Iron & Steel, Китай (устройство стана: пресс для изменения ширины слябов, 2 четырехвалковые реверсивные клетки, 7 четырехвалковых чистовых клетей и т.д.).

Таким образом, можно утверждать, что устройство значительной доли современных ШСГП включает в себя наличие непрерывной чистовой группы четырехвалковых клетей. Данные станы обладают высокой производительностью, широким сортаментом проката и высокой точностью геометрических параметров прокатываемых полос [8,28].

Также есть и недостатки. Так, прокатка тонких горячекатаных полос (1,2-1,9 мм) на существующих ШСП осуществляется с минимальными технологическими паузами и увеличивает машинное время работы стана в целом, что приводит к увеличению времени контакта рабочих валков с полосой и нарушению теплового режима эксплуатации рабочих валков. Это приводит к перегреву валков и негативно влияет на их стойкость и качество прокатываемой полосы. Поэтому повышение стойкости рабочих валков с сохранением качества прокатываемой полосы является актуальной задачей.

1.3 Анализ оборудования систем охлаждения рабочих валков в чистовой группе клетей

Способы подачи охладителя

Выделяют несколько типов подачи охлаждения на поверхность бочки рабочего валка: спрейерное (струйное) охлаждение, охлаждение с помощью щелевых коллекторов, комбинированное охлаждение, водовоздушное и эмульсионно-воздушное охлаждение [29,30].

В настоящее время коллекторы охлаждения оснащаются плоскоструйными форсунками. В литературе встречаются рекомендации по расположению плоскоструйных форсунок с различной пропускной способностью [31,32,33]. В работах [32,33] с помощью настройки расхода охладителя по длине бочки валка улучшают профиль рабочих валков, за счет увеличения расхода охладителя в переходной зоне валка (в зонах окончания контакта полосы с рабочим валком). Однако такое решение снижает эффективность теплосъема с центра рабочего валка.

Известно множество способов, конструкций и устройств для охлаждения рабочих и опорных валков [29,34,35,36,37,38,39]. Однако большую часть из них затруднительно использовать в реальных условиях производства. Например, в работе [34] предлагается разгонять охладитель в канавках опорного валка, в работе [38] – направлять охладитель в искусственно созданный зазор между рабочим валком и специальным устройством («охлаждающей оболочкой»).

Известны технологические решения, которые позволяют снижать тепловую нагрузку на рабочий валок при его контакте с полосой: охлаждение поверхности полосы перед входом в очаг деформации. В литературе данные решения носят название – «система «антишелушения» (САШ) [40].

При широкополосной горячей прокатке температура поверхности рабочих валков непосредственно в контакте с полосой может достигать 400-500 °С [40,41]. При эксплуатации рабочих валков наблюдается значительный перепад температур рабочего слоя, что способствует образованию термических трещин и преждевременному выходу валков из строя. При больших эксплуатационных температурах снижается прочность рабочего слоя валка, происходит падение твердости (до 25%) и 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 поддержания рационального теплового состояния рабочих валков. Например, использованием рациональных режимов охлаждения и рациональным распределением объемов охладителя по длине бочки валка.

1.4 Анализ исследований тепловых процессов в системе «полоса-валок»

1.4.1 Исследования теплового состояния полосы

Важным фактором, влияющим на тепловые процессы в системах «полоса-валок» чистовой группы стана является температурное состояние полосы перед входом ее в очаг деформации.

Полоса - окружающая среда. При взаимодействии поверхности полосы с воздушной средой ШСП происходят радиационный теплообмен и вынужденная конвекция. Охлаждение движущейся полосы в воздухе учитывается следующей зависимостью [42]:

$$Nu = 0,036Re^{0,5}Pr^{1/3} \quad 1.1$$

где Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля.

Определение тепловых потерь излучением на поверхности полосы определяют по закону Стефана-Больцмана:

$$q = \sigma \varepsilon(T_p)(T_{\text{полосы}}^4 - T_{\text{окр.ср}}^4) \quad 1.2$$

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

Данные формулы обычно используется при расчете теплового состояния полосы при горячей прокатке, так как закон Стефана-Больцмана корректно описывает процесс потери тепла излучением, а доля тепловых потерь полосы конвективным теплообменом с воздухом в условиях ШСГП незначительна [43].

Полоса-рабочий валок и полоса-рольганг. Известны исследования тепловых процессов при взаимодействии полосы с рольгангом или с валком при прокате [28,43,44,45,46]. В данных работах задачи теплопроводности решаются известными разностными методами. В работах [45,46] конечноразностными методами моделируют тепловое состояние полосы на ШСГП.

В работах [28,43,44] приведены способы расчета тепловых потерь в полосе при ее взаимодействии с рабочими валками и с рольгангом. Приведенные зависимости в данных работах хорошо согласуются с экспериментальными данными. Так, снижение температуры в результате взаимодействия полосы с валками можно рассчитать по формуле [44]:

$$\Delta t_{\text{кв}} = C_2 \frac{t_0}{h_0 + h_1} \sqrt{\tau}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad 1.4$$

где C_2 – коэффициент теплопередачи; τ – время прохождения сечения полосы через зону контакта.

Полоса-струйное охлаждение. Полоса в чистой группе клетей стана ШСГП подвергается струйному межклетевому охлаждению. Исследованию струйного охлаждения полос посвящено множество работ

[28,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56]. В данных работах рассматриваются процессы охлаждения полосы как отдельной струей (математически описываются процессы взаимодействия полосы с отдельной струей), так и суммарное влияние струй установок межклетевого охлаждения (регрессионные зависимости, потери тепла рассчитываемые по составленным уравнениям теплового баланса).

В работах [52,54,55,56] исследуются взаимодействия устройств охлаждения с полосой с учетом гидродинамики и теплообмена между поверхностью и свободной струей в условиях кипения. Авторы работ исследует этот процесс как экспериментальными методами, так и аналитически. Применение на практике результатов данных работ затруднено в связи с наличием большого количества эмпирических параметров и ограниченности условий протекания процесса условиями, созданными в лаборатории.

В работах [48,49,50] определена локальная плотность теплового потока в зоне столкновения струи на поверхности прокатываемых полос (1.5). Расчет теплоотдачи в зонах между струями в работе [50] произведен с помощью уравнения, в основу которого заложена аналитическая модель пленочного кипения потока жидкости на движущейся горизонтальной поверхности:

$$q_{im}(r) = A \cdot 8,67 \cdot 10^7 \Delta T_{sat}^{-0,385} \left[1 + 0,4 \left(\frac{v_{im}(r)}{100D_c} \right)^{0,4} \right], A = \frac{q_{cr}(\Delta T_{sab})}{q_{cr}(80^\circ C)} \quad 1.5$$

где $\Delta T_{sat} = T_p - T_s$, T_p – температура на поверхности полосы; T_s – температура насыщения воды; r – расстояние от оси струи (x); $v_{im}(r)$ – вертикальная составляющая скорости струи в зоне столкновения; D_c – диаметр струи (mc); q_{cr} – критическая плотность теплового потока при кипении недогретой жидкости в свободном объеме.

Авторами работ [48,49,50,52,55,56] выделены следующие основные механизмы теплопередачи при охлаждении прокатываемой полосы: охлаждение в зоне столкновения струи с полосой в условиях переходного

кипения жидкости; теплопередача в зоне пленочного кипения жидкости; теплообмен в зонах конвективного и радиационного охлаждения в воздухе.

По результатам анализа исследований процессов теплового состояния полосы, можно сделать следующий вывод:

– применение аналитических зависимостей по определению теплового состояния полосы при горячей прокатке затруднительно в связи с отсутствием достоверных коэффициентов теплопередачи в широком диапазоне условий.

1.4.2 Исследования теплового состояния рабочих валков

На данный момент выделяют два подхода по определению теплового состояния рабочих валков при горячей прокатке [30,57,58]. В первом подходе используются теоретические зависимости для описания тепловых процессов. Во втором подходе используются уравнения, полученные с помощью методов статистического анализа результатов экспериментальных исследований температурного состояния рабочих валков.

При теоретическом анализе составляют уравнения суммарного теплового баланса, учитывающего потери тепла рабочим валков вследствие охлаждения водой, приток тепла в валок при соприкосновении с прокатываемой полосой и приток тепла вследствие пластической деформации полосы. Однако расчет суммарного теплового баланса рабочих валков затруднен из-за отсутствия точных данных о теплофизических константах. Кроме того, для повышения точности расчетов математических моделей необходимо их адаптировать для каждого конкретного стана.

Во втором подходе используют регрессионные уравнения определения температурного состояния рабочих валков, которые строят на основе статистического анализа экспериментальных данных по температурам полос и рабочих валков. При этом общая структура полученных регрессионных моделей основывается на физической природе явлений и содержит в качестве аргументов основные параметры технологического процесса.

Оба подхода позволяют рассчитать температуру часто с большой, недопустимой погрешностью. Требуемая точность расчета по теоретическим формулам труднодостижима в связи многофакторностью процессов. В случае расчета по статистической модели необходимо конкретное число параметров прокатки. На данный момент нет оснований говорить о преимуществе какого-то одного способа получения модели теплового состояния рабочих валков.

Гарбер Э.А., Третьяков А.В. и Шичков А.Н. одни из первых в отечественной практике разработали и опубликовали теории и математические модели определения теплового состояния валков на станах горячей и холодной прокатки, а также методы расчёта параметров систем охлаждения. В работах [30,57,58] при определении теплового состояния рабочих валков используют нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных, которое обычно приводят в цилиндрической системе координат [30].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} ar \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} a \frac{\partial T}{\partial \varphi}, \quad 1.6$$

где $a = a(r; \varphi)$ - коэффициент температуропроводности, м²/с; r – расстояние по радиусу валка, мм; T – температура, °С; t – время, с.

Также в работах [30,57,58] при определении теплового состояния рабочих валков используют следующие допущения и граничные условия.

1. В радиальном направлении наибольший градиент температур находится в центральном сечении бочки валка, а градиент в осевом температурном поле незначителен, поэтому при инженерных расчетах данный градиент не учитывается. А также можно рассматривать отдельно радиальное и осевое температурные поля.

2. Область температурного поля, в которой разность значений температур не превышают 200-250 °С, значительно меньше по сравнению с радиусом валка, поэтому в решение задачи теплообмена в рабочих валков

считают, что коэффициент температуропроводности материала не зависит от температуры и одинаков во всем объеме вала.

3. В процессе прокатки вращающиеся рабочие валки имеют различные граничные условия (для дифференциального уравнения), зависящие от угла ϕ . Валок разбивается на следующие зоны:

- ϕ_1 – зона, в которой рабочий валок соприкасается с прокатываемой полосой;
- ϕ_2 и ϕ_4 – зоны, в которых валок воспринимает тепловой поток лучистого теплообмена с прокатываемой полосой и часть тепла отдается конвекцией окружающей среде (воздуху);
- ϕ_3 – зона, в которой подается охлаждающая жидкость;
- ϕ_5 – зона, в которой рабочий валок клетки кварто соприкасается с опорным валком.

Также авторы рассматривают каждую зону отдельно. В зоне ϕ_3 , как отмечалось ранее, охлаждается жидкостью. Важными составляющими расчета теплового состояния вала являются коэффициенты теплоотдачи. В данной зоне, естественно, средний коэффициент теплоотдачи, отнесенный к поверхности, непосредственно охлаждаемой струями жидкости, будет на порядок выше, чем численное значение коэффициента теплоотдачи, отнесенного к полной поверхности вала при подаче воды из коллекторов. Также в зоне ϕ_3 происходит кипение охлаждающей жидкости, так как на выходе из зоны ϕ_1 и ϕ_2 температура поверхности вала высокая. При этом потоком охлаждающей жидкости, стекающей по нагретой поверхности навстречу вращающегося вала, создаются благоприятные условия для интенсивного теплообмена. Ввиду того, что относительная скорость движения воды по нагретой поверхности превышает 5 м/с, коэффициент теплоотдачи достигает максимальной величины. Что приводит к резкому снижению температуры поверхности вала. Также во время охлаждения вала объем проточной воды, постоянно находящийся между проводкой и валом, поглощает паровые пузыри. Данное явление, по мнению авторов

исследования [57], является причиной отсутствия кипения на поверхности валка.

В зонах ϕ_2 и ϕ_4 валок подвергается излучению от прокатываемого металла ($Q_{\text{л}}$) и отдает тепло конвекцией ($Q_{\text{к}}$) окружающей среде (воздуху). В силу незначительных теплообменных процессов, авторы принимают поверхности в зонах ϕ_2 и ϕ_4 практически термоизолированными, т.е. в этих зонах изменение температуры равно нулю.

В зоне ϕ_1 контакта валка и прокатываемого металла происходит ряд сложных явлений: пластическая и упругая деформации металла, упругая деформация валка, проскальзывание, эффект вращения, трение, термическое сопротивление окисления и др. Влияние каждого из этих явлений оценить затруднительно, поэтому авторы только указывают на то, что температура точки на поверхности валка увеличивается от момента ее контакта с прокатываемым металлом и до момента отрыва данной точки от обрабатываемого металла. При этом в точке отрыва температура поверхности валка максимальна.

В зоне ϕ_5 контакта рабочего и опорного валков температура поверхности валка уменьшается за счет передачи теплового потока от рабочего к опорному валку.

Рассмотрев, таким образом, все зоны поверхности валка авторы [30] задают граничные условия первого рода $T(\phi)$. Так как необходимо решать уравнение теплопроводности для вращающейся системы, авторы работ [30] закладывают условие вращения в граничное условие. Таким образом, авторы [30] формулируют математическую постановку задачи теплового состояния валков и получают дифференциальное уравнение, которое при условиях однозначности дают возможность получить единственное решение, описывающие радиальное нестационарное температурное поле вращающегося валка при горячей прокатке.

Чтобы учесть теплообмен между рабочими и опорными валками и охлаждающей жидкостью и окружающей средой, описанная выше модель

дополнена авторами [32] моделью теплового баланса, в которую входят следующие элементы (тепловые потоки): подведенный тепловой поток от прокатываемого металла ($Q_{\text{под}}$); тепловой поток, отдаваемый охлаждающей жидкости с внешней и внутренней поверхностей ($Q_{\text{охл}}$); тепловой поток, идущий на увеличение энтальпии валка в нестационарном процессе ($Q_{\text{нест}}$); тепловой поток, отдаваемый рабочим валком опорному ($Q_{\text{опорн}}$):

$$Q_{\text{под}} = Q_{\text{охл}} + Q_{\text{нест}} + Q_{\text{опорн}} \quad 1.7$$

где $Q_{\text{под}}$ - подведенный тепловой поток от прокатываемого металла, Дж; тепловой поток, отдаваемый охлаждающей жидкости с внешней и внутренней поверхностей, Дж; $Q_{\text{нест}}$ - тепловой поток, идущий на увеличение энтальпии валка в нестационарном процессе, Дж; тепловой поток, отдаваемый рабочим валком опорному

Авторы [32] предполагают, что при стационарном режиме (вращение отсутствует) и при квазистационарном (длительная прокатка) наблюдается максимальный отвод тепла. При этом система охлаждения валков должна рассчитываться под квазистационарный режим, т.к. рабочие валки уже прогреты и почти весь поток тепла, подводимый к валкам от прокатываемого металла, отводится охлаждающей жидкостью и опорными валками.

Основная часть исследовательских работ сосредоточена на повышение точности моделирования для узких областей, в данном случае для конкретных видов станов горячей прокатки на основе статистической обработки и анализе экспериментальных данных (температурных условий прокатки).

В последнее десятилетие в сортаменте ШСП, в технологии прокатки и в конструкции систем охлаждения валков произошли изменения, что подтолкнуло к развитию и совершенствованию математических моделей теплового состояния прокатных валков. Среди изменений в широкополосном прокатном производстве можно выделить следующие преобразования:

- рост силовых и тепловых нагрузок на валки, вследствие увеличения в составе программ прокатки доли тонких и особо тонких полос, которые обычно производились на станах холодной прокатки;

- внедрение систем подачи технологической смазки в рабочих клетях чистовых групп ШСП (наличие смазочного материала повлияло на теплообменные процессы между валками, полосой и охлаждающей жидкостью);

- реконструкция систем охлаждения валков ШСП, изменение конструкций форсунок для подачи воды на валки.

Использование таких моделей с целью разработки рекомендаций для стабилизации теплового состояния валков и повышения эффективности их охлаждения затруднено из-за отсутствия значений теплофизических коэффициентов (коэффициенты теплопередачи), которые обуславливают интенсивность теплообмена между полосой, валком и охладителем.

Так в работе [29,59,60] по стабилизации тепловых профилей валков было предложено в базовой методике расчета теплового состояния валков взамен принятия минимальной температуры как равной температуре охлаждающей жидкости следующее выражение:

$$t_{\text{мин}} = k_{\alpha} * t_{\text{охл}}, \quad 1.8$$

где k_{α} – «коэффициент эффективности конвективного теплообмена», т.е. параметр адаптации модели теплового режима. В последующем авторы [29,59,60] выводят из системы уравнений теплового баланса выражение для расчета среднеинтегральной температуры поперечного сечения бочки валка.

$$t_p = \frac{k_{\alpha} * t_{\text{охл}} * \varphi_3 + k * t_{\text{п}} * (\varphi_1 + (\varphi_2 + \varphi_4) / 2)}{\varphi_1 + \varphi_3 + (\varphi_2 + \varphi_4) / 2}, \quad 1.9$$

где $t_{\text{п}}$ – средняя температуры полосы в очаге деформации; k – коэффициент, учитывающий термическое сопротивление в окалине, разделяющей поверхности полосы и валков в очаге деформации; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – углы захвата полосы (очаг деформации), углы водоотсекателей, охлаждаемой части бочки соответственно, град. Преимуществом данной модели является

то, что с помощью одной формулы можно исследовать влияние основных технологических факторов на тепловое состояние рабочих валков.

Авторы работ [29,59,60] описанную выше модель дополняют моделью теплового баланса рабочих и опорных валков двумя уравнениями.

$$Q_p - Q_{\text{охл.р.}}^{\text{вх}} - Q_{\text{охл.р.}}^{\text{вых}} - Q_{\text{оп}} = 0; \quad 1.10$$

$$Q_{\text{оп}} - Q_{\text{охл.оп.}} - Q_{\text{окр.оп}} = 0,$$

где Q_p - количество теплоты, переданное в рабочий валок от полосы через контакт и частично радиационным теплообменом, Дж; $Q_{\text{охл.р.}}^{\text{вх}}$ и $Q_{\text{охл.р.}}^{\text{вых}}$ - количество теплоты, отведенное от рабочего валка охладителем с входной и выходной сторон клетки соответственно, Дж; $Q_{\text{оп}}$ - количество теплоты, полученное опорным валком от рабочего путем контактного теплообмена; $Q_{\text{охл.оп.}}$ - количество теплоты, отведенное от опорного валка охлаждающей жидкостью, Дж; $Q_{\text{окр.оп}}$ - количество теплоты, переданное от опорного валка в окружающую среду, Дж.

Усовершенствованная модель теплового состояния рабочих валков [29] с помощью выражения (1.9) упрощает решение задач оптимизации и рационализации режимов эксплуатации рабочих валков и систем охлаждения валков на ШСГП.

Главным же недостатком данной модели является сложность определения коэффициента k_α для конкретных условий ШСГП.

Наибольшую трудность в применении моделей теплового состояния рабочих валков составляет определение значений коэффициентов теплопередачи.

Так в работах [29,59,60] на основе промышленного эксперимента было составлено регрессионное уравнение для определения коэффициента теплопередачи от рабочего валка охладителю при прокатке в чистой группе клеток на ШСГП 2000 ЧерМК:

$$\alpha_{1p} = 1050 \frac{V_i}{V_{min}} + 21100 \frac{p_{\text{охл}}}{p_{min}} - 100 \left(\frac{V_i}{V_{min}} \right)^2 - 7100 \left(\frac{p_{\text{охл}}}{p_{min}} \right)^2 - 14590, \quad 1.11$$

где V_i – расход охладителя, подаваемого на единицу площади вала в единицу времени, $\text{м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$; V_{min} – минимальная плотность облива, $\text{м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$; p_{min} – минимальное давление в системе охлаждения, ати; $p_{охл}$ – давление в системе охлаждения, ати.

Коэффициент теплопередачи, характеризующий передачу тепла при контакте рабочего вала с полосой в данных работах [29,59,60,61,62] определяли по следующей зависимости:

$$\alpha_{1p} = 56600 \left(\frac{p_{cp}}{p_{cp,мин}} \right) - 14900, \quad 1.12$$

где p_{cp} – среднее контактное напряжение в очаге деформации, МПа; $p_{cp,мин}$ – минимальное значение контактного напряжения в очаге деформации, МПа.

Недостатком данного метода является то, что регрессионные модели получены на основе высокотратного промышленного эксперимента для стана ШСГП 2000 ЧерМК и в нем не учитываются тип и особенности программ прокатки на стане (состав программы прокатки, технологические параметры).

Развитие вычислительных машин позволило рассчитывать тепловые задачи с учетом множества условий с большей точностью. Однако они до сих пор остаются затратными в плане нагрузки на вычислительное оборудование. С.В. Гейном в 2003 году предложен для расчета различных дифференциальных уравнений метод независимых потоков [63]. Расчет тепловых потоков по каждому из пространственных направлений выполняется независимо, что позволяет легко параллельно распределять алгоритм. По этой причине такой способ составления алгоритма решения на ЭВМ называется методом независимых потоков.

1.5 Анализ методов прогнозирования технологических параметров прокатки

Значительное влияние на тепловое состояние рабочих валков оказывают технологические параметры, в частности деформационно-

скоростные параметры прокатки, которые в свою очередь зависят от толщины полосы перед чистовой группой ШСГП.

Определение толщины полосы перед чистовой группой клетей промежуточного раската. В работе [64,65,66] для повышения точности расчета использовали суммарный коэффициент обжатия в чистовой группе:

$$\eta_{\Sigma F} = h_p/h_k, \quad 1.13$$

где h_p - толщины полосы перед чистовой группой, мм; h_k – толщина полосы на выходе из чистовой группы клетей, мм.

В алгоритме коэффициент суммарного обжатия рассчитывается по формуле суммарного коэффициента $\eta_{\Sigma F}$ в зависимости от числа задействованных клетей в чистовой группе стана.

Толщину полосы перед чистовой группой клетей в работах [65,66] определяли с помощью следующих зависимостей при различных количествах задействованных клетей (N_F):

$$\begin{cases} \eta_{\Sigma 7} = 0,0925 \cdot \sigma_0^{-0,356} \beta_L^{-1,0277} \beta_{bh}^{0,9631} & \text{при } N_F = 7; \\ \eta_{\Sigma 6} = 0,0303 \cdot \sigma_0^{-0,0498} \beta_L^{-0,9896} \beta_{bh}^{0,9158} & \text{при } N_F = 6; \\ \eta_{\Sigma 5} = 0,0038 \cdot \sigma_0^{0,4814} \beta_L^{-0,9103} \beta_{bh}^{0,8713} & \text{при } N_F = 5, \end{cases} \quad 1.14$$

где σ_0 – базовое сопротивление деформации при $\xi=1 \text{ с}^{-1}$, $\varepsilon = 0,1$, $t=1000^\circ\text{C}$; $\beta_L = b_p/L_p$ – коэффициент использования бочки валка (b_p – ширина полосы, L_p – длина бочки рабочего валка); $\beta_{bh} = b_k/h_k$ – коэффициент, равный отношению ширины проката к толщине проката.

В первом приближении толщина полосы после черновой группы клетей определяется как произведение конечной толщины готовой полосы на рассчитанное значение коэффициента $\eta_{\Sigma F}$ и проверяется на возможность прокатки в чистовой группе стана. Если $h_p > [h_p]_{max}$, принимается $h_p = [h_p]_{max}$, а при $h_p < [h_p]_{min}$ принимается $h_p = [h_p]_{min}$. Здесь $[h_p]_{min}$ и $[h_p]_{max}$ - минимально и максимально допустимые толщины полос после черновой группы клетей.

Анализ работ показывает, что интервал рассеяния погрешности находится в интервале до $\pm 15\%$.

Расчет обжатий в чистовой клетке. Для выбора режима обжатий широко используется метод Имаи [67]. В этом методе режим обжатий рассчитывается из условия обеспечения заданной загрузки главных приводов. Рассчитываются абсолютные обжатия в клетях чистовой группы по следующей формуле:

$$h_{1i} = \frac{h_p h_k}{im \sqrt{\beta_{Wi} h_p^{im} + (1 - \beta_{Wi}) h_k^{im}}}, \quad 1.15$$

где $im = 0,30 + \frac{0,21}{h_k}$ коэффициент Имаи; β_{Wi} – коэффициенты использования мощности главных приводов:

$$\beta_{Wi} = \frac{\sum_{j=1}^{j=i} W_j}{\sum_{i=1}^{i=N_F} W_i},$$

W_i - мощность, необходимая для прокатки в i -й клетке, кВт.

В работах [68,69] д.т.н., профессором М.И. Румянцевым доработан метод Имаи определения обжатий в чистовых группах клеток ШСГП. В данных работах [68,69] были исследованы распределения коэффициентов β_{Wi} в зависимости от толщин прокатываемых полос. Также распределение коэффициентов β_{Wi} было аппроксимировано относительно номера клетки i .

$$\beta_{Wi} = a_0 + a_1 i + a_2 i^2, \quad 1.16$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты регрессии зависимости β_{Wi} при различном числе задействованных клеток при прокатке.

Коэффициенты регрессионного уравнения (1.16) для различных вариантов прокатки в чистовой группе клеток приведены в таблице 1.2. Алгоритм расчета обжатий методом Имаи с учетом дополнений описанных в работах [69] представлен на рисунке 1.6.

Таблица 1.2 - Фактические распределения коэффициентов загрузки приводов чистовых клетей ШСГП при прокатке полос различной толщины [69]

Вариант	Толщина полосы, мм	N_F	Клей						
			F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
1	1,2-2,5	7	0,19	0,32	0,52	0,67	0,81	0,92	1,00
2	2,6-5,0	7	0,17	0,34	0,49	0,65	0,78	0,89	1,00
3	5,1-8,0	6	0,19	0,35	0,52	0,68	0,84	1,00	-
4	8,1-12,0	6	0,16	0,30	0,47	0,62	0,80	1,00	-
5	8,1-12,0	5	0,18	0,36	0,57	0,75	1,00	-	-
6	Св. 12,1	5	0,17	0,33	0,52	0,71	1,00	-	-

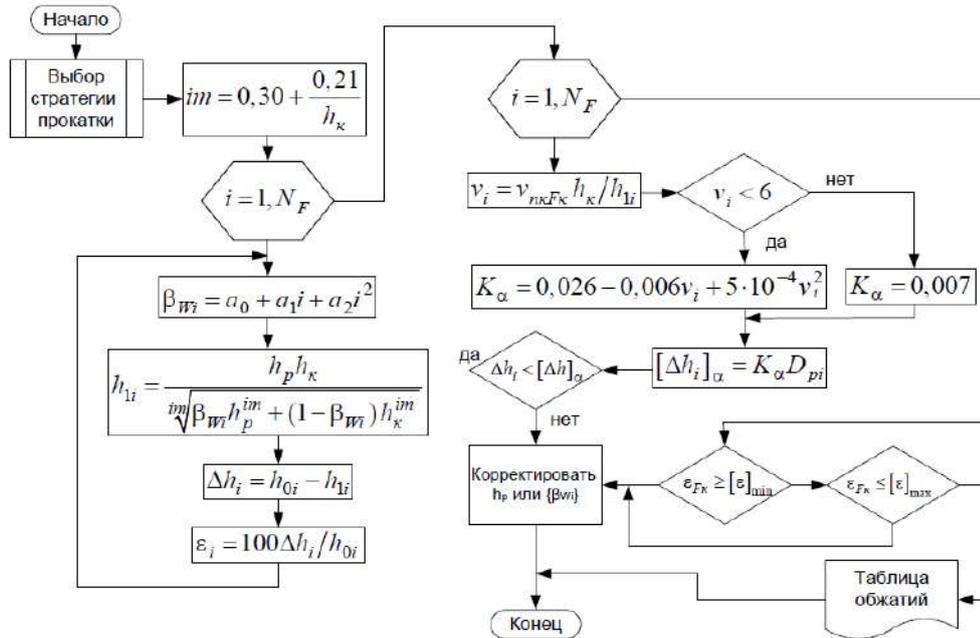


Рисунок 1.6 - Алгоритм расчета обжатий в чистой группе клетей ШСГП 2000 [69]

Толщина полосы после прокатки в черновой группе клетей и обжатия в чистой группе клетей по данным методам определяется с помощью регрессионных зависимостей. Однако база данных, формируемая современными АСУТП станов, достигает значительных объемов по различным значениям параметров прокатки (например, 1 378 000 значений структурированных данных за месяц работы ШСГП 2000 ПАО «ММК»). Для прогнозирования технологических параметров (обжатий) предлагается разработать и использовать ИНС, так как их применение по сравнению с другими методами статистической обработки данных позволяет эффективно работать с большими объемами данных.

1.6 Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования и определения параметров процесса прокатки

С начала 2000-х постепенно возрастает доля использования искусственных нейронных сетей для прогнозирования и моделирования различных процессов, в том числе при описании процессов, протекающих при широкополосной горячей прокатке.

С помощью ИНС моделируют множество процессов горячей прокатки. В литературе встречаются искусственные нейронные сети, моделирующие гидросбив при горячей полосовой прокатке сталей [70]. С использованием ИНС моделируют напряжения пластического течения [71], прогнозируют энергосиловые параметры горячей прокатки [72,73,74,75], предсказывают механические свойства полосы после горячей прокатки [76,77], твердость полосы [79]. В работах [78,80, 81] ИНС используют для оптимизации захвата полосы и для определения теплового расширения рабочего вала.

В работе [82] для прогнозирования распределения температур в валке и слябе, полей напряжений и деформаций и скорости деформации используют обученную ИНС на данных, полученных в результате расчетов по модели, созданной на основе метода конечных элементов. Недостатком такого использования ИНС является ее обучение на аналитических данных, а не на эмпирических, что снижает точность такой ИНС.

Рациональным способом использования ИНС является определение коэффициентов теплопередачи для моделей тепловых процессов при горячей прокатке. В литературе встречаются работы по определению коэффициентов теплопередачи с помощью ИНС [83,84], но среди них практически нет исследований по определению теплофизических коэффициентов в системе «полоса-валок» при горячей прокатке.

Определение теплофизических коэффициентов для моделирования процессов в системе «полоса-валок» с помощью ИНС позволит повысить точность расчетов теплового состояния рабочих валков и является актуальной задачей.

Таким образом, несмотря на многолетние исследования тепловых процессов в системе «полоса-валок» множество вопросов в данной области остаются не изученными. В частности, остаются открытыми следующие моменты: определение коэффициентов теплопередачи в системе «полоса-валок» и определение рациональных режимов охлаждения в зависимости от содержания программ прокатки на стане. Значительное влияние на тепловое состояние рабочих валков оказывают технологические параметры, в частности деформационно-скоростные параметры прокатки. Поэтому для прогнозирования технологических параметров (обжатий) предлагается использовать ИНС, так как их применение по сравнению с другими методами статистической обработки данных позволяет эффективно работать с большими объемами данных.

1.7 Постановка цели и задач исследования

Рабочие валки это основной инструмент, эксплуатационные характеристики которого оказывают влияние на производительность ШСГП и качество продукции. Стойкость валков - составная часть себестоимости произведенной продукции. Рабочие валки чистовой группы клетей ШСГП составляют существенную долю в оборотных средствах листопрокатных цехов. Поэтому исследования, направленные на повышение стойкости рабочих валков являются актуальными.

При горячей прокатке рабочие валки подвергаются значительным перепадам температур. При больших температурах снижается прочность рабочего слоя валка, возникает интенсивный разгар поверхности валков, который значительно снижает стойкость при перешлифовке валков в межперевалочный период [85].

Снижение уровня термических напряжений и соответственно повышение его стойкости по показателю «удельный расход» может быть достигнуто в результате внедрения рациональных режимов охлаждения валков и рациональных изменений в конструкции коллекторов охлаждения валков.

Для настройки рационального теплового состояния рабочих валков необходимо исследовать его тепловое состояние при широкополосной горячей прокатке. Обзор существующих исследований позволил выявить, что при описании теплового состояния рабочих валков на основе известных теоретических подходов необходимо знать коэффициенты теплопередачи в системе «полоса-валок» и постоянно адаптировать их под изменяющиеся условия производства ШСП. Значения коэффициентов теплопередачи задаются, исходя из литературных данных, подбираются или определяются с использованием специальных стендов, дорогостоящего оборудования и высокотратных промышленных экспериментов. Сортамент горячекатаных полос постоянно изменяется (по химическому составу и геометрическим параметрам), поэтому проведение дорогостоящих испытаний не является целесообразным решением. Поэтому необходимо искать новые альтернативные решения, позволяющие определять (прогнозировать) теплофизические коэффициенты, без проведения дорогостоящих и длительных испытаний. Одним из таких решений может быть использование искусственных нейронных сетей (ИНС).

Целью настоящей работы является разработка и научное обоснование путей повышения стойкости рабочих валков широкополосных станов горячей прокатки на основе моделирования деформационных режимов и теплового состояния в системе «полоса-валок» с использованием искусственных нейронных сетей.

Научно-технические задачи диссертационного исследования:

1. Изучить влияние технологических параметров процесса широкополосной горячей прокатки на тепловое состояние рабочих валков. С помощью статических методов и ИНС построить модели прогнозирования наиболее значимых технологических параметров.
2. Разработать модель расчета теплового состояния рабочих валков на основе математического описания деформационных режимов и теплового состояния

в системе «полоса-валок». Произвести адаптацию разработанной модели к условиям действующего производства.

3. Произвести теоретические исследования влияния технологических факторов на изменение теплового состояния рабочих валков, а также разработать рекомендации для его регулирования в процессе прокатки.

4. Разработать и внедрить новые научно-технические и технологические решения, направленные на повышение стойкости рабочих валков широкополосных станов горячей прокатки.

2 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЧИСТОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ ШСГП

Вторая глава посвящена определению и прогнозированию факторов, влияющих на тепловое состояние рабочих валков и соответственно их профиль в чистой группе клеток широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП).

Для оценки и прогнозирования теплового состояния рабочих валков и полосы при прокатке необходимо с достаточной точностью (со средней абсолютной ошибкой не более 15%) определять параметры горячей прокатки: температуры полосы в клетях, скорости прокатки, обжатия в клетях, число задействованных клеток для прокатки конкретного сортамента, паузы прокатки.

Данные параметры, для решения поставленных задач (глава 1), необходимо определять до непосредственного начала процесса прокатки в чистой группе ШСГП.

2.1 Статистическая оценка технологических факторов, влияющих на конечную температуру рабочих валков

Произведена статистическая оценка технологических факторов, влияющих на конечную температуру рабочих валков ($T_{\text{раб}}$, °С) в чистой группе клеток на примере ШСГП 2000 ПАО «ММК». Температура замерялась по центру валков после их вывалки из клетки по завершению прокатной программы. Замерялась с помощью инфракрасного пирометра TI213EL с ошибкой ± 2 °С, поверенного контактным пирометром.

В качестве факторов, влияющих на конечную температуру рабочих валков после их вывалки, были отобраны: сортament программы прокатки (количество [n, шт.], усредненная ширина полос [$b_{\text{ср}}$, мм], средняя длина [$L_{\text{ср}}$, м] и средний вес полос [$W_{\text{ср}}$, т]), пауза [$t_{\text{пср}}$, с] (средняя пауза для всех прокатанных полос), скорость прокатки в клетях (средняя скорость прокатки в клетях, [$V_{\text{ср}}$, м/с]), температуры полосы перед клетью №7 и после - №13 [$T_{7п}$, $T_{13п}$, °С], средние обжатия в данной клетях чистой группы [$\varepsilon_{\text{ср}}$, %],

радиус валка $[r, \text{мм}]$, температуры охладителя в системе охлаждения $[T_{\text{охл}}, \text{°C}]$ (температура воды в менялась в зависимости от времени года – 30...35°C зимой, 36...43°C летом). Расход охладителя в клетях не учитывался т.к. на протяжении всей программы прокатки он не изменяется.

Данные для составления корреляционной матрицы были выгружены из базы данных цехового учета технологических параметров прокатки. Температура рабочих валков чистовой группы на ШСГП 2000 ПАО «ММК» после их вывалки выборочно измерялась 2...3 раза неделю в 2018-2019 гг.

В таблицах 2.1-2.3 представлены полученные корреляционные матрицы влияния факторов на температуру верхних рабочих валков клетей №7, 8, 13 чистовой группы стана [86]. Согласно матрице определено (значимый коэффициент корреляции на уровне $p < 0,07$), что наибольший вклад вносят следующие факторы: сортамент полос программы прокатки, температура полосы во время прокатки ($T_{\text{пол}}, \text{°C}$), паузы во время прокатки ($t_{\text{п}}, \text{с}$), скорость прокатки ($V_{\text{пр}}, \text{м/с}$) (которая в свою очередь зависит от обжатий в клети), температуры охладителя ($T_{\text{охл}}, \text{°C}$).

Таблица 2.1 – Корреляционная матрица влияния факторов на температуру верхнего рабочего валка в клети №7 чистовой группы ШСГП 2000

	$T_{7\text{раб}}$	n	$b_{\text{ср}}$	$L_{\text{ср}}$	$W_{\text{ср}}$	$t_{\text{пер}}$	$V_{\text{ср}}$	$T_{7\text{п}}$	$\epsilon_{\text{ср}}$	r	$T_{\text{охл}}$
$T_{7\text{раб}}$	1	0,43	0,46	0,53	0,21	-0,77	-0,64	0,76	0,13	x	-0,67
n	0,43	1	0,63	0,39	0,47	0,51	0,22	0,11	x	0,09	x
$b_{\text{ср}}$	0,46	0,63	1	0,20	0,04	x	x	x	0,19	x	x
$L_{\text{ср}}$	0,53	0,39	0,20	1	0,26	-0,33	0,23	x	x	x	x
$W_{\text{ср}}$	0,21	0,47	x	0,26	1	0,27	0,16	x	x	x	x
$t_{\text{пер}}$	-0,77	0,51	x	-0,33	0,27	1	-0,11	0,27	0,23	x	x
$V_{\text{ср}}$	-0,64	0,22	x	0,23	0,16	-0,11	1	x	0,08	x	x
$T_{7\text{п}}$	0,76	0,11	x	x	x	0,27	x	1	x	x	x
$\epsilon_{\text{ср}}$	0,13	x	0,19	x	x	0,23	0,08	x	1	x	x
r	x	0,09	x	x	x	x	x	x	x	1	x
$T_{\text{охл}}$	-0,67	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1

x – отмечены не значимые коэффициенты

Таблица 2.2 – Корреляционная матрица влияния факторов на температуру верхнего рабочего валка в клети №8 чистовой группы ШСГП 2000

	$T_{8раб}$	n	$b_{ср}$	$L_{ср}$	$W_{ср}$	$t_{пср}$	$V_{ср}$	$T_{7п}$	$\epsilon_{ср}$	r	$T_{охл}$
$T_{8раб}$	1	0,56	0,41	0,43	0,26	-0,69	-0,66	0,79	0,10	x	-0,55
n	0,56	1	0,51	0,42	0,42	0,48	0,25	x	x	0,12	x
$b_{ср}$	0,41	0,51	1	0,18	0,04	x	x	x	0,21	x	x
$L_{ср}$	0,43	0,42	0,18	1	0,28	-0,36	0,26	x	x	x	x
$W_{ср}$	0,26	0,42	x	0,28	1	0,34	x	x	x	x	x
$t_{пср}$	-0,69	0,48	x	-0,36	0,34	1	-0,15	0,16	0,21	x	x
$V_{ср}$	-0,66	0,25	x	0,26	x	-0,15	1	x	0,14	x	x
$T_{7п}$	0,79	x	x	x	x	0,16	x	1	x	x	x
$\epsilon_{ср}$	0,10	x	0,21	x	x	0,23	0,14	x	1	x	x
r	x	0,12	x	x	x	x	x	x	x	1	x
$T_{охл}$	-0,55	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1

x – отмечены не значимые коэффициенты

Таблица 2.3 – Корреляционная матрица влияния факторов на температуру верхнего рабочего валка в клети №13 чистовой группы ШСГП 2000

	$T_{13раб}$	n	$b_{ср}$	$L_{ср}$	$W_{ср}$	$t_{пср}$	$V_{ср}$	$T_{7п}$	$\epsilon_{ср}$	r	$T_{охл}$
$T_{13раб}$	1	0,45	0,33	0,36	0,31	-0,57	-0,58	0,82	0,16	x	-0,37
n	0,45	1	0,39	0,39	0,34	0,44	0,16	x	x	x	x
$b_{ср}$	0,33	0,39	1	x	x	x	0,15	x	0,22	x	x
$L_{ср}$	0,36	0,39	x	1	0,25	-0,46	0,24	x	x	x	x
$W_{ср}$	0,31	0,34	x	0,25	1	0,26	x	x	x	x	x
$t_{пср}$	-0,57	0,44	x	-0,46	0,26	1	-0,14	0,21	0,24	x	x
$V_{ср}$	-0,58	0,16	0,15	0,24	x	-0,14	1	x	0,18	0,16	x
$T_{7п}$	0,82	x	x	x	x	0,21	x	1	x	x	x
$\epsilon_{ср}$	0,16	x	0,22	x	x	0,24	0,18	x	1	x	x
r	x	x	x	x	x	x	0,16	x	x	1	x
$T_{охл}$	-0,37	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1

x – отмечены не значимые коэффициенты

Также определено, что при прокатке полос одного сортамента в разные временные промежутки наблюдается разброс значений технологических параметров: толщина полосы на входе в чистовую группу клетей (рис. 2.1) и соответственно разброс по обжатиям и скоростям прокатки в определенной клети чистовой группы ШСГП.



а



б

Рисунок 2.1 – Разброс значений толщины полос перед чистовой группой клетей на стане ШСГП 2000 ПАО «ММК» (за май 2018 г.):

- а – на оси ординат количество наблюдений показано в полном объеме;
- б – количество наблюдений урезано до 1000 шт.

По гистограммам видно, что наибольшее количество полос перед чистовой группой стана обладают толщиной 32,4 мм (10000 шт.). Диапазон отклонения толщины полосы составляет от 29,0 мм (10 шт.) до 53,2 (1 шт.). Значительный разброс и выбросы (89 шт. полос с толщиной 48,1 мм) объясняется технологией прокатки на ШСГП, в которой толщина полосы

перед чистой группой клетки варьируется в зависимости от конечной толщины проката.

2.2 Подготовка данных для статической обработки и обучения нейронных сетей

При решении поставленной задачи, определение технологических параметров широкополосной горячей прокатки, были использованы методы статистической обработки данных и нейронного сетевого моделирования.

В работе для прогнозирования технологических параметров (количество задействованных клеток, толщина полосы перед входом в чистовую группу клеток, обжатия) используются обобщенно регрессионные нейронные сети. Обучение и построение нейронной сети реализовано с помощью библиотеки «PyTorch» интерпретируемого языка программирования «Python».

Обучение ИНС проводилось на данных, полученных из баз данных учета технологических параметров ШСГП 2000 ПАО «ММК». Обучение проводилось на выборке собранной за период продолжительностью в два года работы стана (01.01.2017-01.01.2019 гг.).

Подготовка обучающего набора является трудоемким процессом, от которого зависит как скорость обучения, так и качество работы нейронных сетей. В процессе построения ИНС для улучшения набора исходных переменных применяется два основных метода: нормировка и фильтрация данных. При нормировке приводят значения переменных к безразмерным. В методе ИНС нормировка производится автоматически. Фильтрация выполняется для «зашумленных» данных. В данном исследовании отсев грубых погрешностей проводился на основе критерия Титъена-Мура на 5 и 10% уровнях с помощью инструментов библиотеки Pandas в среде разработки Jupyter Notebook интерпретируемого языка программирования Python. Подозрительное наблюдение считается выбросом (промахом) и исключается из дальнейшего анализа, если выполняется условие [87]:

$$K_{TM} > \sum_{i=1}^{n-k} X_i - \bar{X}^* / \sum_{i=1}^n X_i - \bar{X} ,$$

где $\overline{X^*}$ – среднее значение по выборке, исключая подозрительное значение;
 X – среднее значение по выборке, включая подозрительное значение.

2.3 Прогнозирование толщины полосы перед чистовой группой клетей с помощью искусственной нейронной сети

Для повышения точности определения толщины полосы перед чистовой группой клетей модифицировали способ, приведенный в работах профессора Румянцева [64,65] (основанный на способе Имаи [67]), в котором при расчете используется суммарный коэффициент обжатия в чистовой группе $\eta_{\text{сум}} = h_p/h_k$. В данной работе предложено определять коэффициент суммарного обжатия с помощью ИНС.

Архитектура ИНС представляет собой многослойный персептрон. В качестве функции активации используется функция «ReLU» (таблица 2.4) [88,90].

Определять коэффициент суммарного обжатия ($\eta_{\text{сум}}$) предложено с помощью нейросетевой модели. Для определения толщины полосы перед чистовой группой клетей (h_p) разработан алгоритм, представленный на рисунке 2.2.

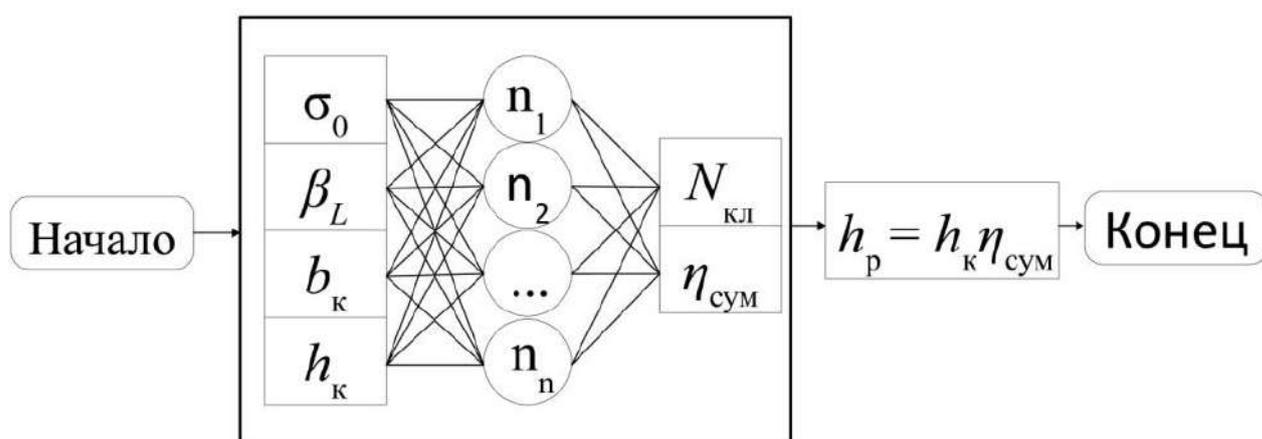


Рисунок 2.2 - Алгоритм определения толщины полосы перед чистовой группой клетей (h_p) с помощью нейросетевой модели: σ_0 - базовое сопротивление деформации, МПа для условия $\xi=1 \text{ c}^{-1}$, $\varepsilon=0,1$, $t=1000^\circ\text{C}$; $\beta_L = b_p/L_p$ - коэффициент использования бочки вала, где $b_p = b_k$ - ширина полосы, мм; L_p - длина бочки рабочего вала, мм, b_k = ширина проката на выходе из чистовой группы клетей, мм; $N_{\text{кл}}$ - количество задействованных в процессе прокатки клетей

Таблица 2.4 - Параметры ИНС

Архитектура ИНС	Входной слой: 4 нейрона Скрытый слой: 9 нейронов Выходной слой: 2 нейрона
Функция активации	Relu
Режим обучения	«обучение по шагам»
Степень распознавания обучающего множества, %	98,1
Степень распознавания тестового множества, %	92,5
Средняя относительная ошибка, %	4,7
Максимальная относительная ошибка, %	19,1

На рисунке 2.3 приведено сравнение прогнозируемых и фактических значений толщины полосы перед чистовой группой клетей в виде графика. Коэффициент достоверности аппроксимации ($R^2 = 0,936$) показывает достаточно высокую сходимость.

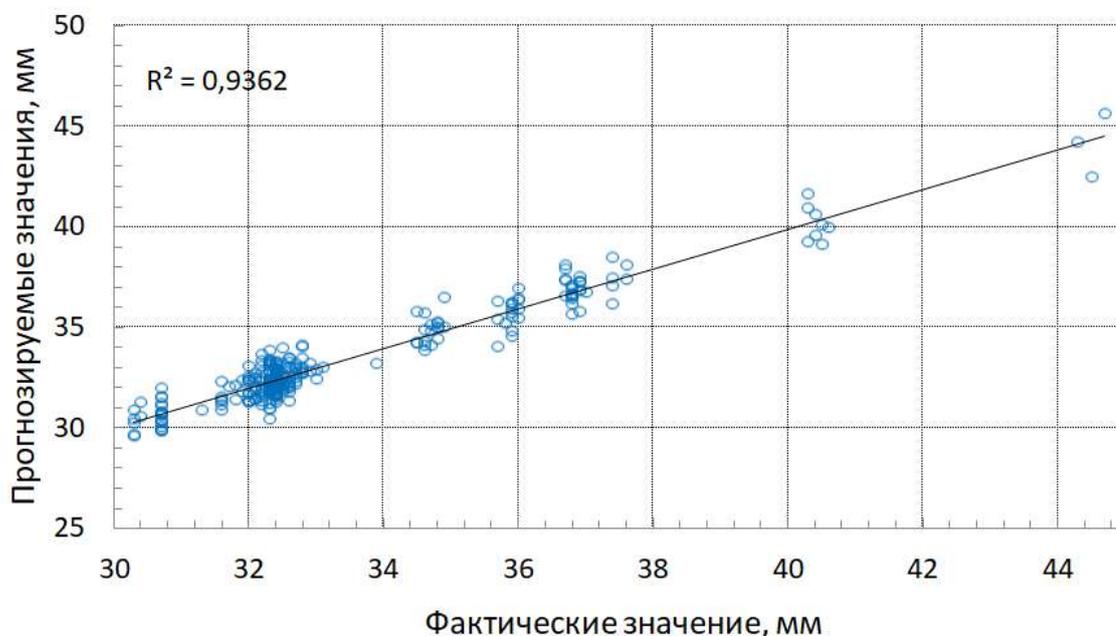


Рисунок 2.3 - Прогнозируемые и фактические значения толщины полосы перед чистовой группой клетей (сравнение приведено для 10 программ прокатки)

2.3 Прогнозирование обжатий в чистой группе широкополосного стана горячей прокатки с помощью искусственной нейронной сети

Для определения обжатий в чистовых группах клетей ШСГП в работе модифицируются известные методы [64,65,66,67,69].

Для расчета обжатий используется метод Имаи (2.1):

$$h_{1i} = \frac{h_p h_k}{\sqrt[im]{\beta_{W_i} h_p^{im} + (1 - \beta_{W_i}) h_k^{im}}}, \quad (2.1)$$

где h_{1i} – абсолютное обжатие в i -й клетки; $im = 0,30 + \frac{0,21}{h_k}$ – коэффициент

Имаи; $\beta_{W_i} = \sum_{j=1}^{j=i} W_j / \sum_{i=1}^{i=N_F} W_i$ – коэффициенты использования мощности главных приводов; W_i – мощность, необходимая для прокатки в i -й клетки.

Прогнозирование обжатий в чистой группе клетей ШСГП реализуется при помощи алгоритма, представленного на рисунке 2.4. Архитектура полученной нейросетевой модели (многослойный персептрон), входящей в алгоритм определения обжатий представлена в таблице 2.5 [88,90].

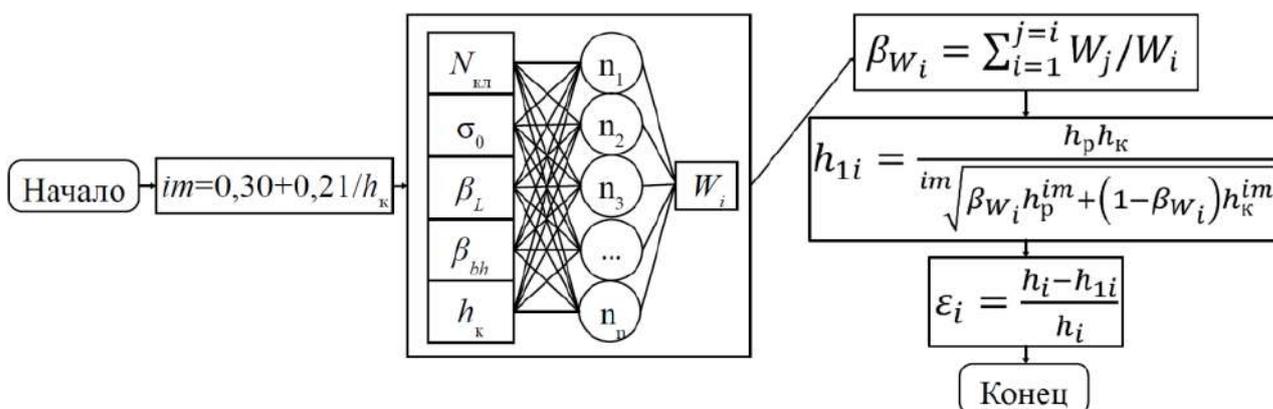


Рисунок 2.4 – Алгоритм определения обжатий в чистой группе клетей ШСГП: h_{1i} – абсолютное обжатие в i -й клетки; im – коэффициент Имаи; β_{W_i} – коэффициенты использования мощности главных приводов; W_i – мощность, необходимая для прокатки в i -й клетки.

На рисунке 2.5 приведено сравнение прогнозируемых и фактических значений абсолютных обжатий в чистой группе клетей ШСГП 2000 ПАО «ММК» в виде графика. Коэффициент достоверности аппроксимации для

выборки по 3 программ прокатки (монтажей) составил $R^2 = 0,993$, что говорит о достаточно высокой сходимости полученной нейросетевой модели.

Таблица 2.5 - Параметры ИНС

Архитектура ИНС	Входной слой: 5 нейронов Выходной слой: 7 нейронов Скрытый слой: 11 нейронов
Активационная функция	Relu
Режим обучения	«обучение по шагам»
Степень распознавания обучающего множества, %	96,1
Степень распознавания тестового множества, %	91,5
Средняя относительная ошибка, %	6,3
Максимальная относительная ошибка, %	12,4

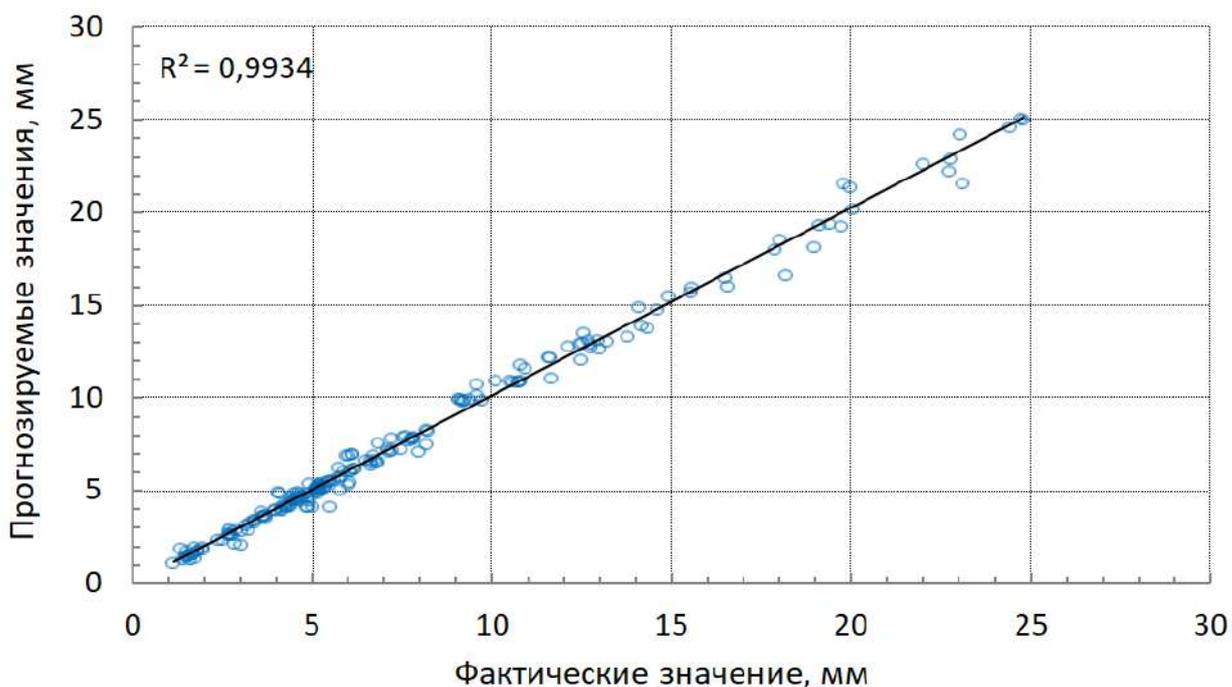


Рисунок 2.5 - Прогнозируемые и фактические значения абсолютных обжатий в чистовой группе клеток (сравнение приведено для 3 программ прокатки №№49169-49171)

2.3 Прогнозирование скоростей прокатки на широкополосном стане горячей прокатки

Скорость прокатки значительно влияет на тепловое состояние рабочих валков. Для определения скоростей прокатки было решено использовать регрессионные линейные зависимости скоростей захвата в зависимости от

толщины готового проката h_k . Следующие формулы для определения скорости захвата полосы $V_{кз}$ в последней клетке чистой группы стана были получены с помощью программы Statistica 6.0 (рис. 2.6) [88,89,90]:

$$V_{кз} = 10,151 + 0,356h_k, \text{ при } h_k \leq 2\text{мм},$$

($F_{расч} = 1127$ больше $F_{крит} = 3,9$, $R^2=0,92$);

$$V_{кз} = 12,512 - 0,704h_k, \text{ при } 2 < h_k \leq 4\text{мм},$$

($F_{расч} = 347$ больше $F_{крит} = 3,9$, $R^2=0,78$);

$$V_{кз} = 17,327 - 1,826h_k, \text{ при } 4 < h_k \leq 6\text{мм},$$

($F_{расч} = 252$ больше $F_{крит} = 3,9$, $R^2=0,72$);

$$V_{кз} = 7,420 - 0,447h_k, \text{ при } 6 < h_k \leq 10\text{мм},$$

($F_{расч} = 1862$ больше $F_{крит} = 3,9$, $R^2=0,95$);

$$V_{кз} = 4,753 - 0,190h_k, \text{ при } 10 < h_k \leq 20\text{мм},$$

($F_{расч} = 912$ больше $F_{крит} = 4$, $R^2=0,96$);

Полученные линейные зависимости статистически значимы по критерию Фишера ($p = 0,05$).

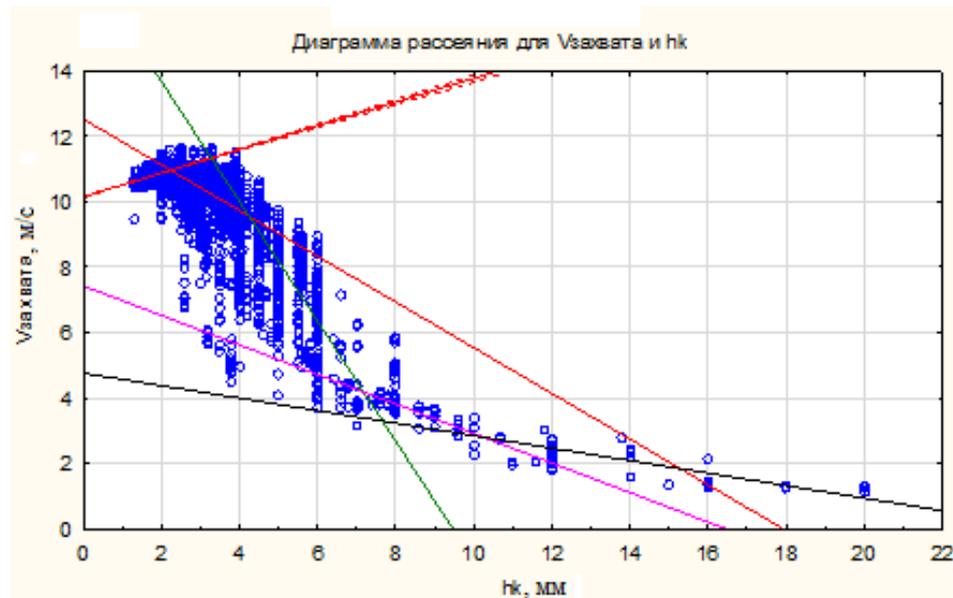


Рисунок 2.6 – Диаграмма рассеяния скоростей захвата в зависимости от конечной толщины полосы

Также, с помощью программного продукта Statistica 6.0 (рис. 2.7) были получены статистические формулы скорости прокатки V_k последней

катающей клетки в зависимости от толщины прокатываемой полосы h_k [88,90]:

$$\begin{aligned} V_k &= 11,580 + 1,593h_k, \text{ при } h_k \leq 2\text{мм}, \\ (F_{\text{расч}} &= 793 \text{ больше } F_{\text{крит}} = 3,9, R^2=0,89); \\ V_k &= 17,603 - 1,755h_k, \text{ при } 2 < h_k \leq 4\text{мм}, \\ (F_{\text{расч}} &= 367 \text{ больше } F_{\text{крит}} = 3,9, R^2=0,79); \\ V_k &= 19,435 - 2,065h_k, \text{ при } 4 < h_k \leq 6\text{мм}, \\ (F_{\text{расч}} &= 418 \text{ больше } F_{\text{крит}} = 3,9, R^2=0,81); \\ V_k &= 8,414 - 0,478h_k, \text{ при } 6 < h_k \leq 10\text{мм}, \\ (F_{\text{расч}} &= 3169 \text{ больше } F_{\text{крит}} = 3,9, R^2=0,97); \\ V_k &= 5,032 - 0,184h_k, \text{ при } 10 < h_k \leq 20\text{мм}, \\ (F_{\text{расч}} &= 2352 \text{ больше } F_{\text{крит}} = 4, R^2=0,98); \end{aligned}$$

Полученные линейные зависимости статистически значимы по критерию Фишера ($p = 0,05$).

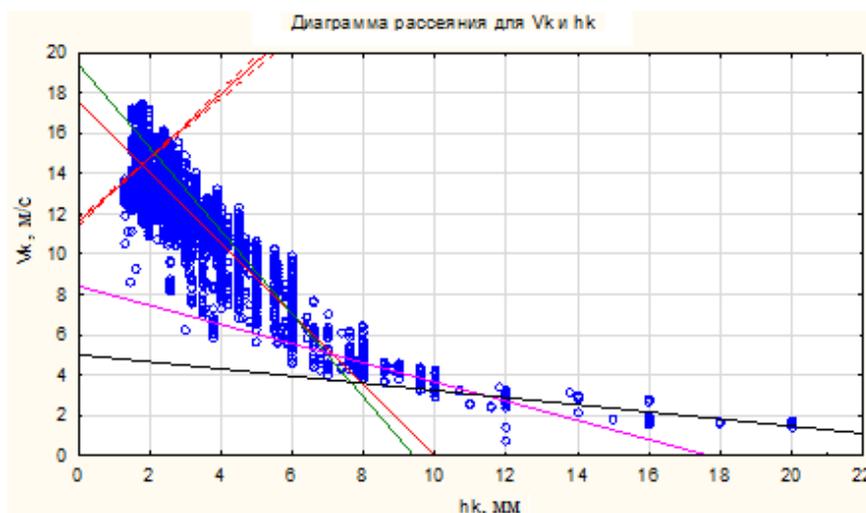


Рисунок 2.7 – Диаграмма рассеяния скоростей прокатки в зависимости от конечной толщины полосы

Указанные аппроксимации были получены на основе обработки массива данных по скоростям прокатки и толщинам прокатанных полос за 12 месяцев работы стана 2000 горячей прокатки ЛПЦ №10 ПАО «ММК» в 2018-2019 году.

В результате был составлен алгоритм расчета скоростей прокатки на последней катающей клетке (рис. 2.8). Скорость прокатки для каждой клетки в чистовой группе стана 2000 горячей прокатки рассчитывается по формуле $V_i = V_k \cdot h_k / h_{1i}$, основанной на законе постоянства секундных объемов деформируемого металла [88,90].

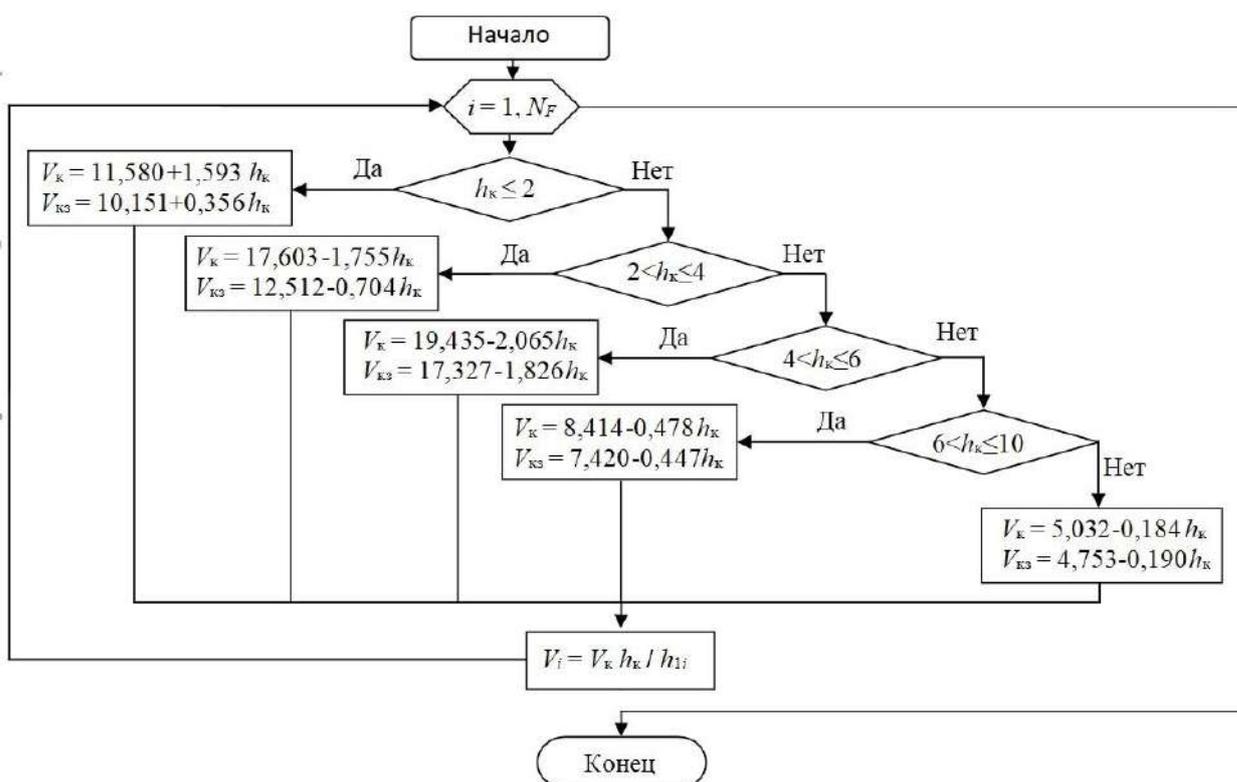


Рисунок 2.8 – Алгоритм расчета скоростей прокатки на стане 2000 г. п. ПАО «ММК».

2.4 Прогнозирование температуры полосы перед чистовой группой клетей

Одним из основных факторов, влияющих на тепловое состояние рабочих валков является температура полосы перед чистовой группой клетей стана T_7 (°C).

В условиях производства для каждого сортамента назначается технологическая карта, в которой прописан рекомендуемый диапазон температур полосы перед входом ее в чистовую группу клетей. Данный диапазон, в условиях производства на стане 2000 г.п. в ПАО «ММК», равен

50 °С, что недостаточно для точного определения и прогнозирования теплового состояния рабочего валка при прокатке.

В работе определять температуру T_7 (°С) решено с помощью регрессионного уравнения, составленного на основе статистического анализа, в ходе которого определены основные факторы, влияющие на температуру полосы [92]. Статистический анализ проведен в программе Statistica 6.0. Корреляционная матрица факторов приведена в таблице 2.6. Стандартное отклонение полученного уравнения (2.2) составило 9,7 °С, а средняя ошибка составила 1,2 %. Критерий Фишера составил $F_{расч} = 664$ ($F_{крит} = 2,4$, для уровня значимости $p=0,05$), $R^2=0,885$, что говорит о статистической значимости регрессионного уравнения.

Таблица 2.6 – Корреляционная матрица основных параметров, влияющих на температуру полосы перед чистовой группой клетей T_7 (°С)

	$T_6, ^\circ\text{C}$	$h_k, \text{мм}$	$b_k, \text{мм}$	$L, \text{м}$
$T_6, ^\circ\text{C}$	1,000000	-0,636887	-0,257933	0,503709
$h_k, \text{мм}$	-0,636887	1,000000	0,199331	-0,706402
$b_k, \text{мм}$	-0,257933	0,199331	1,000000	-0,133975
$L, \text{м}$	0,503709	-0,706402	-0,133975	1,000000

$$T_7 = 418,479 + 0,549 * T_6 - 0,124 * h_k + 0,014 * b_k - 0,034 * L, \quad (2.2)$$

где $T_6, ^\circ\text{C}$ – температура полосы после черновой группы клетей;

$h_k, b_k, \text{мм}$ – конечная толщина и ширина полосы после последней чистовой клетки;

$L, \text{мм}$ – длина полосы после прокатки в чистовой группе клетей.

2.5 Определение пауз прокатки

Определение паузы при широкополосной горячей прокатке является важной задачей для прогнозирования теплового состояния рабочих валков. В ходе исследований зависимости значений пауз от толщины полосы или других факторов выявить не получилось. Поэтому в работе при определении теплового состояния рабочих валков до непосредственно самой прокатки значения пауз определяются по среднему значению. Средние значения пауз

определены по диапазонам толщин полос на выходе из чистовой группы клетей (таблица 2.7) [88,90].

Таблица 2.7 – Значений пауз (с) прокатки на ШСГП 2000 ПАО «ММК»

Толщина полосы на выходе из чистовой группы клетей, мм	1,0-2,0	2,1-4,0	4,1-6,0	6-8,0	8,1-10	10,1-14	14,1-20,0
Среднее значение паузы, с	5,5	6,5	7,0	10,5	13,0	14,0	19,0

2.6 Разработка методики прогнозирования технологических параметров в чистовой группе клетей широкополосного стана горячей прокатки

На основе описанных выше алгоритмов составлена общая методика расчета технологических параметров прокатки (скорость прокатки, режим обжаты и т.д.) (рис. 2.9) [88,90].

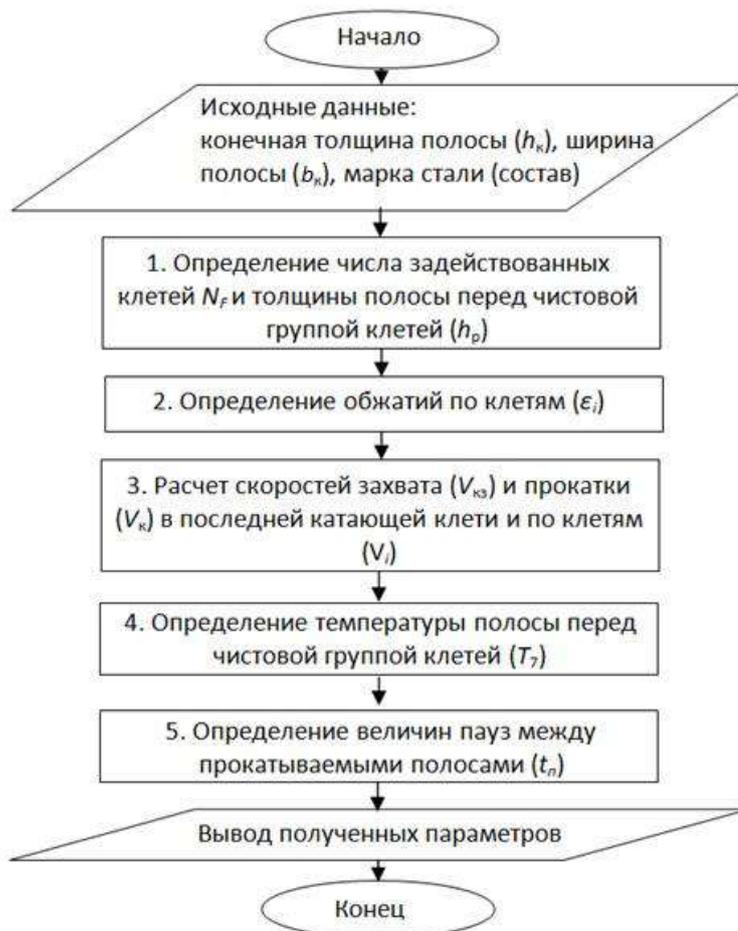


Рисунок 2.9 - Методика расчета технологических параметров прокатки

Исходными данными для расчета технологических параметров являются толщина и ширина проката, а также марка стали (химический состав стали). Расчет базового сопротивления деформации рассчитывается по методике Л.В. Андреюка исходя из химического состава прокатываемой стали [91]. Расчет толщины полосы перед чистовой группой клетей и числа задействованных клетей в ней производится по алгоритму, представленному на рисунке 2.2. Расчет режима обжатий производится по алгоритму, представленному на рисунке 2.4. Скорости прокатки и скорости захвата в последней катающей клетке рассчитываются на основе регрессионных уравнений, полученных с помощью программного продукта STATISTICA.

Перечисленные алгоритмы были реализованы в программе для расчета технологических параметров прокатки (рис. 2.10) [89,90,93]. В качестве исходных данных в программу загружаются Excel файлы, содержащие параметры прокатанных монтажей стана 2000 ЛПЦ №10 ПАО «ММК». В качестве результатов расчета в программе отображается диаграмма распределения обжатий по клетям для выбранной полосы.

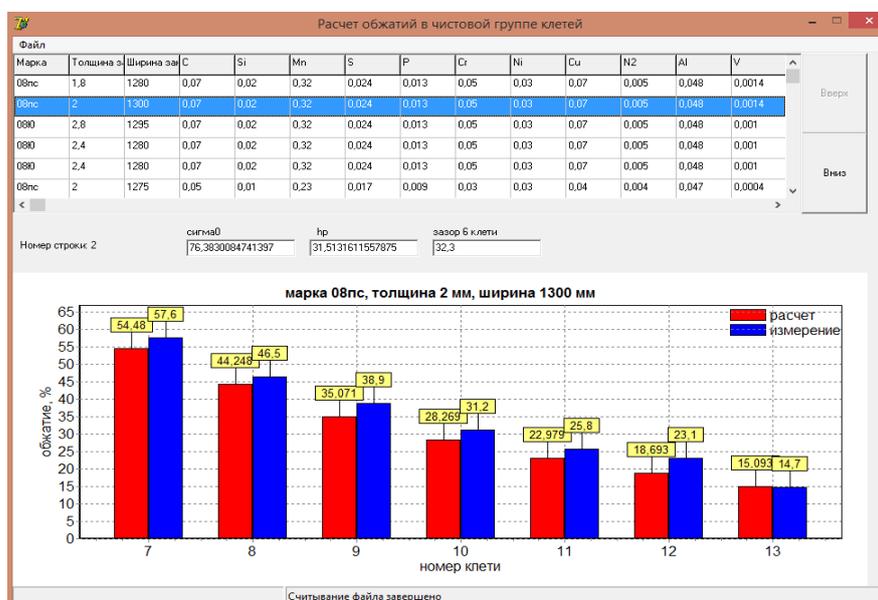


Рисунок 2.10 - Окно программы для расчета обжатий в чистовой группе клетей ШСГП [93]

2.7 Анализ погрешностей расчета технологических параметров прокатки в чистовых клетях применительно к ШСГП 2000 ПАО «ММК»

В разработанной программе были проведены расчеты технологических параметров прокатки (режимы обжатий, скорость прокатки, скорость захвата полосы, число активных клетей в чистовой группе стана). На рисунке 2.11 представлен график соответствия расчетных и фактических значений абсолютных обжатий в чистовой группе клетей. На рисунках 2.12-2.15 изображены диаграммы сравнения расчетных и фактических значений [88] обжатий по клетям чистовой группы стана 2000 горячей прокатки. По графикам видно, что отклонения рассчитанных и фактических значений возрастают при расчете режимов обжатий с ростом конечной толщины полосы. Увеличение погрешностей можно объяснить следующей причиной: увеличение допусков на более толстые полосы, так фактическая средняя толщина полосы может отличаться от заказной толщины на $\pm 0,5-0,6$ мм и больше (при толщинах 5 – 10 мм), что должно в значительной степени влиять на точность расчета.

В общем, средняя ошибка $\bar{\delta}$ составила соответственно для каждой клетки чистовой группы 10,49%, 4,83%, 7,49%, 5,52%, 7,19%, 6,41%, 5,29%, а стандартное отклонение S_{yx} составило 0,07, 0,05, 0,05, 0,04, 0,04, 0,03, 0,03.

Диаграммы сравнения скоростей захвата полосы представлены на рисунках 2.16-2.19. На них сравниваются фактические скорости с их расчетными значениями на 11-13-ой клетях чистовой группы стана. На графиках скоростей захвата, так же как и при обжатиях, наблюдается тенденция роста отклонений с увеличением конечных толщин полосы, что также связано с допусками на конечную толщину проката и уменьшением выборки на относительно толстые полосы, поскольку скорость захвата рассчитывается по формуле, составленной на основе статистических данных.

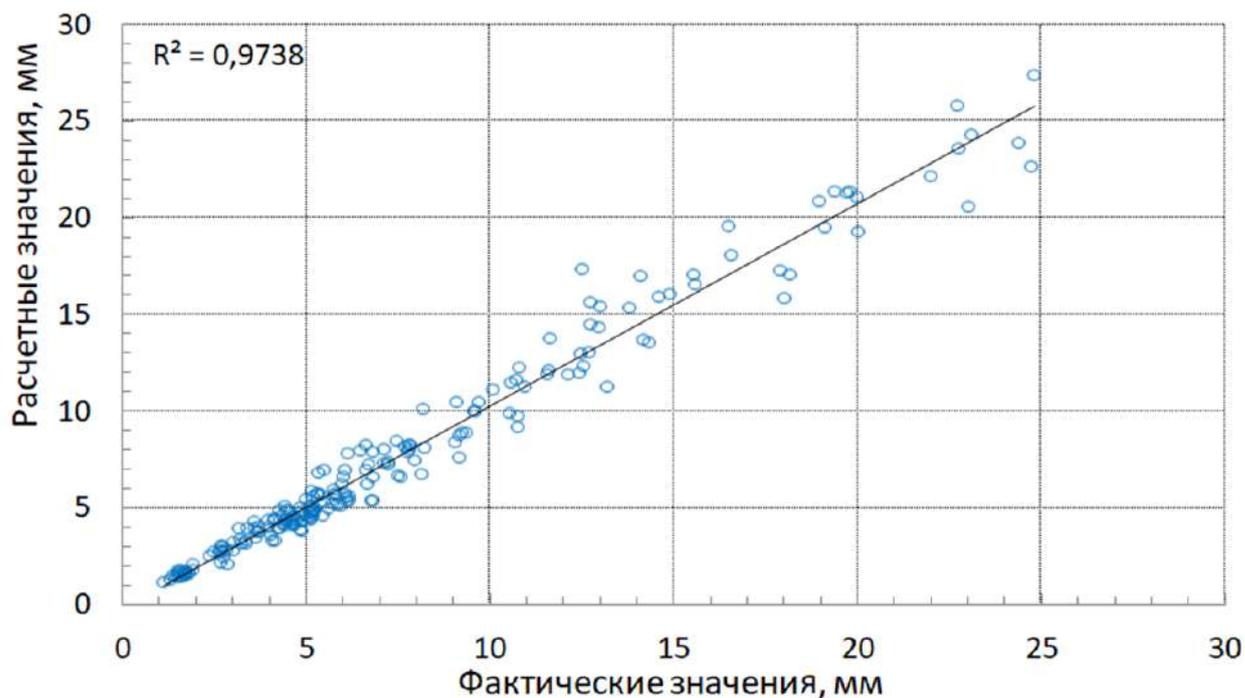


Рисунок 2.11 - Расчетные и фактические значения абсолютных обжатий в чистой группе клеток (сравнение приведено для 3 программ прокатки №№49169-49171)

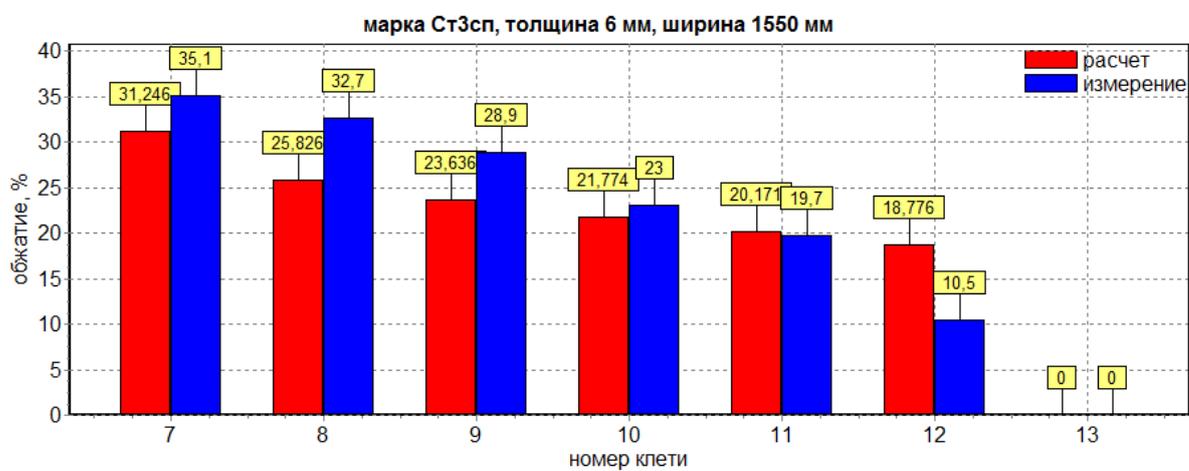


Рисунок 2.12 - Диаграмма режимов обжатий стали марки Ст3сп.

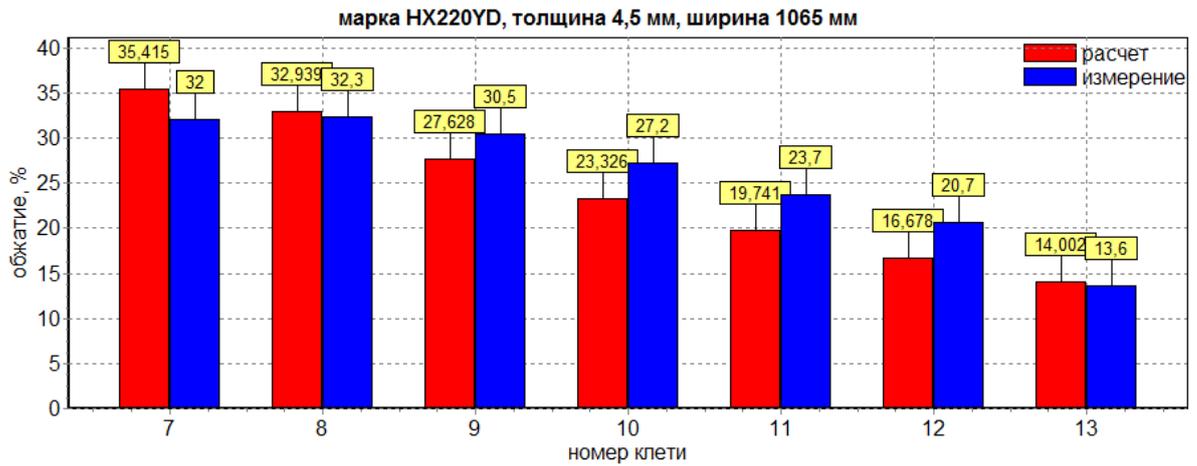


Рисунок 2.13 - Диаграмма режимов обжатий стали марки НХ220УД.

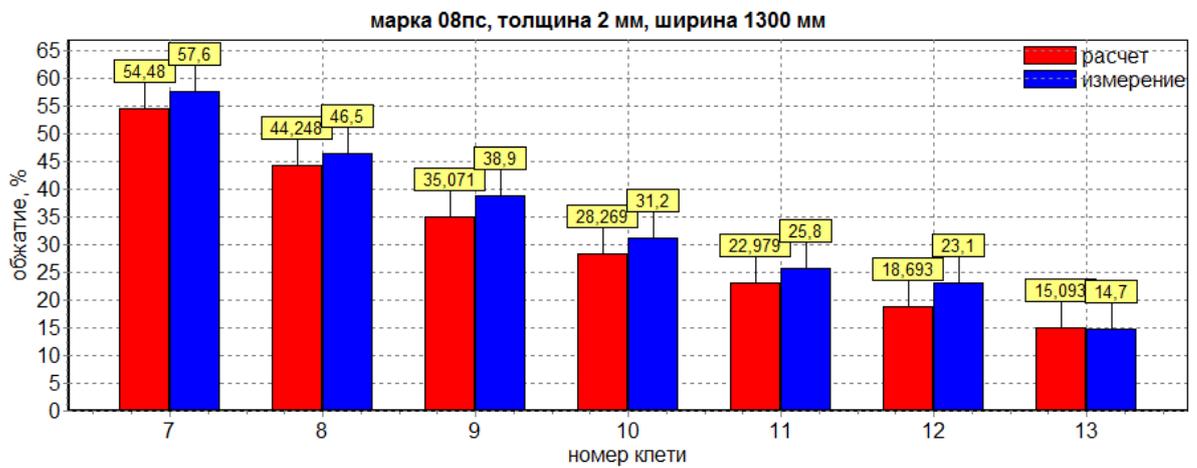


Рисунок 2.14 - Диаграмма режимов обжатий стали марки 08пс.

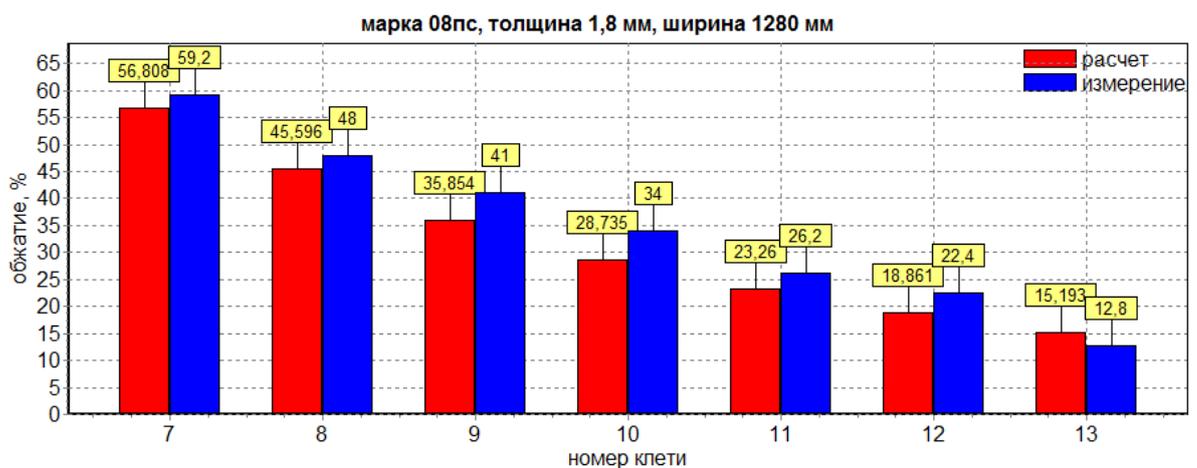


Рисунок 2.15 - Диаграмма режимов обжатий стали марки 08пс.

Так как расчет скоростей по клетям по формуле $V_{i3} = V_{кз} h_k / h_{1i}$ достаточно точно отражает распределение скоростей по клетям, то более

наглядным будет сравнение скоростей только на последней катающей клетке. Стандартное отклонение S_{yx} рассчитанных значений от фактических составило 0,52 м/с, средняя ошибка $\bar{\delta}$ составила 5,42%.

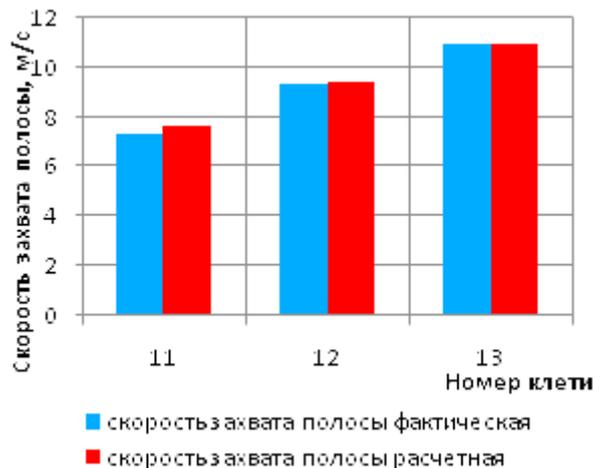


Рисунок 2.16 - График сравнения скорости захвата полосы стали 08пс, $h_K=2,2\text{мм}$, $b_K=1305\text{мм}$

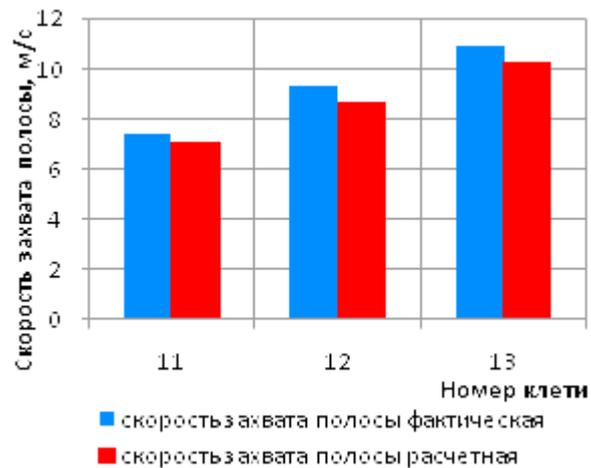


Рисунок 2.17 - График сравнения скорости захвата полосы стали 08пс, $h_K=1,3\text{мм}$, $b_K=1270\text{мм}$

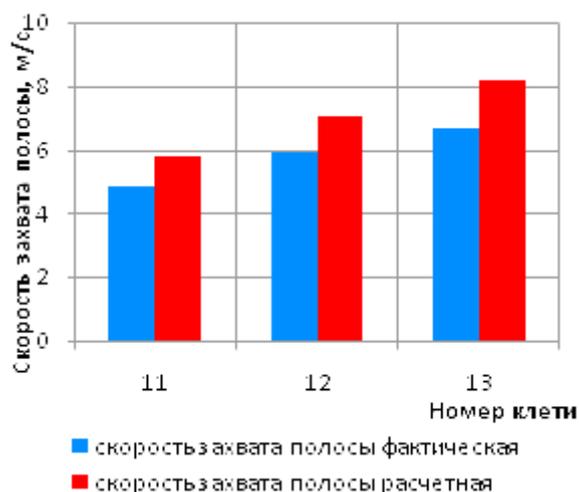


Рисунок 2.18 - График сравнения скорости захвата полосы стали 15пс, $h_K=5\text{мм}$, $b_K=1130\text{мм}$

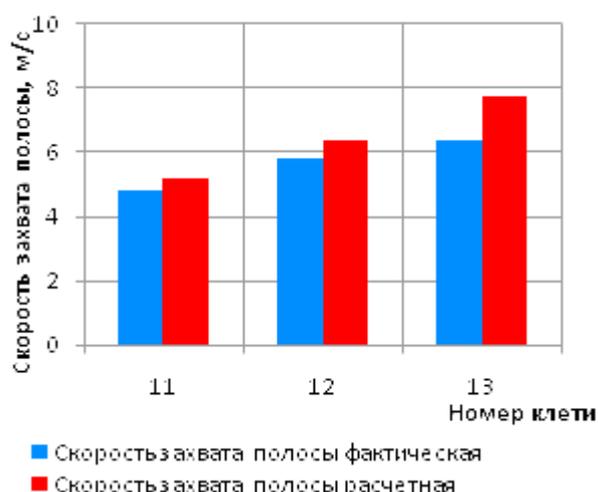


Рисунок 2.19 - График сравнения скорости захвата полосы стали 08пс, $h_K=6\text{мм}$, $b_K=1280\text{мм}$

Сравнения скоростей прокатки по клетям представлены на рисунках 2.20-2.23. В целом тенденция остается прежней: отклонения фактических данных от расчетных значений возрастают с повышением конечной толщины полосы. Так же, как и в предыдущем случае, расчет скоростей по клетям достаточно точно определяется из закона постоянства секундного объема. То

есть для оценки погрешности достаточно сравнить значения скоростей на последней катающей клети. Так, стандартное отклонение S_{yx} составило 0,75 м/с, а средняя ошибка $\bar{\delta}$ составила 6,27%. График соответствия расчетных и фактических значений скорости прокатки в последней катающей клети приведен на рисунке 2.24.

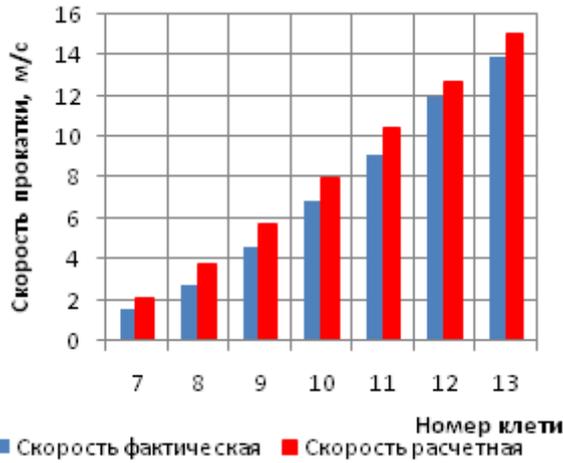


Рисунок 2.20 - График сравнения скорости прокатки стали 08Ю, $h_K=2$ мм, $b_K=1193$ мм

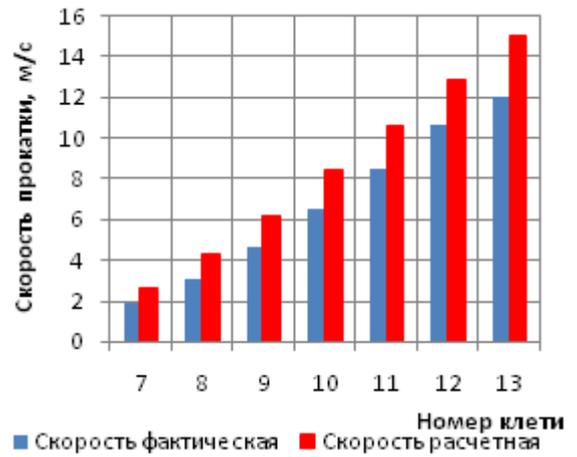


Рисунок 2.21 - График сравнения скорости прокатки СтЗпс, $h_K=3$ мм, $b_K=1116$ мм

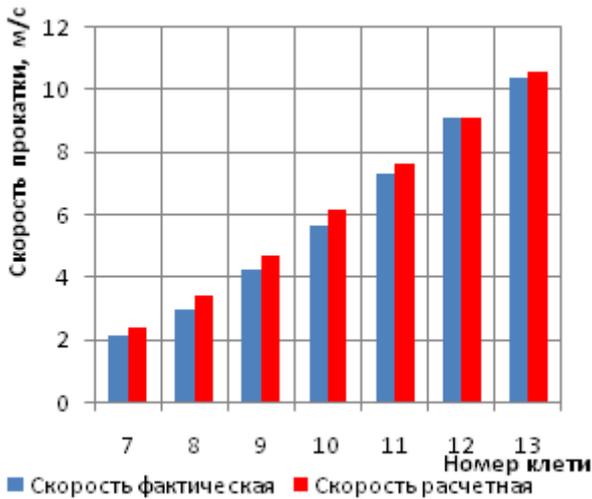


Рисунок 2.22 - График сравнения скорости прокатки стали 08пс, $h_K=4,5$ мм, $b_K=1210$ мм

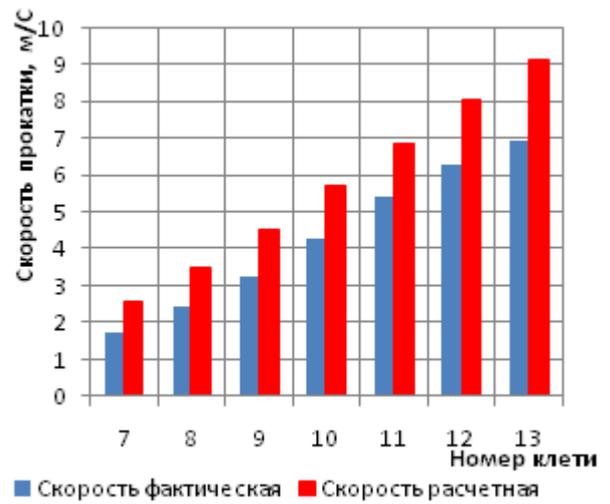


Рисунок 2.23 - График сравнения скорости прокатки СтЗпс, $h_K=6$ мм, $b_K=1280$ мм

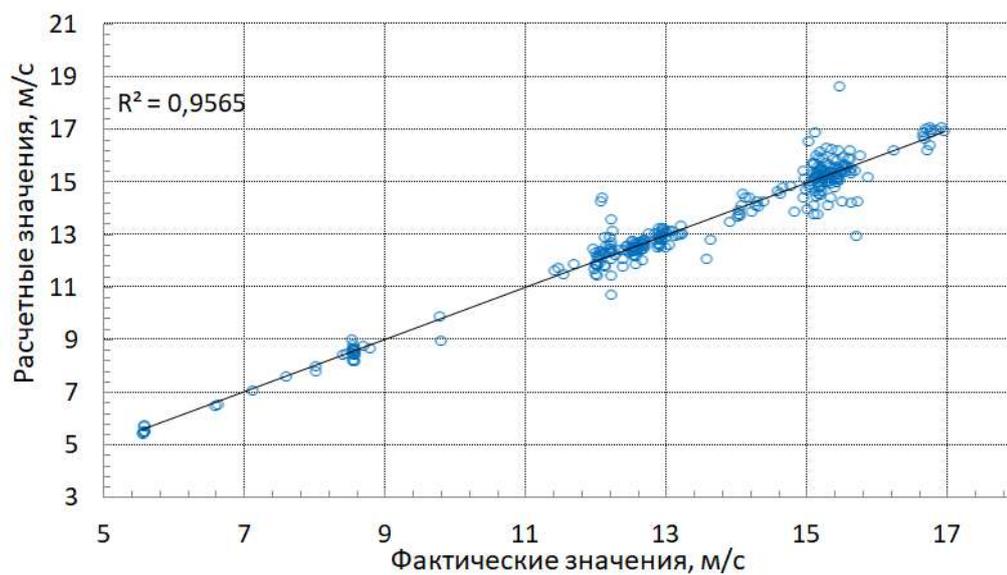


Рисунок 2.24 – График соответствия расчетных и фактических значений скорости прокатки в последней катающей клетке.

Выводы по второй главе

2.1. Произведена статистическая оценка технологических факторов, влияющих на конечную температуру рабочих валков ($T_{\text{раб}}$, °C), которая определяется после вывалки их из клетки по завершению прокатной программы.

На примере ШСГП 2000 ПАО «ММК» составлена корреляционная матрица, согласно которой определено, что наибольший вклад вносят следующие факторы: сортамент полос монтажа, температура полосы во время прокатки ($T_{\text{пол}}$, °C), паузы во время прокатки ($t_{\text{п}}$, с), скорость прокатки ($V_{\text{пр}}$, м/с) (которая в свою очередь зависит от обжатий в клетки), температуры охладителя ($T_{\text{охл}}$, °C).

Определено, что при прокатке полос одного сортамента в разные временные промежутки наблюдается разброс значений технологических параметров: толщина полосы на входе в чистовую группу клеток и следственно разброс по обжатиям и скоростям прокатки в определенной клетки чистовой группы ШСГП.

2.2. Для построения модели прогнозирования исследуемых технологических параметров с помощью статических методов и ИНС был произведен сбор массива информации и ее обработка. Данные для обучения получены из баз данных учета технологических параметров ШСГП 2000 ПАО «ММК». Выборка составила период в два года работы стана с 01.01.2017 по 01.01.2019. Нормировка и фильтрация для «зашумленных» данных производилась с помощью инструментов библиотеки Pandas в среде разработки Jupyter Notebook интерпретируемого языка программирования Python. Для обнаружения выбросов использовался критерий Титьена-Мура.

2.3. На основе использования полученной ИНС разработана модель для определения толщины полосы перед входом ее в чистовую группу клеток. Используемая ИНС представляет собой многослойный перцептрон, состоящий из входного слоя (4 нейрона), одного скрытого слоя (9 нейронов), и выходного слоя (2 нейрона). В модели определяется количество

задействованных клеток и суммарный коэффициент обжатия чистой группы стана по базовому сопротивлению деформации (σ_0 , МПа), коэффициенту использования бочки валка (β_L), ширина проката на выходе из чистой группы клеток (b_k , мм). Максимальная и средняя относительная ошибка ИНС составила 19,1 % и 4,7 % соответственно.

2.4. На основе метода Имаи и применения ИНС разработана модель определения обжатий в чистовых группах клеток ШСГП. В модели с помощью разработанной ИНС определяется мощность (W_i , кВт), необходимая для прокатки в i -й клетки, по которой с использованием коэффициента Имаи определяются коэффициенты использования мощности главных приводов β_{Wi} , зазор между рабочими валками (h_{1i} , мм) и обжатия (ε_{1i}). Максимальная и средняя относительная ошибка модели составили 12,4 % и 6,3 % соответственно.

2.5. Получены с использованием программного комплекса Statistica 6.0 регрессионные зависимости скоростей захвата $V_{кз}$ и скоростей прокатки V_k в последней катающей клетки чистой группы ШСГП в зависимости от толщины полосы на выходе.

2.6. В программном комплексе Statistica 6.0 получено регрессионное уравнение определения температуры полосы перед чистой группой клеток (T_7 , °С). Стандартное отклонение полученного уравнения составило 9,7 °С, а средняя ошибка составила 1,2 %.

2.7. Для определения пауз (t_n , с) прокатки на примере ШСГП 2000 ПАО «ММК» установлены средние значения пауз при прокатке полос различных толщин (толщин полос в последней катающей клетки). Получены следующие результаты: при прокатке полос в диапазонах 1,0...2,0, 2,1...4,0, 4,1...6,0, 6...8,0, 8,1...10, 10,1...14, 14,1...20,0 мм значения пауз составили 5,5, 6,5, 7,0, 10,5, 13,0, 14,0, 19,0 секунд соответственно.

2.8. На основе описанных статистических моделей и обученной ИНС составлен алгоритм расчета технологических параметров прокатки на ШСГП. Алгоритм реализован в виде программы для ЭВМ «Расчет

технологических параметров прокатки». Произведен анализ погрешностей расчета разработанного программного комплекса путем сравнения расчетных значений с фактическими:

- средняя ошибка значений обжати $\bar{\delta}$ составила 10,49%, 4,83%, 7,49%, 5,52%, 7,19%, 6,41%, 5,29%, а стандартное отклонение S_{yx} составило 0,07, 0,05, 0,05, 0,04, 0,04, 0,03, 0,03% соответственно для каждой клетки чистовой группы;

- в результате сравнения скоростей захвата ($V_{кз}$) на последней катающей клетки стандартное отклонение S_{yx} расчетных значений составило 0,52 м/с, а средняя ошибка $\bar{\delta}$ составила 5,42%; в результате сравнения скоростей прокатки (V_k) на последней катающей клетки стандартное отклонение S_{yx} составило 0,75 м/с, а средняя ошибка $\bar{\delta}$ составила 6,27%;

- относительная погрешность расчета числа задействованных клеток составила 1,34 %

Предложенная и разработанная методика прогнозирования технологических параметров с использованием нейросетевых моделей в чистовой группе ШСГП 2000 ПАО «ММК» (при переобучении ИНС и составления статистических зависимостей на другом массиве данных) может использоваться на других ШСГП.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ПОЛОСА-ВАЛОК» И АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Третья глава посвящена моделированию теплового состояния рабочего вала в системе «полоса-валок», на примере ШСГП 2000, и разработке подхода адаптации полученной математической модели к реально действующему стану с помощью предварительно обученной ИНС.

3.1 Моделирование теплового состояния полосы в чистовой группе клеток

При определении теплового состояния рабочих валков важным фактором является значение температуры полосы в очаге деформации. Таким образом, для моделирования теплового состояния рабочих валков необходимо предварительно определить тепловое состояние полосы в каждой клетке чистовой группы стана.

С целью моделирования теплового состояния полосы в условиях горячей прокатки была сформулирована следующая задача: однородная полоса с заданной начальной толщиной, скоростью и температурой проходит через заданное количество клеток с валками известного радиуса (рис. 3.1). При этом полоса охлаждается в зонах контакта с рабочими валками и межклетевого охлаждения. Распределение температуры внутри полосы определяются с учетом тепловыделения при ее деформации, конечной толщины и скорости ее движения после выхода из клетки.

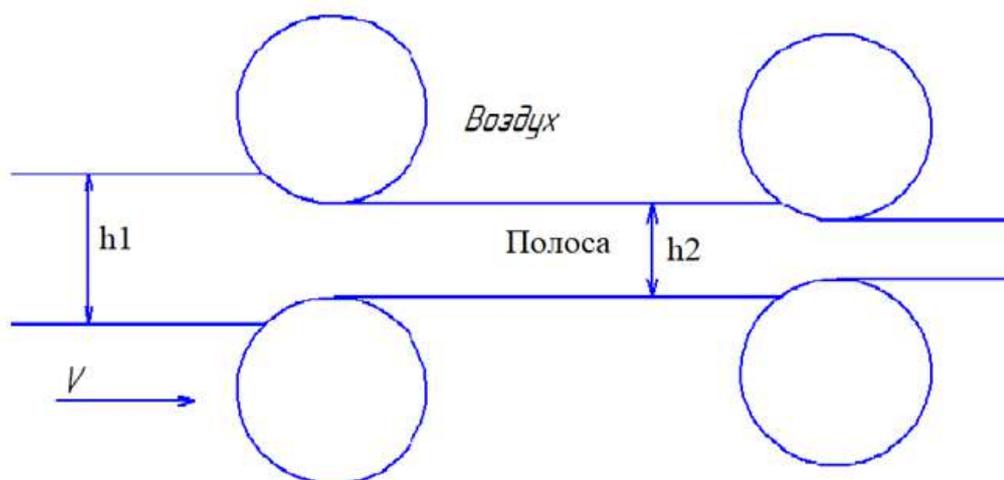


Рисунок 3.1 – Схема процесса прокатки полосы

3.1.1 Разработка математической модели.

Граничные условия

Для оценки температурного состояния полосы в процессе прокатки необходимо решить известные дифференциальные уравнения теплопроводности (3.1). Расчетная схема приведена на рисунке 3.2. Рассматривается известная двумерная задача теплопроводности [46].

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad 3.1$$

где c – удельная теплоёмкость материала полосы, Дж/кг·°С; ρ – плотность материала полосы, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала полосы, Вт/м·°С; T – температура полосы, °С; τ – время, с.

Данная двумерная задача сводится к одномерной, так как скорость движения полосы в очаге деформации больше скорости распространения тепла в нём.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

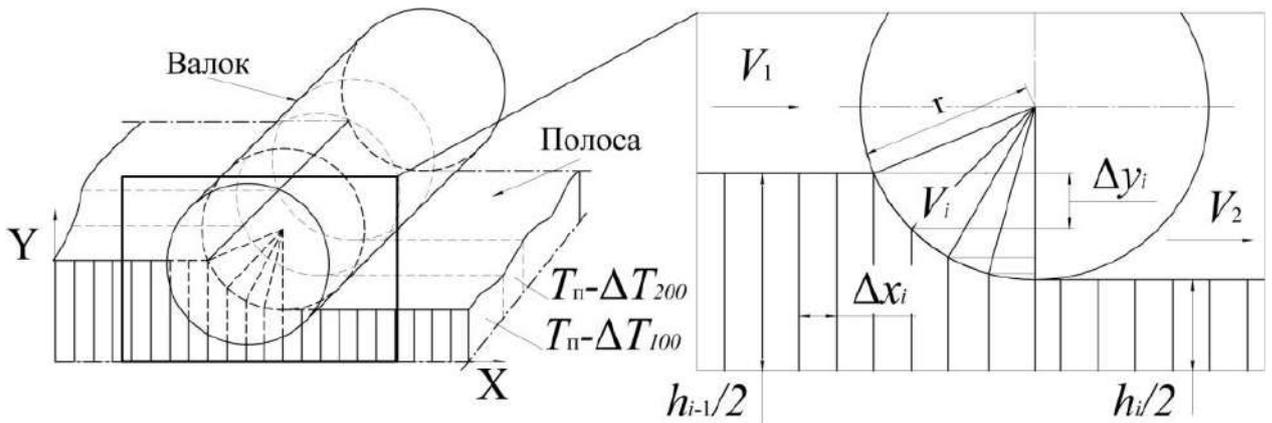


Рисунок 3.2 – Расчетная схема тепловой модели для полосы в системе «полоса-валок»: V_1 – скорость полосы на входе в клеть, м/с; V_2 – скорость полосы на выходе из клетки, м/с; V_i – скорость в i -точке очага деформации, м/с; $\Delta x_i, \Delta y_i$ – минимальный шаг для расчета скорости в i -точки, мм; $T_{\text{п}}$ – температура в центре полосы, °С; $\Delta T_{200}, \Delta T_{100}$ – градиент температуры между центром и точками в 200 мм и 100 мм от края полосы соответственно, °С

С учетом того, что $v = \frac{\partial x}{\partial \tau}$, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$,

$$v \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (3.2)$$

где $\frac{\lambda}{c\rho} = \alpha$ – коэффициент температуропроводности, м²/с;

v – скорость полосы, м/с.

В данном уравнении скорость постоянная при движении полосы между клетями. В очаге деформации полоса движется с ускорением, поэтому каждый шаг Δx_i по координате x будет характеризоваться своей скоростью

v_i :

$$v_i = \frac{v_{i-1} h_{i-1}}{h_i} = \frac{v_{i-1} h_{i-1}}{h_{i-1} - 2\Delta y_i},$$

где

$$h_i = h_{i-1} - 2\Delta y_i,$$

$$\Delta y_i = \sqrt{R^2 - (l_i - \Delta x)^2} - \sqrt{R^2 - l_i^2},$$

$$l_i = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{1}{2}h_i(1 - \varepsilon)\right)^2},$$

где ε_i – обжатия, равные

$$\varepsilon_i = \frac{h_{i-1}}{h_i},$$

где R – радиус рабочего валка, мм;

l – длина очага деформации, мм;

h_i, h_{i-1} – толщина полосы на выходе из клетки и входе в нее соответственно, мм.

В зонах теплообмена использовались известные уравнения, приведенные ниже. При конвективном охлаждении воздуха [45,94,95,96]:

$$Nu_{ж} = 0,33 X^{-0,5} Re_{ж}^{0,5} Pr_{ж}^{0,33} (Pr/Pr_c)^{0,25},$$

$$Nu_{жс} = 0,33 X^{-0,2} Re_{жс}^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} (Pr/Pr_c)^{0,25},$$

$$Re_{кр} = \nu X_{кр} / \nu = 5 \cdot 10^5;$$

при теплообмене излучением [45,94,95,96]:

$$q = \varepsilon_q(T_n)\sigma[(T_n + 273)^4 - (T_g + 273)^4].$$

Также, учитывалось повышение температуры за счет деформации полосы в очаге деформации [45,94,95,96]:

$$\Delta T = \frac{\sigma_{0,2} \ln \varepsilon}{\rho c},$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести, МПа.

Плотность теплового потока на поверхности полуограниченного тела уменьшается во времени по закону [45,94,95,96]:

$$q = \frac{\lambda(T_n - T_\infty)}{\sqrt{\pi a \tau}}.$$

Учет теплофизических свойств воздуха произведен по полиномам зависимостей числа Рейнольдса, числа Прандтля, кинетической вязкости и теплопроводности от температуры [45,94,95,96].

3.1.2 Регрессионная модель распределения температуры полосы по ее ширине

При численной реализации математической модели были учтены градиенты температуры по ширине полосы. Для определения температурного градиента полосы был реализован промышленный эксперимент.

Экспериментальные данные были получены с помощью тепловизора SDS-Infrared HotFind-DXT (рис. 3.3, 3.4). При обработке полученных данных и систематизации результатов исследования было предложено разделить прокатываемый сортамент на 4 условные группы исходя из геометрических параметров прокатываемой полосы. После обработки экспериментальных данных (более 100 прокатываемых полос для каждой условной группы сортамента). Для каждой условной группы прокатываемого сортамента определены численные значения температурных градиентов, которые составляют от 15...90 °С. Получено аппроксимирующее уравнение, описывающее изменение температуры прокатываемой полосы по ее ширине (градиента), в зависимости от толщины и ширины полосы. Численные значения коэффициентов приведены в таблице 3.1. Статистические оценки полученных регрессионных уравнений приведены в таблице 3.2. Значения Фишера превышают табличные значения, поэтому можно считать регрессионные уравнения статистически значимыми. В дальнейшем при определении температурного профиля полосы по ширине было допущено, что температура поверхности полосы снизу и сверху одинакова.

$$\Delta T_{200} = a_{200} \cdot h + b_{200} \cdot B + c_{200} \cdot T_{\text{п}}; \quad (3.3)$$

$$\Delta T_{100} = a_{100} \cdot h + b_{100} \cdot B + c_{100} \cdot T_{\text{п}}; \quad (3.4)$$

где ΔT_{200} , ΔT_{100} – градиент температуры между центром и в точках 200 мм и 100 мм от края полосы соответственно, °С;

a_{200} , b_{200} , c_{200} , a_{100} , b_{100} , c_{100} – коэффициенты регрессионного уравнения, определяемые в зависимости от 4 условных групп прокатываемого сортамента (табл. 3.1);

$T_{\text{п}}$ – температура в центре полосы, °С.

Таблица 3.1 - Коэффициенты для определения градиента температуры в зависимости от условной группы сортамента

Условные группы сортамента	V_i , мм	Значение коэффициента b	h_i , мм	Значение коэффициента a	Значение коэффициента c
1	<1000	$\frac{0,626}{0,665}$	<2,0	$\frac{-0,753}{-0,810}$	$\frac{0,111}{0,164}$
			2,1-4,0	$\frac{-0,701}{-0,747}$	$\frac{0,108}{0,160}$
			4,1-8,0	$\frac{-0,658}{-0,676}$	$\frac{0,107}{0,159}$
			>8,0	$\frac{-0,581}{-0,611}$	$\frac{0,106}{0,159}$
2	1001-1500	$\frac{0,620}{0,660}$	<2,0	$\frac{-0,727}{-0,790}$	$\frac{0,107}{0,161}$
			2,1-4,0	$\frac{-0,716}{-0,771}$	$\frac{0,106}{0,162}$
			4,1-8,0	$\frac{-0,683}{-0,664}$	$\frac{0,104}{0,158}$
			>8,0	$\frac{-0,561}{-0,533}$	$\frac{0,105}{0,160}$
3	1501-1600	$\frac{0,624}{0,663}$	<2,0	-	-
			2,1-4,0	$\frac{-0,845}{-0,888}$	$\frac{0,109}{0,166}$
			4,1-8,0	$\frac{-0,756}{-0,842}$	$\frac{0,105}{0,165}$
			>8,0	$\frac{-0,703}{-0,789}$	$\frac{0,104}{0,166}$
4	>1600	$\frac{0,629}{0,674}$	<2,0	-	-
			2,1-4,0	$\frac{0,880}{-0,936}$	$\frac{0,106}{0,164}$
			4,1-8,0	$\frac{-0,898}{-0,953}$	$\frac{0,105}{0,165}$
			>8,0	-	-

Примечание: в числителе указаны коэффициенты a_{200} , b_{200} , c_{200} в знаменателе - a_{100} , b_{100} , c_{100}

Таблица 3.2 – Статистические оценки полученных регрессионных уравнений

Условные группы сортамента	V_i , мм	h_i , мм	R^2	$F_{расч}$	$F_{крит}$
1	<1000	<2,0	0,86	360,4	2,66
		2,1-4,0	0,81	250,1	2,66
		4,1-8,0	0,83	286,4	2,66
		>8,0	0,77	196,4	2,66
2	1001-1500	<2,0	0,91	660,6	2,65
		2,1-4,0	0,89	528,6	2,65
		4,1-8,0	0,85	370,2	2,65
		>8,0	0,73	176,6	2,65
3	1501-1600	<2,0	-	-	-
		2,1-4,0	0,72	168,0	2,67
		4,1-8,0	0,76	206,9	2,67
		>8,0	0,74	185,9	2,67
4	>1600	<2,0	-	-	-
		2,1-4,0	0,77	162,9	2,67
		4,1-8,0	0,83	237,6	2,67
		>8,0	-	-	-

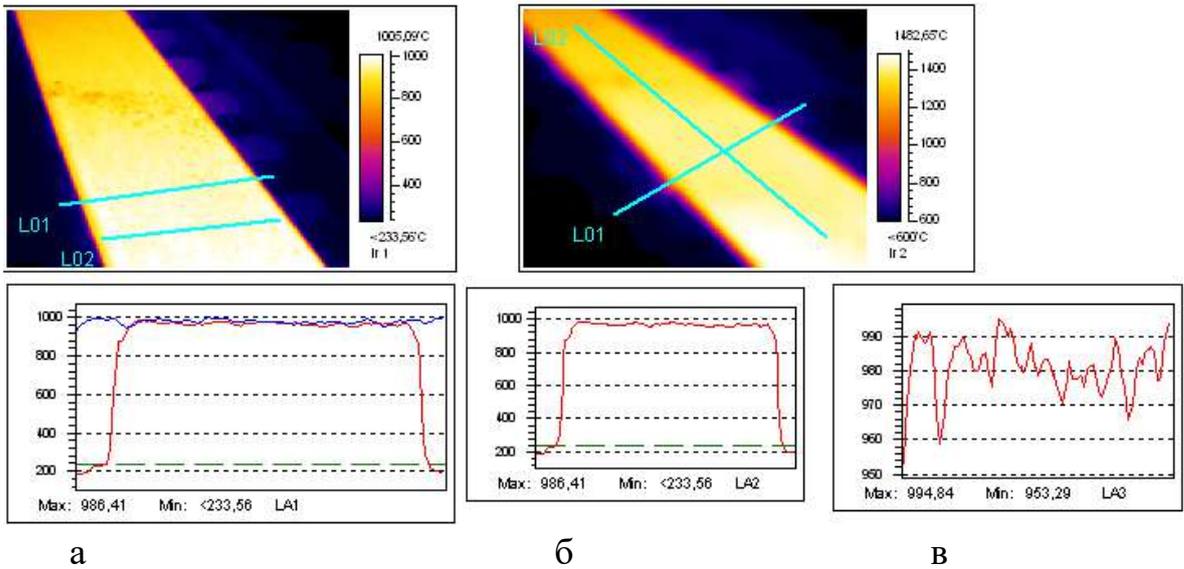


Рисунок 3.3 – Распределение температуры полосы перед клетью №7 ШСГП 2000 ПАО «ММК»: а - по ширине полосы замеры произведены по двум линиям; б - по ширине полосы; в - по длине полосы

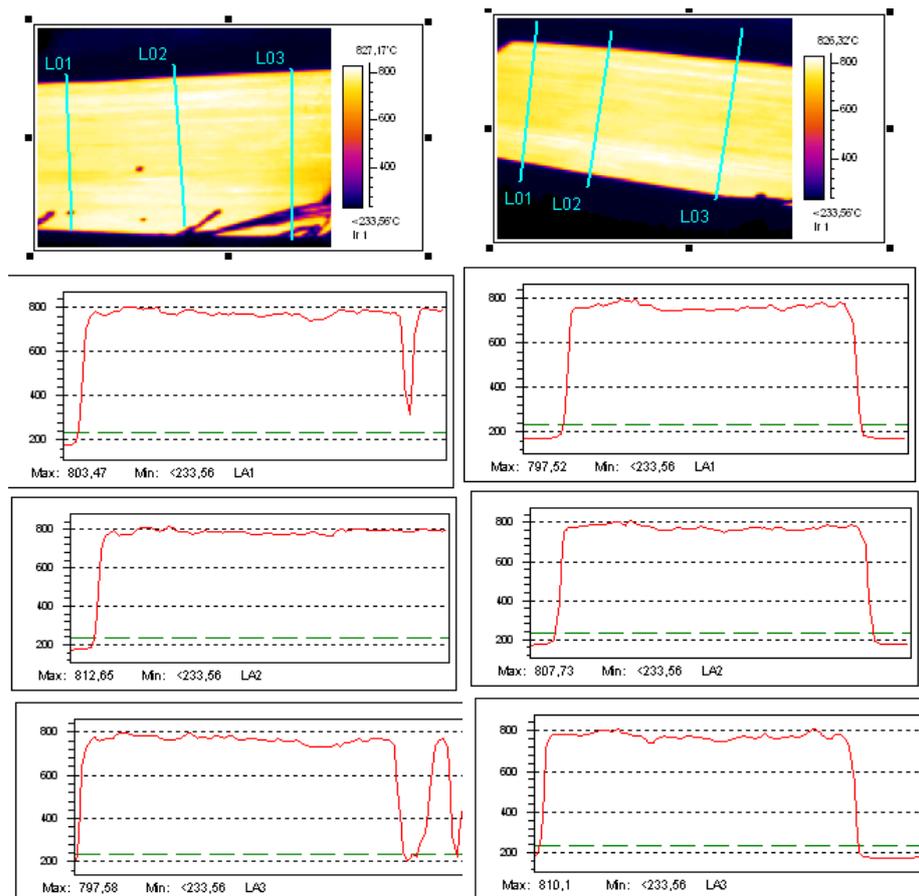


Рисунок 3.4 – Распределение температуры после клетки № 13 по ширине полосы

3.2 Моделирование теплового состояния рабочего вала в чистовой группе клеток

Теплообмен при контакте двух полуограниченных тел

Ниже описаны используемые при моделировании теплового состояния известные уравнения теплообмена [94,95] при контакте двух цилиндрических полуограниченных тел. Полуограниченное тело – тело ограниченное плоскостью XY и не ограниченное в нормальном к поверхности направлении ось Z (рис. 3.5).

Рассмотрим бесконечный цилиндр, окруженный тонкой оболочкой, в результате чего оболочку в первом приближении можно считать плоской. Вначале система двух цилиндров с одинаковой начальной температурой T_0 помещена в среду с температурой T_c , которая меньше T_0 . Теплообмен между средой и оболочкой происходит по закону Ньютона. Найдем распределение температуры в системе двух цилиндрических тел (рис. 3.5).

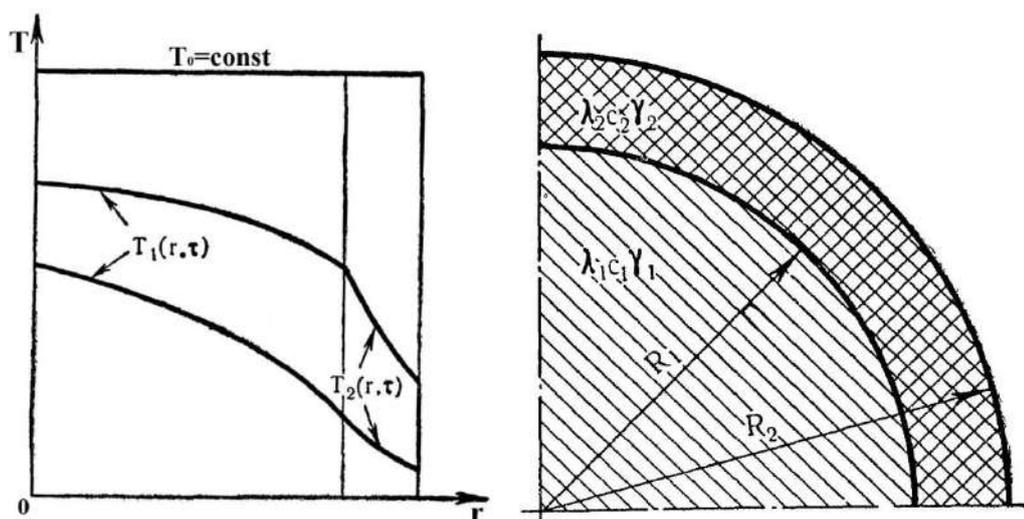


Рисунок 3.5 – Температурное поле системы двух цилиндрических тел [94,95]

В первом приближении тонкая оболочка считается плоской. Известное уравнение теплопроводности для неограниченного цилиндра:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \text{ при } \tau > 0; 0 \leq r \leq R_1;$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} \right) \text{ при } \tau > 0; R_1 \leq r \leq R_2$$

где a_1, a_2 – коэффициент температуропроводности первого и второго цилиндров, $\text{м}^2/\text{с}$; T_1, T_2 – температура первого и второго цилиндров, $^{\circ}\text{C}$; R_1, R_2 – диаметры первого и второго цилиндров, м .

Для нахождения температурного поля внутри тела в определенный момент времени необходимо знать распределение температуры внутри тела в начальный момент времени:

$$T_1(r, 0) = T_2(r, 0) = T_0 = \text{const},$$

а так же геометрическую форму тела, закон взаимодействия между поверхностью тела и окружающей средой:

$$\begin{aligned} T_1(R_1, \tau) = T_2(R_1, \tau); \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1, \tau)}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(R_1, \tau)}{\partial r}; \\ T_1(0, \tau) < \infty; \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2(R_2, \tau)}{\partial r} + \alpha[T_c - T_2(R_2, \tau)] = 0, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где λ_1, λ_2 - коэффициенты теплопроводности первого и второго цилиндра, $\text{Вт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}$.

Данное известное решение получено с помощью преобразования Лапласа [94,95]:

$$\frac{T_1(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R_1} \right) \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (3.6)$$

$$\frac{T_2(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left\{ \begin{aligned} &J_0(\mu_n) \cos \left[\mu_n K_a^{1/2} \left(\frac{r}{R_1} - 1 \right) \right] - \\ &K_\varepsilon J_1(\mu_n) \sin \left[\mu_n K_a^{1/2} \left(\frac{r}{R_1} - 1 \right) \right] \end{aligned} \right\} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (3.7)$$

где A_n – табулированный коэффициент;

$J_0(\mu_n) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{-\mu_n^{2n}}{2^{2n}(n!)^2}$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$J_1(\mu_n) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{-\mu_n^{2n+1}}{2^{2n+1}n!(n+1)^2}$ – функция Бесселя первого рода первого порядка;

Fo – число Фурье;

$Bi = \frac{aR}{\lambda}$ – число Био;

K_a – критерий, характеризующий теплоинерционные свойства второго тела

относительно первого $K_a = \frac{a_1}{a_2}$;

K_ε – критерий, характеризующий тепловую активность первого цилиндра по

отношению ко второму $K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$;

ε – тепловая активность;

μ_n – корни характеристического уравнения.

$$\begin{aligned}
 & J_0(\mu) \left[Bi \cdot \cos K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu - K_a^{1/2} K_R \mu \cdot \sin K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu \right] - \\
 & K_\varepsilon J_1(\mu) \left[Bi \cdot \sin K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu + K_a^{1/2} K_R \cdot \mu \cdot \cos K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu \right] = 0; \\
 & A_n = \frac{2BiK_\varepsilon [K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n + Bi \cdot \operatorname{tg} K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n]}{\mu_n J_0(\mu_n) \sin K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n}; \\
 & \{ K_\varepsilon^2 K_a (K_R - 1)^2 \mu_n^2 + Bi^2 \} \operatorname{ctg} K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n + \frac{2K_\varepsilon K_a^{1/2} (K_R - 1)}{\sin K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n} \cdot \\
 & \cdot [Bi^2 + K_a (K_R - 1)^2 \mu_n^2] + [K_a (K_R - 1)^2 \mu_n^2 + 2K_\varepsilon K_a^{1/2} (K_R - 1) Bi + \\
 & + K_\varepsilon^2 Bi^2] \operatorname{tg} K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n + K_\varepsilon K_a (K_R - 1)^2 \mu_n + 2K_\varepsilon^2 K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n Bi - \\
 & - 2K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n Bi - \frac{K_\varepsilon Bi^2}{\mu_n} \}^{-1},
 \end{aligned}$$

где $K_R = \frac{R_2}{R_1}$.

В предельном случае ($Bi \rightarrow \infty$) второе условие (3.5) заменяется условием $T_2(R_2, \tau) = T_c$.

При этом решение (3.6) остается прежним, а решение (3.7) принимает вид:

$$\frac{T_2(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \left[K_a^{1/2} \left(K_R - \frac{r}{R_1} \right) \mu_n \right] \exp(-\mu_n^2 Fo)}{\mu_n \left[\frac{K_\varepsilon^2 - 1}{K_\varepsilon} \sin^2 K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n - \frac{1}{2\mu_n} \sin 2K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n + b \right]}$$

$$\text{где } A_n = \frac{2 \sin K_a^{1/2} \left(K_R - \frac{r}{R_1} \right) \mu_n}{\mu_n J_0(\mu_n) \left[\frac{K_\varepsilon^2 - 1}{K_\varepsilon} \sin K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n - \frac{1}{2\mu_n} \sin 2K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n + b \right]},$$

$$b = K_a^{1/2}(K_R - 1) + \frac{1}{K_\varepsilon},$$

μ_n – корни уравнения: $J_0(\mu) - K_\varepsilon J_1(\mu) \operatorname{tg} K_a^{1/2}(K_R - 1)\mu = 0$.

Корни характеристических уравнений $J_0(\mu_n) = 0$ и $J_1(\mu_n) = 0$ можно найти в справочнике.

Общие решения для системы ограниченных тел можно получить, используя интегральные преобразования с функцией Грина [94,95].

Периодический процесс охлаждения и нагрева

Ниже приведены известные уравнения [94,95], описывающие периодический процесс охлаждения и нагрева тела, которые применимы и к рабочему валку при широкополосной горячей прокатке. Температура T_n поверхности $x=0$ полуограниченного тела изменяется по гармоническому закону:

$$\vartheta_n = T_n - \bar{T} = \vartheta_0 \cos(\omega\tau), \quad (3.8)$$

где \bar{T} – среднее значение температуры поверхности, °С; ϑ_0 – амплитуда колебаний, м; ω – циклическая частота колебания температуры, с⁻¹.

Если подобные колебания продолжаются достаточно долго, то влияние начального распределения температуры на ход процесса исчезает и в теле устанавливается квазистационарное состояние, при котором температура в каждой точке совершает гармонические колебания около неизменного значения T . Распределение температуры в данном случае следующее:

$$\Theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \cos\left(\omega\tau - x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \quad (3.9)$$

где $\vartheta = T(x, \tau) - \bar{T}$;

$T(x, \tau)$ – температура на расстоянии x от поверхности тела в момент времени τ , °С;

a – температуропроводность материала тела, м²/с.

Скорость распространения тепловой волны рассчитывается из формулы:

$$u = \frac{x}{\Delta\tau} = \sqrt{2a\omega}; \quad (3.10)$$

$$q_{x=0} = \lambda g_0 \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cos(\omega\tau + \frac{\pi}{4}). \quad (3.11)$$

Колебания температуры поверхности (3.8) отстают по фазе на $\pi/4$ от колебания плотности теплового потока (3.11) [94,95].

Моделирование теплового состояния рабочих валков методом независимых потоков

В 2003 году Гейном С.В. и др. [63] был предложен подход построения численных алгоритмов для решения смешанных задач многомерного уравнения теплопроводности в ортогональных системах координат. Подход совмещает в себя как схемы первого порядка аппроксимации (остаточный член $r = O(\tau) + O(h^2)$), так и второго - $r = O(\tau^2) + O(h^2)$. Преимуществом метода является их абсолютная экономичность: число операций, необходимых для перехода на следующий временной слой равно cV , где V - объём разностной сетки, а c - константа, не зависящая от V . Для простого вида коэффициентов $c \approx 100-200$.

Обеспечивается эффективность алгоритмов следующими способами.

1. Редукция к одномерным разностным задачам (данный подход лежит в основе метода переменных направлений или методе расщепления).
2. Использование итерационных процедур (самые эффективные затрачивают $cV \cdot \ln V$ операций).

Расчет потоков по каждому из пространственных направлений выполняется независимо, что позволяет легко распараллеливать алгоритм. Поэтому данный метод называется методом независимых потоков (МНП).

Метод МНП предназначен для решения задач в ортогональных координатах. Наличие δ -образных источников не является осложняющим обстоятельством, что позволяет использовать предлагаемый подход для решения задач с различными сингулярностями [63].

Уравнение теплопроводности

МНП решает известное уравнение теплопроводности [94,95] в полярной системе координат следующим способом [63].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} ar \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} a \frac{\partial T}{\partial \varphi},$$

где $a = a(r, \varphi)$ - коэффициент температуропроводности.

В уравнение теплопроводности вводятся потоки:

$$U = ar \frac{\partial T}{\partial r}, \quad V = \frac{a}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi}.$$

Тогда аналогом являются уравнения:

$$r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial \varphi},$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = ar \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) \right],$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right).$$

После их упрощения в МНП получены упрощенные уравнения:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = ar \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right),$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2}.$$

После в МНП вводят разностную сетку (r_m, φ_k) . Система уравнений относительно $\tilde{U}_{m+\frac{1}{2},k}$, $\tilde{V}_{m+\frac{1}{2},k}$ в [63] имеет следующий вид:

Этап 1

$$\tilde{U}_{m+\frac{1}{2},k} - U_{m+\frac{1}{2},k}^n = \frac{\sigma}{2} \cdot r_{m+\frac{1}{2}} \cdot q_r \cdot a_{m+\frac{1}{2},k} \cdot \Delta_{rr} \cdot \tilde{U}_{m+\frac{1}{2},k}, \quad (3.12)$$

$$\tilde{V}_{m,k+\frac{1}{2}} - V_{m,k+\frac{1}{2}}^n = \frac{\sigma}{2} \cdot \frac{1}{r_m^2} \cdot q_\varphi \cdot a_{m,k+\frac{1}{2}} \cdot \Delta_{\varphi\varphi} \cdot \tilde{V}_{m,k+\frac{1}{2}}, \quad (3.13)$$

где $q_r = \frac{\tau}{h_r^2}$, $q_\varphi = \frac{\tau}{h_\varphi^2}$,

$$\Delta_{rr} \cdot \tilde{U}_{m+\frac{1}{2},k} = \frac{1}{r_{m+1}} \cdot \Delta_r \cdot \tilde{U}_{m+1,k} - \frac{1}{r_m} \cdot \Delta_r \cdot \tilde{U}_{m,k},$$

$$\Delta_{\varphi\varphi} \cdot \tilde{V}_{m,k+\frac{1}{2}} = \tilde{V}_{m,k+\frac{3}{2}} - 2\tilde{V}_{m,k+\frac{1}{2}} + \tilde{V}_{m,k-\frac{1}{2}},$$

$$\Delta_r \cdot \tilde{U}_{m,k} = \tilde{U}_{m+\frac{1}{2},k} - \tilde{U}_{m-\frac{1}{2},k},$$

$$U_{m+\frac{1}{2},k}^n = a_{m+\frac{1}{2},k} \cdot r_{m+\frac{1}{2}} \cdot \frac{\Delta_r \cdot T_{m+\frac{1}{2},k}^n}{h_r},$$

$$V_{m,k+\frac{1}{2}}^n = a_{m,k+\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{r_m} \cdot \frac{\Delta_\varphi \cdot T_{m,k+\frac{1}{2}}^n}{h_\varphi},$$

$$\Delta_\varphi \cdot T_{m,k+\frac{1}{2}}^n = T_{m,k+1}^n - T_{m,k}^n \tilde{U}_{m,k}.$$

После в МНП производят дивергентное замыкание первого этапа:

$$T_{m,k}^{n+1} = T_{m,k}^n + \frac{1}{r_m} (\kappa_r \Delta_r \tilde{U}_{m,k} + \kappa_\varphi \Delta_\varphi \tilde{V}_{m,k}), \quad (3.14)$$

$$\text{где } \kappa_r = \frac{\tau}{h_r}, \quad \kappa_\varphi = \frac{\tau}{h_\varphi}.$$

Если при расчете точность недостаточна в МНП [63] для реализации дивергентного замыкания выполняют второй этап:

Этап 2

$$U_{m+\frac{1}{2},k} - U_{m+\frac{1}{2},k}^n = \frac{1}{2} \cdot r_{m+\frac{1}{2}} \cdot a_{m+\frac{1}{2},k} \cdot (q_r \cdot \Delta_{rr} \cdot U_{m+\frac{1}{2},k} + q_{r\varphi} \cdot \Delta_{r\varphi} \cdot \tilde{V}_{m+\frac{1}{2},k}), \quad (3.15)$$

$$V_{m,k+\frac{1}{2}} - V_{m,k+\frac{1}{2}}^n = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{r_m^2} \cdot a_{m,k+\frac{1}{2}} \cdot (q_\varphi \cdot \Delta_{\varphi\varphi} \cdot V_{m,k+\frac{1}{2}} + q_{\varphi r} \cdot \Delta_{\varphi r} \cdot \tilde{U}_{m,k+\frac{1}{2}}), \quad (3.16)$$

$$\text{где } q_{r\varphi} = q_{\varphi r} = \frac{\tau}{h_r h_\varphi},$$

$$\Delta_{r\varphi} \cdot \tilde{V}_{m+\frac{1}{2},k} = \frac{1}{r_{m+1}} \Delta_\varphi \cdot \tilde{V}_{m+1,k} - \frac{1}{r_m} \Delta_\varphi \cdot \tilde{V}_{m,k},$$

$$\Delta_{\varphi r} \cdot \tilde{U}_{m,k+\frac{1}{2}} = \tilde{U}_{m+\frac{1}{2},k+1} - \tilde{U}_{m+\frac{1}{2},k} - \tilde{U}_{m-\frac{1}{2},k+1} + \tilde{U}_{m-\frac{1}{2},k},$$

$$\Delta_\varphi \cdot \tilde{V}_{m,k} = \tilde{V}_{m,k+\frac{1}{2}} - \tilde{V}_{m,k-\frac{1}{2}}.$$

Дивергентное замыкание второго этапа:

$$T_{m,k}^{n+1} = T_{m,k}^n + \frac{1}{r_m} (\kappa_r \Delta_r U_{m,k} + \kappa_\varphi \Delta_\varphi V_{m,k}). \quad (3.17)$$

Для граничных условий Неймана значения потоков замыкают разностную краевую задачу. В случае постановки условий Дирихле (P на границе известно) - например, на границе $r = \text{const}$ - трансверсальная производная легко вычисляется ($U_r = rT_t - V_\varphi$; T_t, V - известные величины). Поэтому в качестве замыкающего разностного граничного условия можно использовать разностную аппроксимацию данной производной [63].

Решение разностных уравнений методом прогонки

Решение разностных уравнений в работе производится известным методом прогонки [97]. Система уравнений, решаемая при прогонке, выглядит следующим образом [97]:

$$\begin{cases} \beta_0 y_0 + \gamma_0 y_1 = \varphi_0, \\ \alpha_i y_{i-1} + \beta_i y_i + \gamma_i y_{i+1} = \varphi_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \alpha_n y_{n-1} + \beta_n y_n = \varphi_n, \end{cases} \quad (3.18)$$

где $\beta_0 = c_1 h - c_2$, $\gamma_0 = c_2$, $\varphi_0 = f_i h^2$,

$$\alpha_i = 1 - \frac{p_i h}{2}, \quad \beta_i = d_i h^2 - 2, \quad \gamma_i = 1 + \frac{p_i h}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1;$$

$$\alpha_n = -d_2, \quad \beta_n = h q_1 + d_2, \quad \varphi_n = h d.$$

Решение системы (3.18) в виде

$$y_i = u_i + v_i y_{i+1}, \quad (3.19)$$

тогда для u_i и v_i рекуррентные формулы выглядят:

$$v_i = -\frac{\gamma_i}{\beta_i + \alpha_i v_{i-1}}, \quad u_i = \frac{\varphi_i - \alpha_i u_{i-1}}{\beta_i + \alpha_i v_{i-1}}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3.20)$$

Значения n характеризуют количество шагов расчета: увеличение значения уменьшает погрешность вычислений, но увеличивает их объём при решении данной системы (3.18) [97].

3.3 Численная реализация модели теплового состояния рабочих валков

Постановка граничных условий

В качестве исходных данных используем следующие основные параметры валка: радиус, начальная температура, угловая скорость вращения валка, теплоемкость и плотность, коэффициент теплопроводности, значение теплового потока.

Построена следующая расчетная схема [99,100]. Окружность валка разбивается на 8 зон: углы $\varphi_1 - \varphi_8$ (рис. 3.6). Угол φ_1 определяет зону контакта валка с полосой. Углы φ_2 и φ_8 определяются расположением водоотсекателей. Зоны, соответствующие углам φ_4 и φ_6 охлаждаются водой, а φ_5 - охлаждается воздухом. Углы φ_3 и φ_9 определяют область стекания воды.

Теплопередача между опорным и рабочим валками не учитывается, т.к. в общем объеме тепловых потоков доля данного взаимодействия составляет не более 1...3 % [30,57,58].

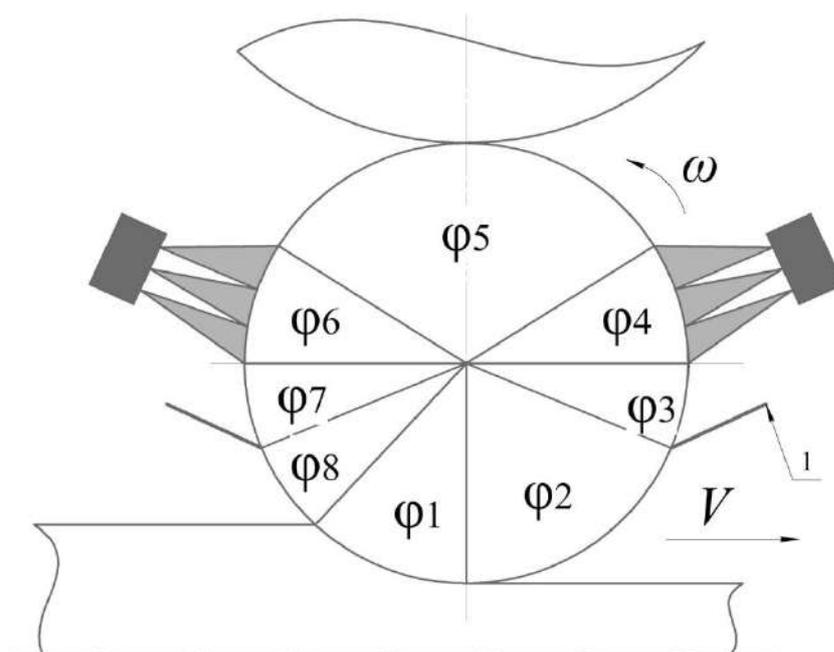


Рисунок 3.6 – Схема разбиения валка на 8 зон, определяемых углами $\varphi_1 - \varphi_8$ (1-водоотсекатель)

Тепловая задача решается методом МНП. В поперечном сечении рабочего валка задается конечно-разностная сетка по углу и его радиусу (рис. 3.7).

На участке φ_1 происходит разогрев поверхности валка от контакта с горячей полосой. На остальных участках поверхность валка охлаждается

(зона активного охлаждения, зона пассивного охлаждения – воздухом или стекающей водой), а температура перераспределяется по его сечению. Валки охлаждаются струями воды, как схематически показано (рис. 3.6). На участках φ_3 и φ_7 (рис. 3.6) поверхность валков покрыта пленкой воды, которая опускается вниз по мере зоны охлаждения. В зависимости от температуры полосы модель теплового обмена варьируется. Принято, что в зонах φ_2 , φ_5 и φ_8 (рис. 3.6) потери тепла происходят за счет радиационного охлаждения и натуральной конвекции.

Динамика распределения и изменения температуры по мере вращения рабочего валка в разных точках и конечная температура валка рассчитывается по уравнению теплопроводности методом конечных разностей [99,100].

Модель расчетов

Потоки рассчитываются по методу МНП [63] (формулы (3.12)-(3.16)). Индексы заменены с m, k на i, j соответственно. Индекс i отвечает за расчет по радиусу, а j – по углу.

Этап 1. Приближенные потоки [99,100]:

Изменяя коэффициенты в формуле (3.12) и упрощая, получим

$$d_1 \cdot \tilde{U}_{i-1,j} - (1 + d_1 + d_1 \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}}) \cdot \tilde{U}_{i,j} + d_1 \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}} \cdot \tilde{U}_{i+1,j} = d_2 \cdot r_i \cdot (T_{i+1,j} - T_{i,j}),$$

где $d_1 = \frac{\sigma\tau}{2h_r^2} \lambda$, $d_2 = -\frac{\lambda}{h_r}$, $\sigma = 2$ – коэффициент аппроксимации.

Произведя замену и упрощение в (3.13), получили

$$d_3 \tilde{V}_{i,j-1} - (r_i^2 + 2d_3) \cdot \tilde{V}_{i,j} + d_3 \cdot \tilde{V}_{i,j+1} = d_4 \cdot r_i \cdot (T_{i,j+1} - T_{i,j}),$$

где $d_3 = \frac{\sigma\tau}{2h_\varphi^2} \lambda$;

$$d_4 = -\frac{\lambda}{h_\varphi}.$$

Дивергентное замыкание этого этапа согласно формуле (3.14):

$$T_{i,j+1} = T_{i,j} + \frac{1}{r_i} \left[\frac{\tau}{h_r} (\tilde{U}_{i,j} - \tilde{U}_{i-1,j}) + \frac{\tau}{h_\varphi} (\tilde{V}_{i,j} - \tilde{V}_{i,j-1}) \right]$$

порождает схему первого порядка.

Решая полученные уравнения методом прогонки, получаем для приближенных потоков рекуррентные формулы по радиусу:

$$P_i = \frac{d_1 \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}}}{1 + d_1(1 + \frac{r_i}{r_{i+1}} - P_{i-1})}, \quad Q_i = P_i \frac{d_1 \cdot Q_{i-1} - d_2 \cdot r_i \cdot (T_{i+1,j} - T_{i,j})}{d_1 \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}}}$$

с граничными условиями:

$$P_0 = 0, \quad Q_0 = 0, \quad P_{Nr} = 0, \quad Q_{Nr} = -\frac{a \cdot q}{\lambda}.$$

Рекуррентные формулы приближенных потоков по углу:

$$P_j = \frac{d_3}{2d_3 + r_j^2 - d_3 \cdot P_{j-1}}, \quad Q_j = P_j \frac{d_3 \cdot Q_{j-1} - d_4 \cdot r_j \cdot (T_{i,j+1} - T_{i,j})}{d_3}$$

с граничными условиями:

$$P_0 = 0, \quad Q_0 = 0, \quad P_{N\varphi} = 0, \quad Q_{N\varphi} = 0.$$

Решение находим по формулам для потоков по радиусу и углу соответственно для приближенных потоков:

$$\tilde{U}_{i,j} = Q_i + P_i \cdot \tilde{U}_{i+1,j}, \quad \tilde{V}_{i,j} = Q_j + P_j \cdot \tilde{V}_{i,j+1}.$$

Для реализации схемы второго порядка выполняем второй этап — пересчет потоков, соответствующий уравнениям:

Этап 2. Точные потоки [99,100]

После замены индексов в (3.15) получим формулу для точных потоков U:

$$d_5 \cdot U_{i-1,j} - (1 + d_5 + d_5 \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}}) \cdot U_{i,j} + d_5 \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}} \cdot U_{i+1,j} = d_2 \cdot r_i \cdot (T_{i+1,j} - T_{i,j}) - d_6 \cdot [\frac{r_i}{r_{i+1}} (\tilde{V}_{i+1,j} - \tilde{V}_{i,j}) - \tilde{V}_{i,j} + \tilde{V}_{i-1,j}],$$

где $d_5 = \frac{\tau \lambda}{2h_r^2},$

$$d_6 = \frac{\tau \lambda}{2h_r h_\varphi}.$$

Изменяя формулу (3.16), рассчитаем точные потоки V:

$$d_7 \cdot V_{i,j-1} - (1 + 2d_7) \cdot V_{i,j} + d_7 \cdot V_{i,j+1} = d_4 \cdot r_i \cdot (T_{i,j+1} - T_{i,j}) - \\ - d_6 \cdot (\tilde{U}_{i,j+1} - \tilde{U}_{i,j} - \tilde{U}_{i-1,j+1} + \tilde{U}_{i-1,j}),$$

где $d_7 = \frac{\tau \lambda}{2h_\varphi^2}$.

Дивергентное замыкание этого этапа, согласно (3.17):

$$T_{i,j+1} = T_{i,j} + \frac{1}{r_i} \left[\frac{\tau}{h_r} (U_{i,j} - U_{i-1,j}) + \frac{\tau}{h_\varphi} (V_{i,j} - V_{i,j-1}) \right].$$

Решая полученные уравнения методом прогонки, получаем для приближенных потоков рекуррентные формулы по радиусу:

$$P_i = \frac{d_5 \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}}}{1 + d_5 \cdot (1 + \frac{r_i}{r_{i+1}} - P_{i-1})},$$

$$Q_i = P_i \frac{d_5 \cdot Q_{i-1} - d_2 \cdot r_i \cdot (T_{i+1,j} - T_{i,j}) + d_6 \cdot [\frac{r_i}{r_{i+1}} (\tilde{V}_{i+1,j} - \tilde{V}_{i,j}) - \tilde{V}_{i,j} + \tilde{V}_{i-1,j}]}{d_5 \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}}}$$

с граничными условиями: $P_0 = 0$, $Q_0 = 0$, $P_{N_r} = 0$, $Q_{N_r} = -\frac{a \cdot q}{\lambda}$.

Формулы приближенных потоков по углу:

$$P_j = \frac{d_7}{1 + 2d_7 - d_7 \cdot P_{j-1}},$$

$$Q_j = P_j \frac{d_7 \cdot Q_{j-1} - d_4 \cdot r_j \cdot (T_{i,j+1} - T_{i,j}) + d_6 (\tilde{U}_{i,j+1} - \tilde{U}_{i,j} - \tilde{U}_{i-1,j} + \tilde{U}_{i-1,j})}{d_7}.$$

с граничными условиями: $P_0 = 0$, $Q_0 = 0$, $P_{N_\varphi} = 0$, $Q_{N_\varphi} = 0$.

Решение находим по формулам для потоков по радиусу и углу соответственно для точных потоков:

$$U_{i,j} = Q_i + P_i \cdot U_{i+1,j}, \quad V_{i,j} = Q_j + P_j \cdot V_{i,j+1}.$$

Модель расчета теплового состояния рабочего валка по длине бочки

Для расчета теплового профиля по длине валок условно разбили на 10 частей (11 расчетных поперечных профилей), принимая условие, что тепловой профиль симметричен во время прокатки, делим половину длины

валка на 5 частей. В каждой части рассчитывали тепловое распределение температуры поперечного профиля рабочего валка независимо от других частей (рис. 3.7) [99,100].

Разбиение валка на расчетные профили



Рисунок 3.7 – Разбиение бочки валка для расчета его теплового состояния

3.4 Адаптация математической модели теплового состояния рабочих валков для действующих условий производства с помощью искусственной нейронной сети

В качестве инструмента подбора коэффициентов теплопередачи в модели теплового состояния рабочих валков применительно к ШСГП 2000 ПАО «ММК» был рассмотрен способ определения коэффициентов с помощью ИНС. ИНС позволяют эффективно строить нелинейные зависимости.

Подготовка данных

Основные данные для обучения ИНС были выгружены из цеховой базы учета данных технологических параметров прокатки на ШСГП 2000 ПАО «ММК». Данные фиксировались непосредственно датчиками АСУТП стана (кроме температуры рабочих валков). В условиях листопрокатного цеха температура рабочих валков чистовой группы измеряется после их вывалки из клетки и заносится в базу учета данных. Измерение температуры рабочих валков производится инфракрасными пирометрами TI213EL и TI315EL

TI213EL с ошибкой измерения ± 2 °C или тепловизором SDS-Infrared HotFind-DXT с ошибкой измерения ± 1 °C (рис. 3.8). Для снижения ошибки измерения температуры из-за разности коэффициентов светоотражения вдоль бочки валка клеилась лента из крепированной бумаги с известной степенью излучения (рис. 3.8).

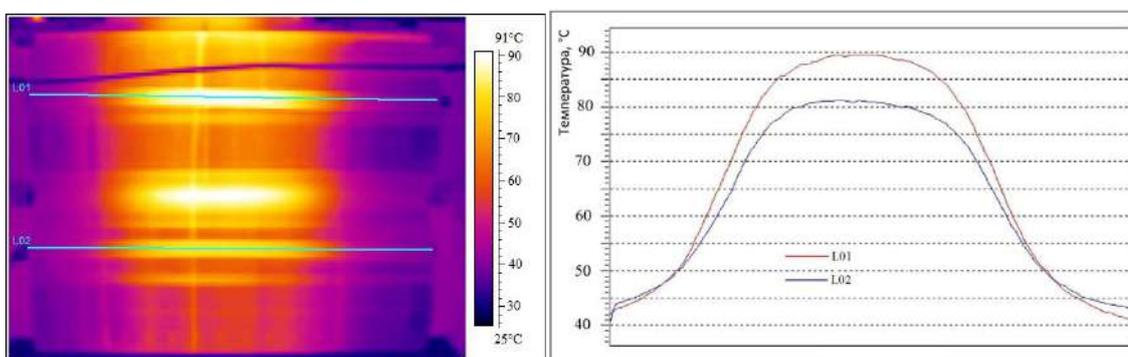


Рисунок 3.8 - Тепловизионный снимок рабочих валков чистой группы ШСГП 2000 ПАО «ММК» после вывалки из клетки

Построение и обучение искусственной нейронной сети

Схема способа обучения ИНС приведена на рисунке 3.9.

Для обучения ИНС использовали тепловую модель, основанную на уравнениях теплового баланса:

$$Q_{р.в.} = Q_{охл.р.в.}^{вх.} + Q_{охл.р.в.}^{вых.} + Q_{охл.р.в.}^{о.в.},$$

где $Q_{р.в.}$ – количество теплоты, переданное от полосы рабочему валку вследствие контакта и излучения (контакт валка с полосой; зоны валка, подвергающиеся излучению), Дж;

$Q_{охл.р.в.}^{вых.}$ – количество теплоты, отданное рабочим валком охлаждающей воде, воздуху с выходной стороны клетки кварто (охлаждение стекающей водой; струйное охлаждение водой; охлаждение на воздухе), Дж;

$Q_{охл.р.в.}^{вх.}$ – количество теплоты, отданное рабочим валком охлаждающей воде, воздуху с входной стороны клетки кварто (охлаждение на воздухе, струйное охлаждение водой, охлаждение стекающей водой), Дж;

$Q_{охл.р.в.}^{о.в.}$ – количество теплоты, отданное рабочим валком опорному, Дж.

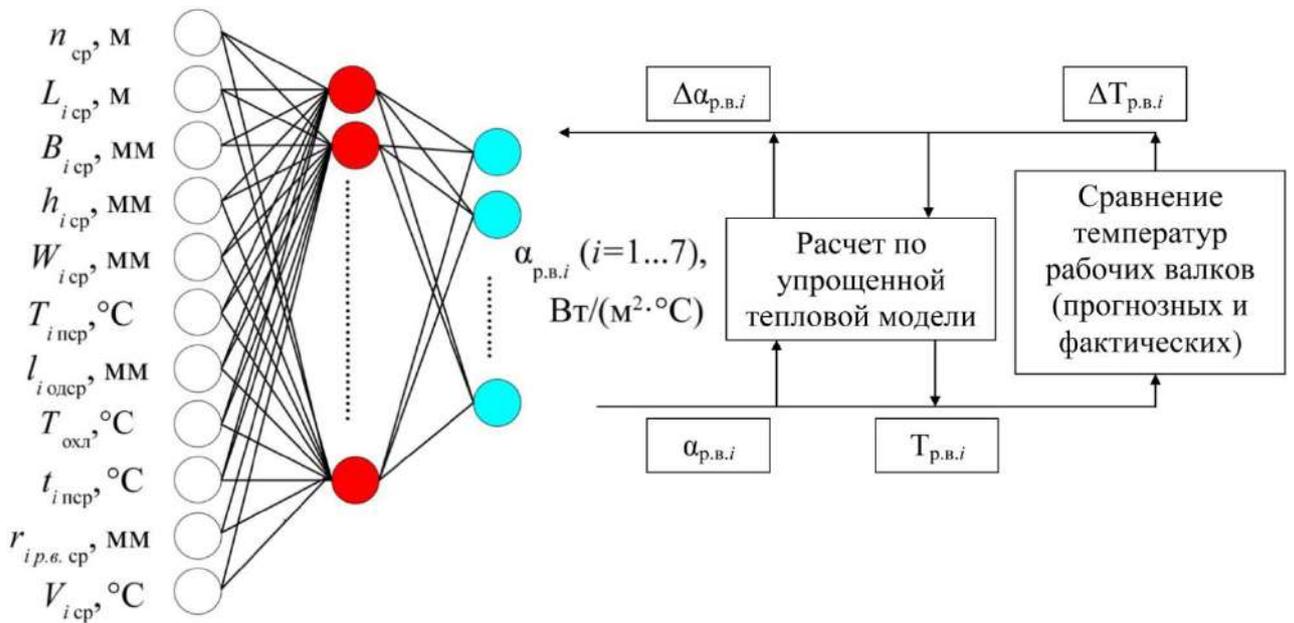


Рисунок 3.9 – Схема обучения ИНС для подбора коэффициента теплопередачи [86,105]: $\Delta\alpha_{p.v.i}$ - разность между ожидаемым и полученным значениями коэффициента; $\Delta T_{p.v.i}$ - разность между фактической температурой валка и прогнозной; n – количество полос в программе прокатки, шт; $L_{i\text{cp}}$ – средняя длина полосы по программе прокатки в i -клетки, мм; $B_{i\text{cp}}$ – средняя ширина полосы по программе прокатки в i -ой клетки, мм; $h_{i\text{cp}}$ – средняя толщина полосы по программе прокатки в i -ой клетки, мм; $W_{i\text{cp}}$ – средний вес полос по программе прокатки в i -ой клетки, мм; $T_{i\text{пер}}$ – средняя температура полосы по программе прокатки в i -ой клетки, °C; $l_{i\text{одер}}$ – средняя длина очага деформации по программе прокатки в i -ой клетки, мм; $T_{\text{охл}}$ – температура воды в системе охлаждения валков и полосы, °C; $r_{i\text{р.в. ср}}$ – радиус рабочего валка в i -ой клетки, мм; $t_{i\text{пер}}$ – средняя паузы между проходами полос, с в i -ой клетки; $V_{i\text{cp}}$ – средняя скорость прокатки в i -той клетки, м/с.

В связи с тем, что измерить температуру поверхности валка на каждом из граничных участков затруднительно, а также для облегчения последующего обучения ИНС, данная модель теплового баланса была упрощена:

$$Q_{\text{охл.р.в.}}^{\text{сум}} = Q_{\text{р.в.}};$$

$$Q_{\text{охл.р.в.}}^{\text{сум}} = \alpha_{\text{р.в.}} \cdot F_{\text{охл.р.в.}}^{\text{сум}} \cdot (t_{\text{р.в.}} - T_{\text{охл}});$$

$$Q_{\text{р.в.}} = \alpha_{\text{конт}} \cdot l_{\text{о.д.}} \cdot b \cdot (T_{\text{п}} - t_{\text{р.в.}}),$$

где $Q_{\text{р.в.}}$ и $Q_{\text{охл.р.в.}}^{\text{сум}}$ – количество тепла полученного рабочим валком от полосы и отданное рабочим валком охладителю соответственно, Дж;

$\alpha_{\text{конт}}$ и $\alpha_{\text{р.в.}}$ – коэффициенты теплопередачи от полосы рабочему валку и от рабочего валка охладителю, Вт/(м²·°С);

$l_{\text{о.д.}}$ - длина очага деформации, мм;

b - ширина полосы, мм;

$F_{\text{охл.р.в.}}^{\text{сум}}$ – площадь поверхности покрытия рабочего валка охладителем, мм²;

$t_{\text{р.в.}}$, $T_{\text{охл}}$ и $T_{\text{п}}$ - температура рабочих валков, охладителя и полосы соответственно, °С.

На выходе ИНС выдает коэффициенты теплопередачи $\alpha_{\text{в.р.}}$ для i -той клетки в чистой группе стана. После расчета коэффициентов $\alpha_{\text{в.р.}}$ для каждой клетки в чистой группе подбираются коэффициенты теплопередачи от полосы рабочему валку $\alpha_{\text{конт.}}$ с помощью составленных уравнений теплового баланса:

$$\alpha_{\text{конт.}} = \frac{\alpha_{\text{р.в.}} \cdot F_{\text{охл.р.в.}}^{\text{сум}} \cdot (t_{\text{р.в.}} - T_{\text{охл}})}{l_{\text{о.д.}} \cdot b \cdot (T_{\text{п}} - t_{\text{р.в.}})}$$

Архитектура ИНС

Архитектура ИНС, показавшей наименьшие ошибки, представлена на рисунке 3.10 (таблица 3.3) [86,105]. Архитектура ИНС представляет собой многослойный перцептрон. ИНС состоит из входного слоя (8 нейронов), двух скрытых слоев (содержащих по 15 и 5 нейронов каждый соответственно), и выходного слоя, содержащего 7 нейронов. В качестве функции активации использовалась функция ReLu. ИНС реализована в PyTorch - в научно вычислительном пакете на основе интерпретируемого языка программирования Python. Параметры ИНС и ее точность приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Параметры ИНС

Архитектура ИНС	Входной слой: 11 нейронов Выходной слой: 7 нейронов Скрытые слои: 1 – 15 нейронов 2 – 5 нейронов
Функция активации	Relu
Режим обучения	«обучение по шагам»
Степень распознавания обучающего множества, %	97,1
Степень распознавания тестового множества, %	91,5
Средняя относительная ошибка, %	11,7
Максимальная относительная ошибка, %	38,4

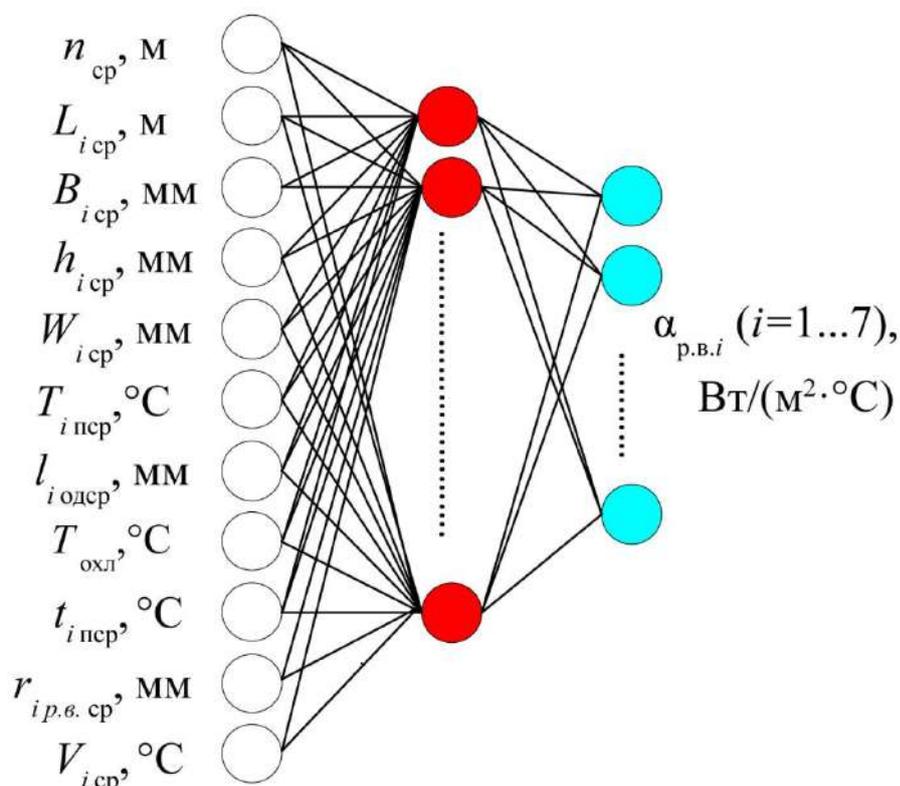


Рисунок 3.10 - Входные и выходные данные нейросетевой модели определения коэффициента теплопередачи $\alpha_{\text{р.в.}}$

На входе нейросетевая модель получает следующие данные:

- n – количество полос в программе прокатки, шт;
- $L_{i\text{cp}}$ – средняя длина полосы по программе прокатки в i -клетки, мм;
- $B_{i\text{cp}}$ – средняя ширина полосы по программе прокатки в i -ой клетки, мм;

- $h_{i\text{ ср}}$ – средняя толщина полосы по программе прокатки в i -ой клетки, мм;
- $W_{i\text{ ср}}$ – средний вес полос по программе прокатки в i -ой клетки, мм;
- $T_{i\text{ ср}}$ – средняя температура полосы по программе прокатки в i -ой клетки, °С;
- $l_{i\text{ од ср}}$ – средняя длина очага деформации по программе прокатки в i -ой клетки, мм;
- $T_{\text{охл}}$ – температура воды в системе охлаждения валков и полосы, °С;
- $r_{i\text{ рв}}$ – радиус рабочего валка в i -ой клетки, мм;
- $t_{i\text{ ср}}$ – средняя паузы между проходами полос, с в i -ой клетки;
- $V_{i\text{ ср}}$ – средняя скорость прокатки в i -той клетки, м/с.

На выходе нейронная сеть выдает коэффициенты теплопередачи $\alpha_{\text{р.в.}}$ для i -той клетки в чистовой группе стана. После расчета коэффициентов $\alpha_{\text{р.в.}}$ для каждой клетки в чистовой группе подбираются коэффициенты теплопередачи от полосы рабочему валку $\alpha_{\text{конт.}}$ с помощью составленных систем уравнения теплового баланса.

3.5 Численная реализация модели расчета теплового состояния рабочего валка на ШСГП 2000 ПАО ММК

На рисунке 3.11 представлено окно программы численно реализованной математической модели теплового состояния рабочих валков.

Программа расчета теплового состояния рабочих валков чистовой группы клеток ШСГП 2000 ПАО «ММК» позволяет прогнозировать среднюю температуру рабочих валков по поперечным сечениям рабочего валка по длине его бочки. Программа внедрена в листопрокатном цеху №10 ПАО «ММК» (Приложение А).

На рисунке 3.12 представлена схема расчета теплового состояния рабочих валков по разработанной программе.

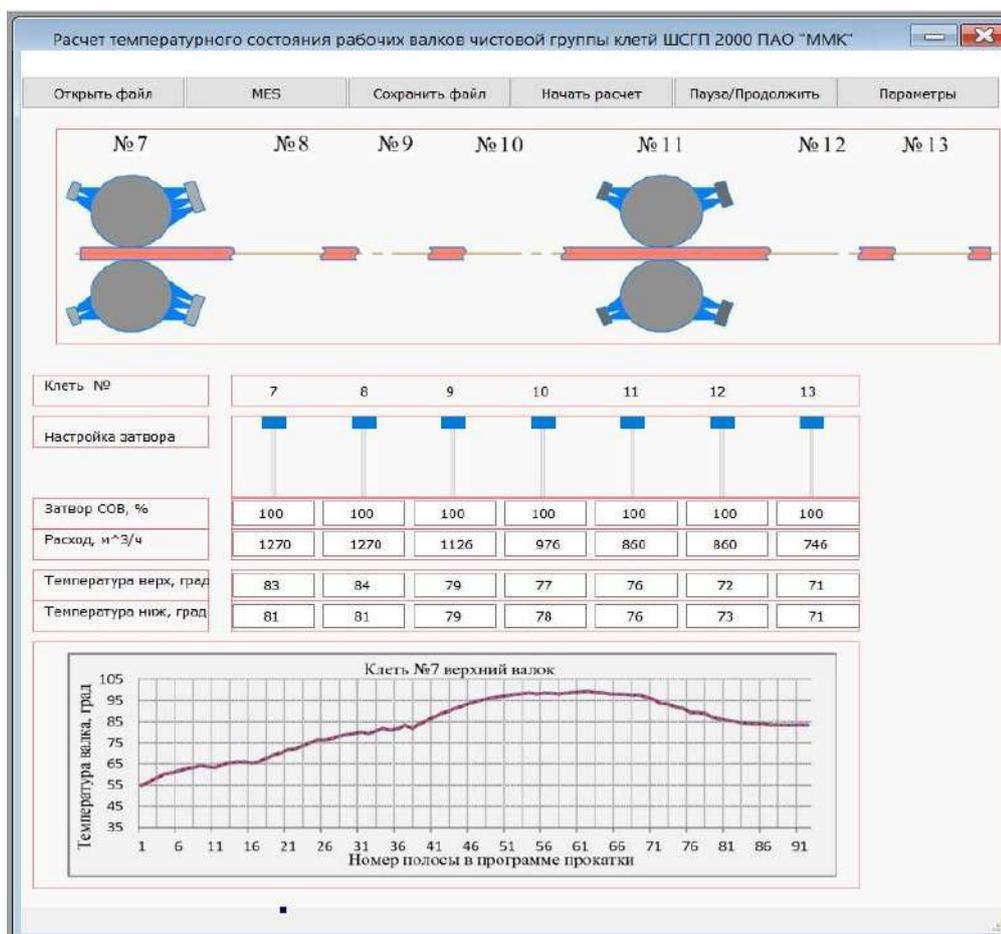


Рисунок 3.11 - Окно программы «Расчет температурного состояния рабочих валков чистой группы ШСГП 2000» [101,103]

Для начала работы программы необходимо загрузить в программу прокатки файл с исходными данными при помощи меню «Открыть файл» или в случае прогнозирования технологических параметров прокатки связать программу с MES-системой листопрокатного цеха №10 – меню «MES». В загружаемом файле содержатся следующие данные:

- № партии, марка стали;
- толщина (мм), ширина (мм), длина (м) *i*-ой конечной горячекатаной полосы (в случае отсутствия рассчитывается);
- пауза между проходами (с) (в случае отсутствия рассчитывается);
- температура *i*-ой полосы после последней черновой клетки (клеть №6-ой клетки) (°C);
- температура конца прокатки *i*-ой полосы (°C);

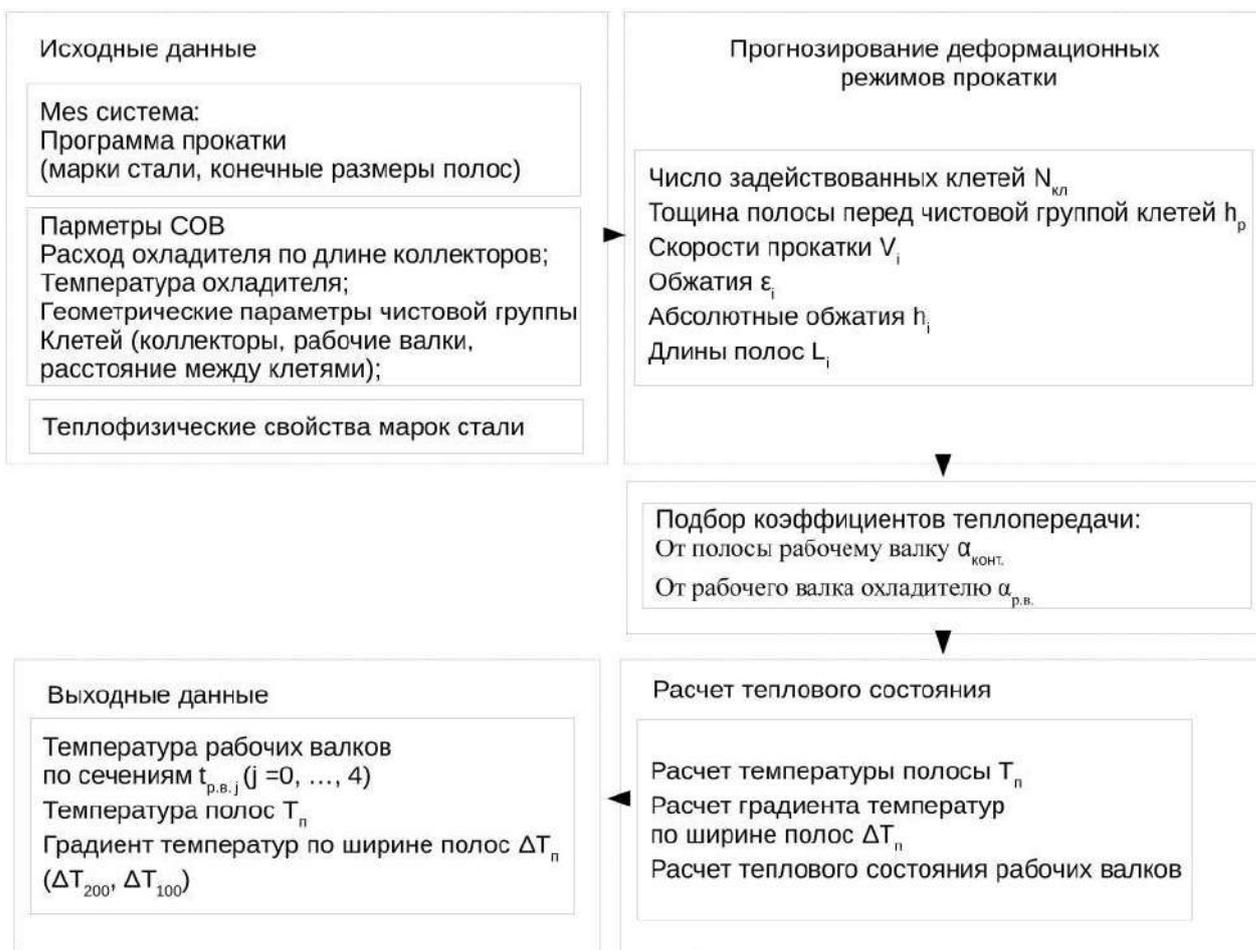


Рисунок 3.12 – Схема расчета теплового состояния рабочих валков по разработанной программе

- толщина (мм) i -ой полосы после последней черновой клетки (в случае отсутствия рассчитывается);
- химический состав i -ой полосы;
- режимы работы (код) межклетевого охлаждения i -ой полосы.

Программа для определения теплового состояния рабочих валков рассчитывает технологические параметры процесса прокатки по методике, полученной во второй главе: обжатия ($\epsilon_i, \%$) [93], скорости прокатки ($V_i, м/с$), температуру полосы на выходе из клетки ($T_i, ^\circ C$), паузы ($t_i, с$).

В программе для расчета теплового состояния рабочих валков необходимо ввести следующие параметры (с помощью меню «Параметры»): диаметры (мм) и начальные температуры ($^\circ C$) рабочих валков; теплофизические свойства рабочих валков (теплоемкость, теплопроводность,

плотность); расход воды ($\text{м}^3/\text{ч}$) и температура воды ($^{\circ}\text{C}$) в системе охлаждения рабочих валков и в системе межклетевого охлаждения; температура окружающего воздуха ($^{\circ}\text{C}$). Данные по теплофизическим свойствам рабочих валков принимались на основании базы данных «Total Materia» [104]. Коэффициенты теплопередачи от рабочего валка охладителю и от полосы рабочему валку определяются с помощью разработанной и интегрированной в программу нейросетевой модели (рис. 3.10).

Анализ погрешностей расчетов адаптированной модели теплового состояния рабочих валков применительно к ШСГП 2000 ПАО «ММК»

Погрешность разработанной программы расчета теплового состояния рабочих валков (п.3.3) с подобранными коэффициентами оценивали путем сравнения значений температур рабочих валков, рассчитанных по данным цехового учета и значениями температур измеренных после вывалки. Точность расчетов оценивали по средней абсолютной ошибке в процентах $\varepsilon_{\text{МАРЕ}}$, по средней ошибке $\varepsilon_{\text{МЕ}}$ и по стандартному отклонению σ (таблица 3.4). Таким образом, средняя абсолютная ошибка $\varepsilon_{\text{МАРЕ}}$, средняя ошибка $\varepsilon_{\text{МЕ}}$ и стандартное отклонение σ не превышают 11,4 %, 7,1 $^{\circ}\text{C}$ и 8,8 $^{\circ}\text{C}$ соответственно и в среднем по всем клетям составляют 8,7 %, 5,4 $^{\circ}\text{C}$ и 6,7 $^{\circ}\text{C}$.

Таблица 3.4. Погрешности расчетов температуры рабочих валков

№ клетки	Средняя ошибка $\varepsilon_{\text{МЕ}}$, $^{\circ}\text{C}$	Средняя абсолютная ошибка $\varepsilon_{\text{МАРЕ}}$, %	Стандартное отклонение σ , $^{\circ}\text{C}$
7	4,9	8	6,1
8	5,3	8,7	6,6
9	4,5	7,5	5,6
10	5,9	9,6	7,4
11	5	8,1	6,3
12	4,8	7,9	6,1
13	7,1	11,4	8,8

В таблице 3.5. приведены усредненные коэффициенты теплопередачи по всем типам программ прокатки.

Таблица 3.5. - Усредненные коэффициенты теплопередачи при прокатке на ШСГП 2000 ПАО «ММК»

Коэффициент	Номер клетки						
	7	8	9	10	11	12	13
$\alpha_{\text{конт}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	3669	3552	3745	3480	3398	3249	3243
$\alpha_{\text{р.в.}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	3575	3461	3649	3391	3311	3165	3160
($\alpha_{\text{конт}}$ от полосы рабочему валку, $\alpha_{\text{р.в.}}$ от рабочего валка охладителю)							

Полученные значения коэффициентов хорошо согласуются с результатами работы Хлопотина М.В. [59,62], по которым значения коэффициента $\alpha_{\text{р.в.}}$ находятся в диапазоне 2300...3900 Вт/(м²·°C) В таблице 3.6. приведен пример расчетных и фактических температур на широкополосном стане 2000 горячей прокатки ПАО «ММК». Относительная ошибка расчетных и фактических температур не превышает 19%.

Таблице 3.6. - Сравнение значений расчетных и фактических температур для программы прокатки №51798

Номер клетки	Фактическая температура, °C	Расчетная температура, °C	Отклонение, °C
7	78	84,24	6,24
8	72	78,264	6,264
9	61	65,575	4,575
10	62	67,952	5,952
11	60	64,86	4,86
12	64	58,944	5,056
13	51	45,186	5,814

Выводы по третьей главе

3.1. Получена усовершенствованная математическая модель теплового состояния полосы при прокатке на ШСГП. Модель учитывает основные виды теплообмена при прокатке (теплопроводность полосы, конвективный теплообмен при охлаждении воздухом и системами охлаждения полосы, теплообмен при контакте с валком, а также влияние пластической деформации на температуру материала). Отличительной особенностью математической модели является учет перепада температур относительно центра и краев полосы по её ширине. Данные о неравномерности температуры были получены с помощью тепловизора SDS-Infrared HotFind-DXT. После обработки данных получены зависимости перепадов температур по ширине полосы. Определено, что перепад температур по ширине полосы составляет диапазон 15...90 °С.

3.2. Усовершенствована математическая модель теплового состояния рабочего валка в системе «полоса-валок», учитывающая основные процессы теплообмена: разогрев поверхности валка от контакта с горячей полосой, зона активного охлаждения (охлаждение струями воды), зона пассивного охлаждения (охлаждение воздухом или стекающей водой), потери тепла за счет радиационного охлаждения и натуральной конвекции.

Сама модель представляет собой независимые друг от друга математические модели расчета теплового состояния в поперечном профиле рабочего валка. Отличительной особенностью математической модели является то, что в качестве граничных условий учитывается перепад температуры полосы по ее ширине в очаге деформации.

3.3. Разработана ИНС, которая позволяет подбирать коэффициент теплопередачи суммарного активного и пассивного охлаждения $\alpha_{р.в.}$ и от полосы рабочему валку $\alpha_{конт.}$. ИНС позволяет ускорить и упростить подбор теплофизических коэффициентов для моделей теплового состояния рабочих валков без проведения специальных промышленных экспериментов и

адекватно оценивать текущее тепловое состояние рабочих валков во время прокатки.

Средняя относительная ошибка ИНС составила 11,7 %, максимальная относительная ошибка – 38,4 %. Средняя абсолютная ошибка $\varepsilon_{МАРЕ}$, средняя ошибка $\varepsilon_{МЕ}$ и стандартное отклонение σ расчетов по разработанной и адаптированной тепловой модели применительно к ШПСГП 2000 ПАО «ММК» не превышают 8,7 %, 5,4 °С и 6,7 °С соответственно (при расчете с использованием данных полученных непосредственно из цеховой базы учета данных ЛПЦ-10 ПАО «ММК»). При прогнозировании технологических параметров прокатки средняя абсолютная ошибка $\varepsilon_{МАРЕ}$, средняя ошибка $\varepsilon_{МЕ}$ и стандартное отклонение σ расчетов не превышают 17,1 %, 12,0 °С и 9,9 °С соответственно.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕПЛООВОГО ПРОФИЛЯ РАБОЧИХ ВАЛКОВ. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ С СОХРАНЕНИЕМ КАЧЕСТВА ПОЛОСЫ

Четвертая глава посвящена исследованию теплового состояния рабочего вала и исследованию влияния теплового состояния на профиль рабочего вала. Также в главе описаны разработка и внедрение режимов и конструкции коллектора охлаждения рабочих валков на ШСГП 2000 ПАО «ММК». Проведена оценка эффекта от внедренных мероприятий.

4.1 Исследование теплового состояния рабочих валков при прокатке на ШСГП 2000 ПАО «ММК»

С помощью разработанной математической модели тепловых процессов в системе «полоса-валок» проведено аналитическое исследование температурного состояния рабочих валков в чистовой группе ШСГП 2000 ПАО «ММК» [102]. Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.» Носова (Приложение Б).

На рисунках 4.1-4.4 изображены графики изменения температуры бочки рабочего вала в чистовой группе стана.

На рисунках 4.1 и 4.2 показано изменение средней температуры сечения середины бочки верхнего вала по чистовым клетям №№7, 8, 10 и 13 монтажных партий № 49373 и 49380 от февраля 2019 года общей протяженностью 68000 м и 122000 м соответственно. Как видно по графикам температура вала в клетях №№7 и 8 выше в связи высокой температурой полосы, низкой скоростью прокатки и большой длиной очага деформации в данных клетях относительно других в чистовой группе стана. Клеть №13 в начале прокатки монтажной партии не была задействована, в связи с этим наблюдается падение температуры вала в ней вплоть до прокатки 22 и 61 полосы в монтажных партиях № 49373 и 49380 соответственно.

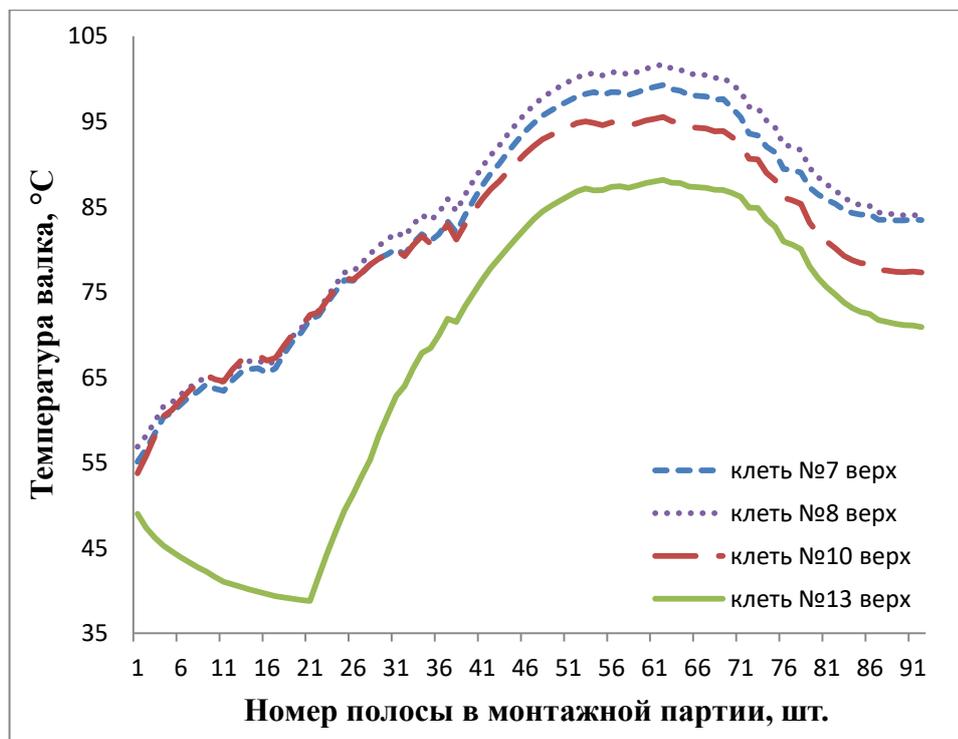


Рисунок 4.1 – Средняя температура сечения середины бочки рабочих валков во время прокатки монтажной партии № 49373

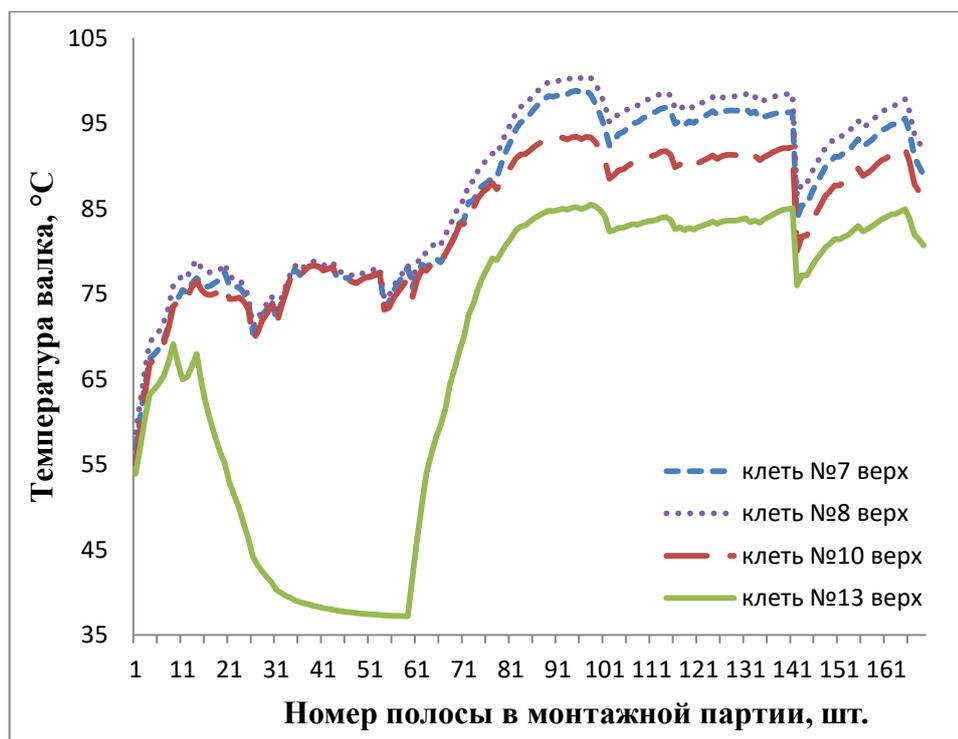


Рисунок 4.2 – Средняя температура сечения середины бочки рабочих валков во время прокатки монтажной партии № 49380

На рисунках 4.3 и 4.4 изображены графики средней температуры поперечных сечениях бочки валков (от середины бочки валка до ее края) при

прокатке монтажных партий № 49171 и 49170 от февраля 2019 года общей протяженностью 68000 м и 122000 м соответственно.

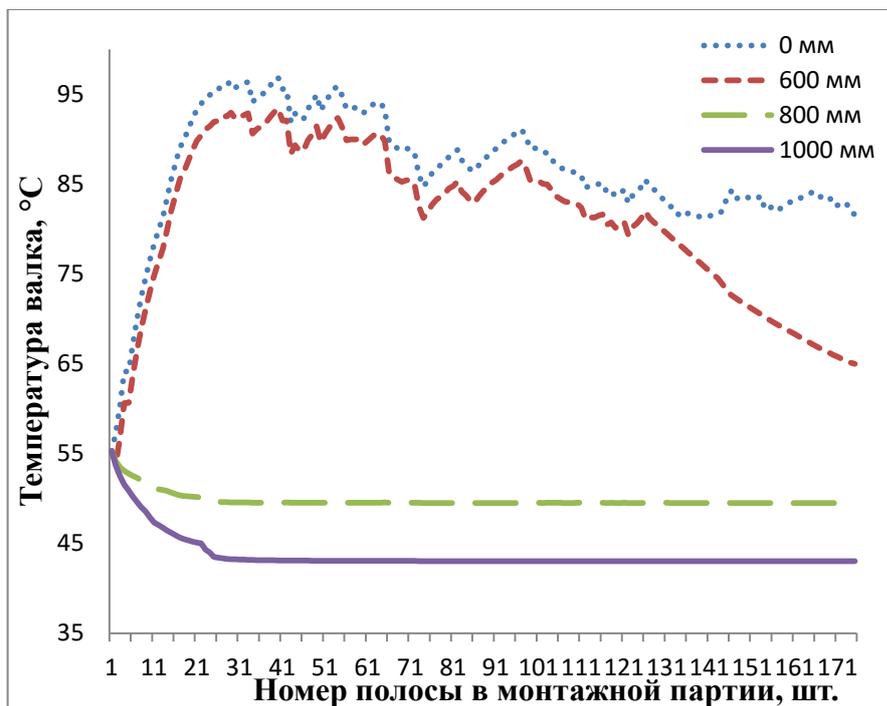


Рисунок 4.3 - Средняя температура поперечных сечений бочки рабочего вала в клети №7 от середины (0 мм) до края (1000 мм) при прокатке монтажной партии № 49171

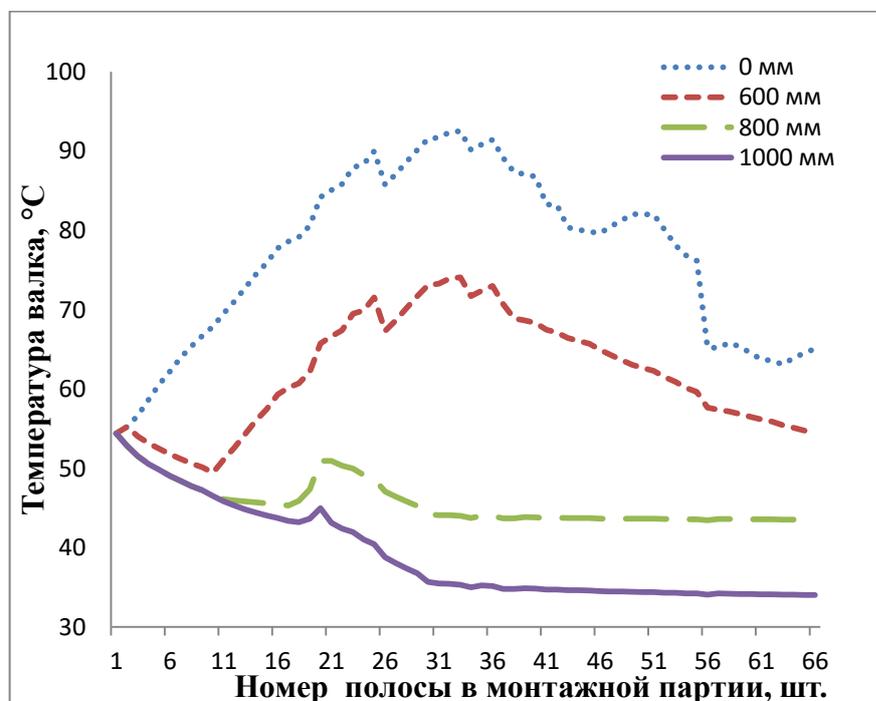


Рисунок 4.4 - Средняя температура поперечных сечений бочки рабочего вала в клети №7 от середины (0 мм) до края (1000 мм) при прокатке монтажной партии № 49170

По графикам (рис. 4.4 и 4.5) видно, что градиент по температурам между средней частью бочки валка и ее краем достигает 50...60 °С в процессе прокатки. Области по краям бочки валка в 200 мм каждая практически не задействованы во время монтажа. Что также подтверждается общей долей полос прокатанных на ШСГП 2000 ПАО ММК в 2018-2019гг. шириной более 1500 мм (табл. 4.1).

Таблица 4.1 - Доля полос прокатанных на ШСГП 2000 ПАО «ММК» в 2018-2019гг. различных ширин

Диапазон ширин полос, мм	<1000	1000-1500	>1500
Процентная доля прокатанных полос с данной шириной, %	2,65	84,09	13,25

4.2 Исследование изменения теплового профиля рабочего валка при прокатке на ШСГП 2000 ПАО «ММК»

Тепловой профиль рабочего валка рассчитывался согласно формуле Герца со следующим допущением: валок имеет в центре и на поверхности одинаковую температуру, соответствующую данному сечению – средняя температура поперечного сечения валка.

$$\Delta D_i = \beta R(T_{0i} - T_{1i}),$$

где ΔD_i - тепловое расширение валка в i -точке, мм;

β - коэффициент температурного расширения материала валка °С⁻¹;

T_{0i}, T_{1i} – средние температуры поперечных профилей бочки рабочего валка в начале и в процессе прокатки соответственно в i -ой точке.

На рисунках 4.5, 4.6 и 4.7 показано тепловое расширение в центре бочки рабочего валка при исполнении программ прокатки № 49171 и № 49170. На рисунках 4.8 и 4.9 – для тех же программ прокатки в разных точках бочки валка по ее длине.

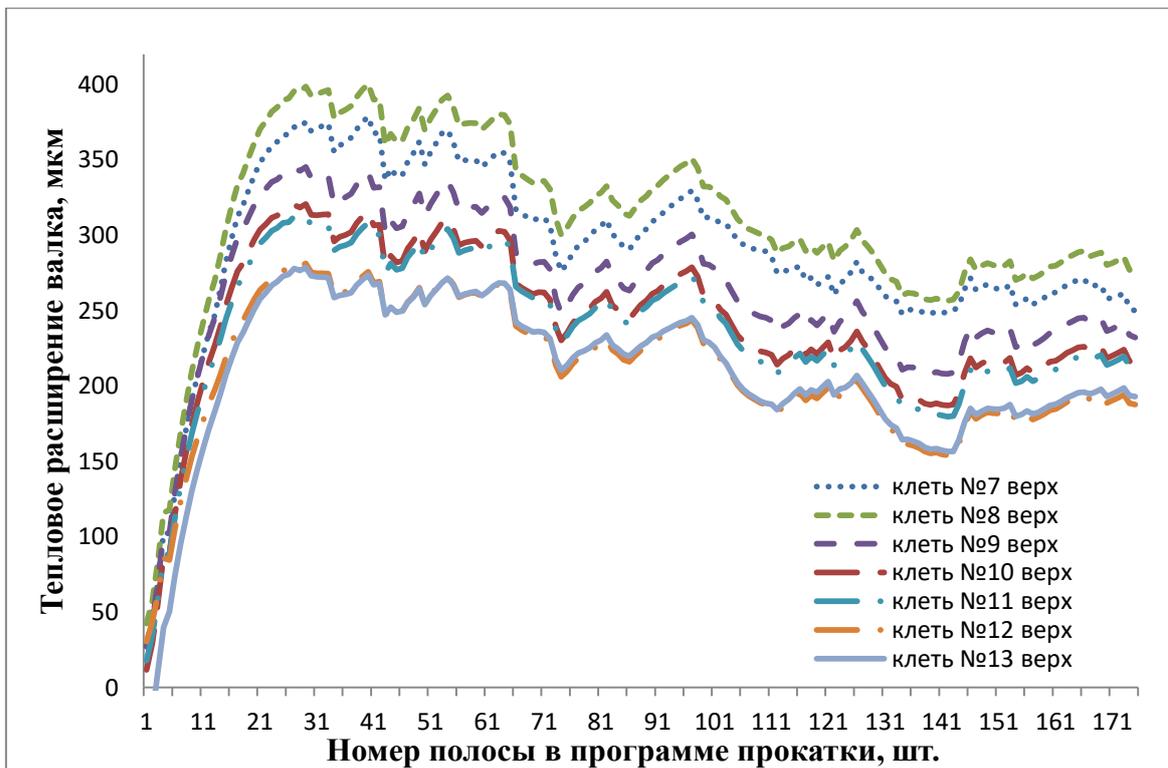


Рисунок 4.5 – Тепловое расширение в центре бочки рабочего вала в чистовой группе клетей при исполнении программы прокатки № 49171

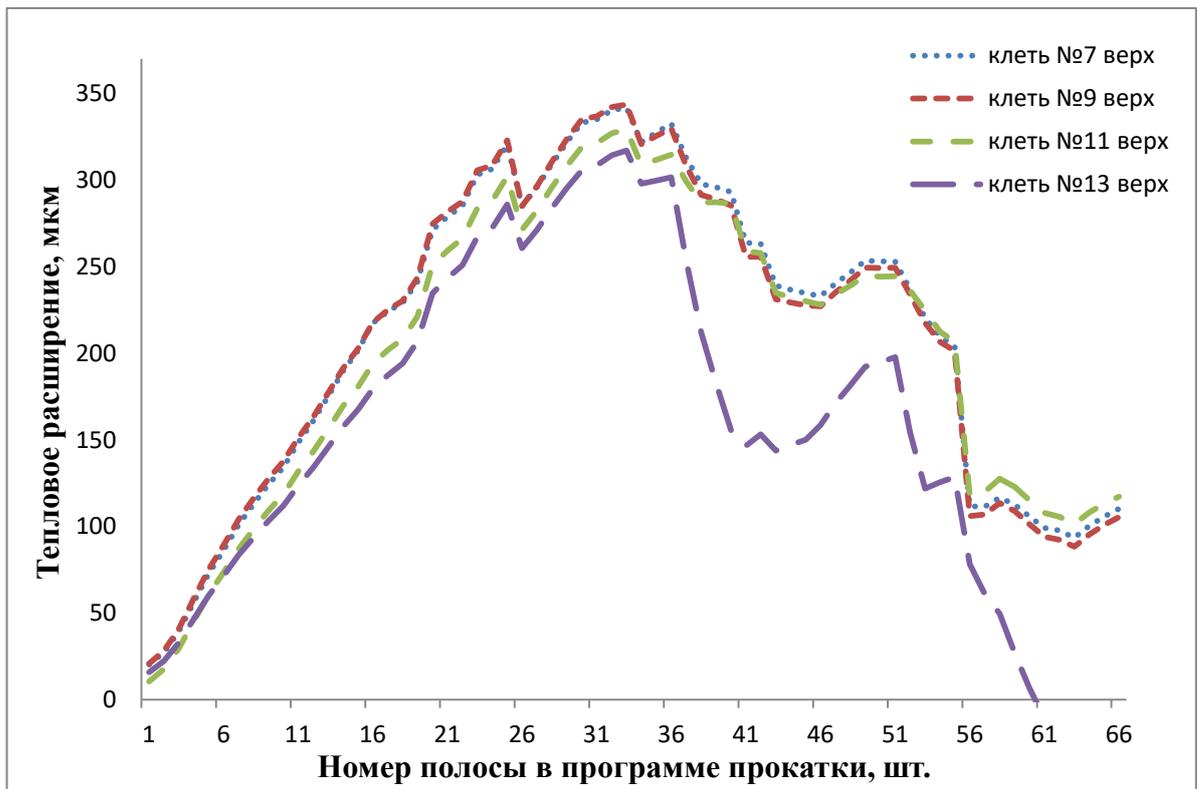


Рисунок 4.6 – Тепловое расширение в центре бочки рабочего вала в чистовой группе клетей при исполнении программы прокатки № 49170

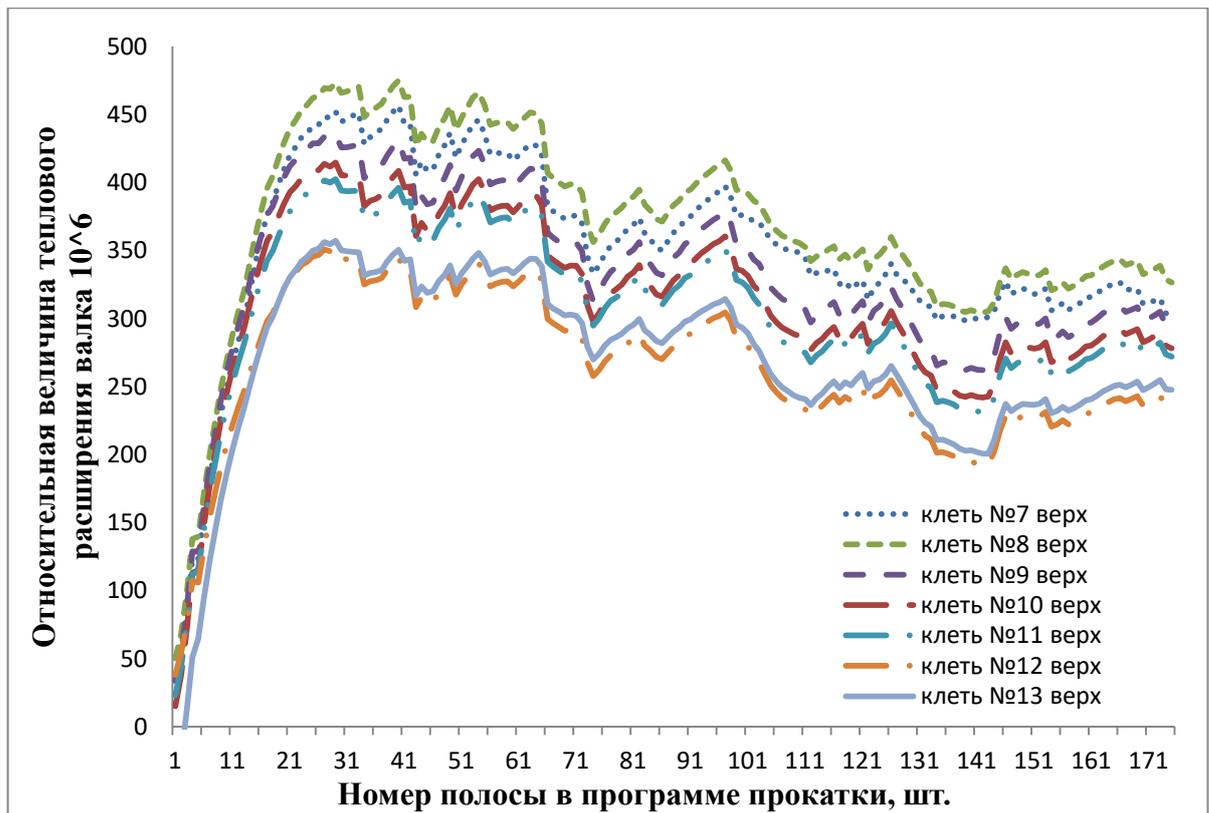


Рисунок 4.7 – Тепловое расширение в центре бочки рабочего вала в чистой группе клетей при выполнении программы прокатки № 49170

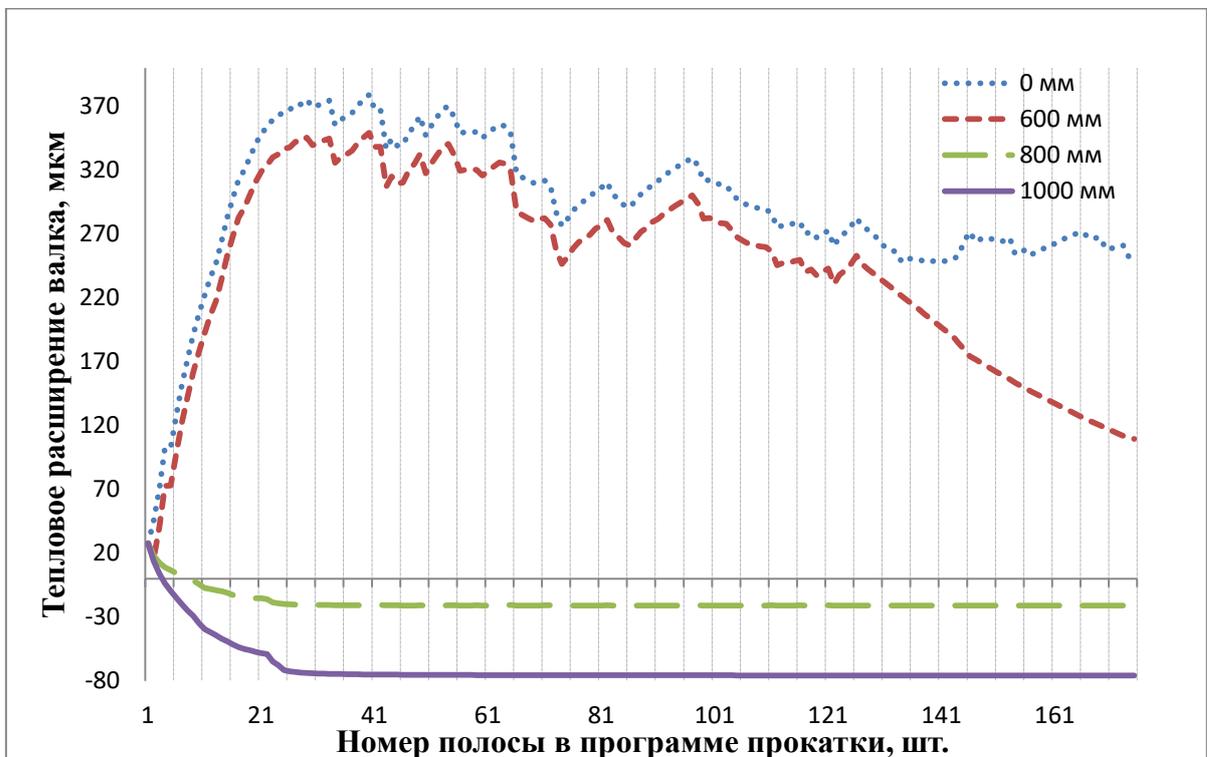


Рисунок 4.8 – Тепловое расширение бочки верхнего рабочего вала по длине в точках в 600, 800 и 1000 мм от ее середины (0 мм) в клети №7 при выполнении программы прокатки № 49171

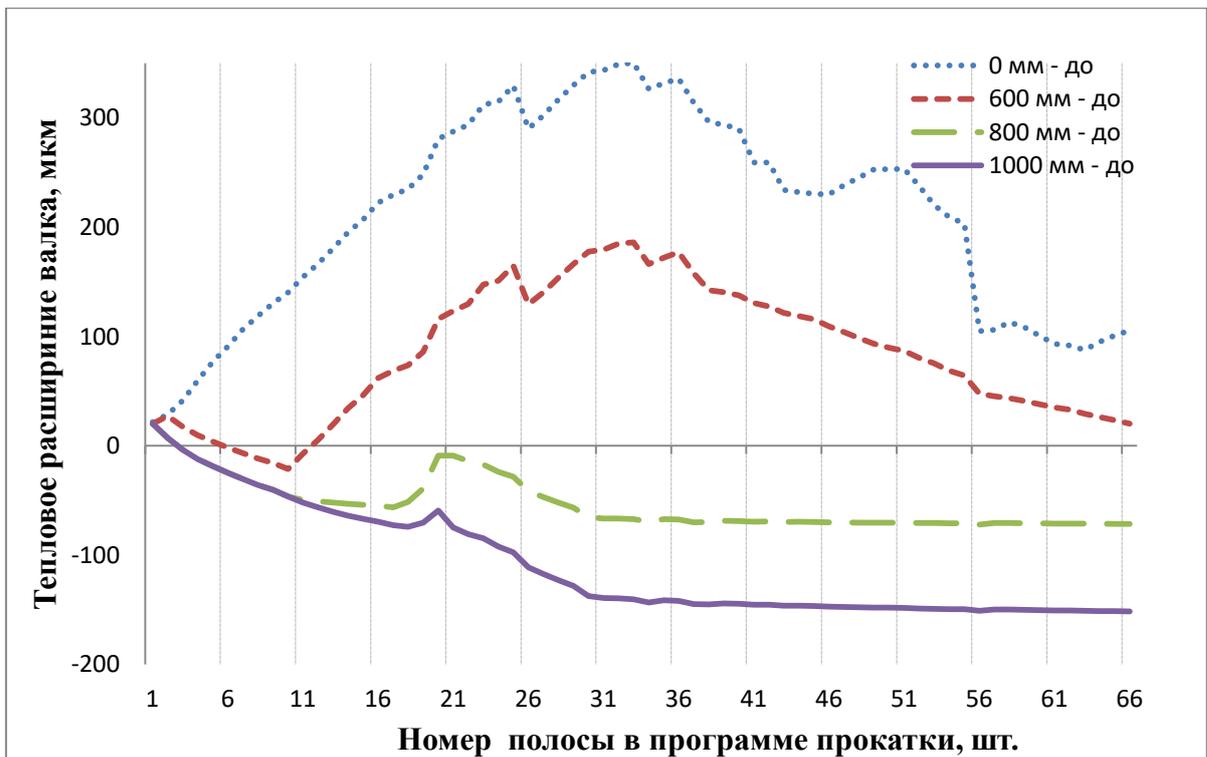


Рисунок 4.9 – Тепловое расширение бочки верхнего рабочего вала по длине в точках в 600, 800 и 1000 мм от ее середины (0 мм) в клети №7 при исполнении программы прокатки № 49170

Тепловая выпуклость бочки рабочих валков изменяется в соответствии с тепловым состоянием рабочего вала: на графиках по рисунку 4.5 четко прослеживается снижение максимальной тепловой выпуклости от первых клетей чистовой группы до последних. Это также подтверждается графиками (рис. 4.7) с относительными величинами теплового расширения ($\Delta D_{отн}$):

$$\Delta D_{отн} = \Delta D / D_0 \cdot 10^6,$$

где $\Delta D_{отн}$ – относительная величина теплового расширения, мм;

D_0 – диаметр вала в начале прокатки, мм;

ΔD – тепловое расширение вала, мм.

Тепловое расширение бочки рабочего вала в средней части может достигать 450 мкм, что соотносится с их вогнутыми станочными профилировками, применяемыми на ШСГП 2000 ПАО «ММК» (таблица 4.2.) согласно технологической инструкции «Подготовка, эксплуатация и учет стойкости прокатных валков стана 2000 горячей прокатки ЛПЦ-10» (Г)ТИ-

101-П-ГЛ10-384-2014г. Отклонение от цилиндрического профиля бочки рабочего валка в центре варьируется в диапазоне -0,05...-0,55 мм.

Таблица 4.2. Профилировка рабочих валков чистовой группы ШСГП 2000 ПАО «ММК»

№ клетки	Диаметр бочки, мм				Профилировка валков для производства базового сортамента, мм		Поправки к базовой профилировке рабочих валков (мм на пару) для		
	рабочие		опорные		рабочие	опорные	подката двойной ширины для жести	стали 07ГБЮ, 07ГБЮА, 07ГБЮТА	электротехнических сталей
	max	min	max	min					
7	850	810	1600	1500	-0,55/-0,50	+1,00/+1,00	+0,40	+0,30	-0,25
8	850	810	1600	1500	-0,30/-0,35	+0,70/+0,70	+0,30	+0,25	-0,20
9	800	760	1600	1500	-0,40/-0,40	+0,70/+0,70	+0,25	+0,20	-0,25
10	800	760	1600	1500	-0,30/-0,30	+0,70/+0,70	+0,25	+0,15	-0,25
11	800	760	1600	1500	-0,30/-0,20	+0,70/+0,70	+0,25	+0,15	-0,25
12	800	760	1600	1500	-0,25/-0,15	+0,50/+0,70	+0,20	+0,15	-0,20
13	800	760	1600	1500	-0,30/-0,20	+0,50/+0,70	+0,15	+0,15	-0,15

Примечание - в числителе для верхнего валка, в знаменателе для нижнего. Данная профилировка является первоначальной после перевалки опорных валков чистовой группы

4.3 Разработка и внедрение мероприятий, направленных на повышение стойкости рабочих валков ШСГП 2000 ПАО «ММК»

4.3.1 Разработка рациональных режимом охлаждения

С целью стабилизации теплового состояния рабочих валков необходимо разработать и внедрить комплекс технических мероприятий. Однако необходимо учитывать, что на действующих ШСГП сортамент производимой продукции достаточно разнообразен, как по геометрическим параметрам, так и по реологическим свойствам. Для унификации предлагаемых технических решений было предложено составить классификацию программ прокатки, на основе которой разработаны технологические рекомендации, заключающиеся в определении расхода

охладителя для каждой клетки в зависимости от суммарной длины монтажной партии ($L_{\text{сум}}$, м) и коэффициента, учитывающего ширину полос ($V_{\text{пр}}$).

Изменение и управление расхода охладителя предложено производить положением гидрозатвора в системе охлаждения валков для каждой клетки ШСГП 2000 ПАО «ММК». За счет частичного закрытия затворов на последних клетях чистовой группы (№10-13) происходит перераспределение расхода охладителя по клетям. Результаты предложенных технологических решений систематизированы и приведены в таблице 4.3 [92,106,107].

Таблица 4.3 - Настройка системы охлаждения валков в чистовой группе клетей в зависимости от характеристик программ прокатки на стане 2000 ШСГП ПАО «ММК»

Тип программы прокатки	Характеристика программы прокатки		Номер клетки						
	Значение $L_{\text{сум}}$, м	$V_{\text{пр}}$	7	8	9	10	11	12	13
			Процент открытия гидрозатвора COB, %, (Q , м ³ /час)						
I	$L_{\text{сум}} < 55000$	$V_{\text{пр}} \geq 0,63$	100 (1303)	100 (1303)	100 (1156)	95 (927)	90 (774)	85 (731)	75 (560)
	$55000 \leq L_{\text{сум}} \leq 105000$	$V_{\text{пр}} \geq 0,51$	100 (1310)	100 (1310)	95 (1070)	90 (878)	90 (775)	85 (732)	75 (561)
	$L_{\text{сум}} > 105000$	-	100 (1291)	100 (1291)	100 (1145)	95 (927)	95 (817)	90 (774)	85 (634)
II	$L_{\text{сум}} < 55000$	$V_{\text{пр}} \geq 0,63$	100 (1301)	100 (1301)	100 (1153)	95 (927)	90 (774)	80 (731)	80 (597)
	$55000 \leq L_{\text{сум}} \leq 105000$	$V_{\text{пр}} \geq 0,51$	100 (1310)	100 (1310)	100 (1070)	95 (878)	90 (775)	85 (732)	80 (561)
	$L_{\text{сум}} > 105000$	-	100 (1294)	100 (1294)	100 (1148)	95 (927)	95 (817)	85 (731)	85 (634)
III	$L_{\text{сум}} < 55000$	$V_{\text{пр}} \geq 0,63$	100 (1311)	100 (1311)	100 (1162)	90 (878)	90 (774)	80 (688)	75 (560)
	$55000 \leq L_{\text{сум}} \leq 105000$	$V_{\text{пр}} \geq 0,51$	100 (1304)	100 (1304)	100 (1156)	95 (878)	90 (774)	85 (731)	80 (597)
	$L_{\text{сум}} > 105000$	-	100 (1297)	100 (1297)	100 (1150)	95 (927)	95 (817)	85 (731)	80 (597)

Примечание.

$L_{\text{сум}}$ – суммарная длина монтажной партии (программа компания), м;

$V_{\text{сум}}$ – сумма всех ширин полос в программе прокатки, мм;

$V_{\text{пр}} = L_{\text{сум}}/V_{\text{сум}}$ – коэффициент, учитывающий ширину полос в программе прокатки.

Если коэффициент $V_{\text{пр}}$ ниже установленного (0,63, 0,51), то назначается режим для программы прокатки с большой суммарной длиной полос;

Тип программы прокатки определяется в зависимости от профилировок рабочих валков (I – базовая программа прокатки, II – программа прокатки с преобладанием полос двойной ширины; III – программа прокатки с марками стали 07ГБЮ, 07ГБЮА, 07ГБЮТА, 07ГБЮ, 07ГБЮА, 07ГБЮТА).

Аналитическое исследование разработанных режимов провели в созданной программе «Расчет температурного состояния рабочих валков ШСГП 2000 ПАО «ММК»». Пересчет теплового состояния валков согласно полученной классификации показал снижение максимальной температуры для наиболее нагреваемых валков в клетях №7-9 на 3...5,5 °С и повышение температуры в менее нагреваемых валках в клетях №9-13 на 3,5...6°С. Пример рассчитанных температур по полученной классификации для программы прокатки № 49170 протяженностью 34000 м ($L_{\text{сум}} < 55000$, м) и коэффициентом $V_{\text{пр}} \geq 0,63$ приведен на графиках ниже (рис. 4.10, 4.11). В данном случае максимальная температура верхних валков в клетях №8 упала на 3,7°С, а в клетях №13 поднялась на 2,3°С.

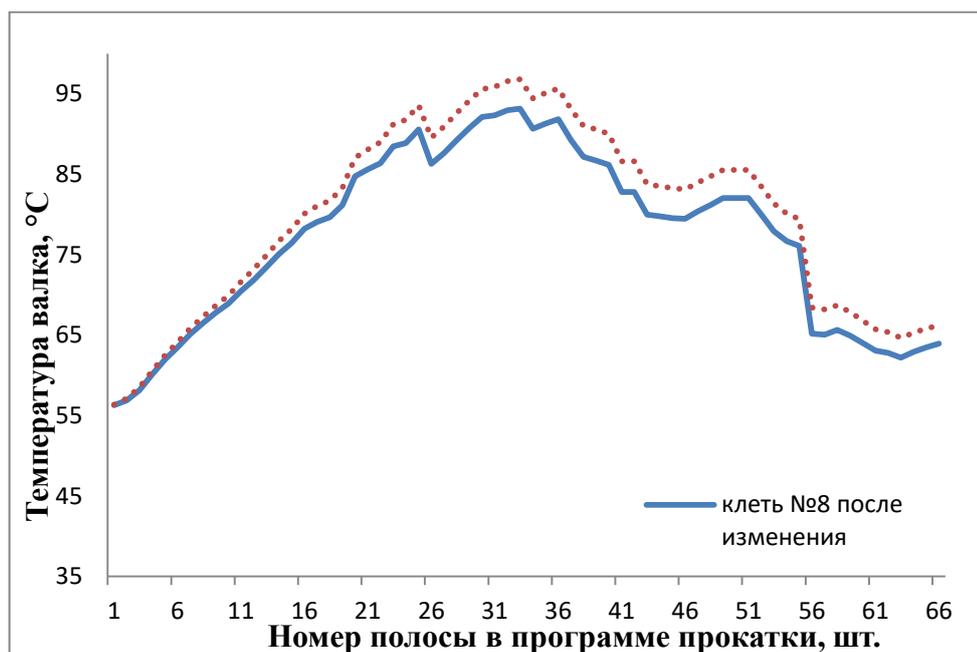


Рисунок 4.10 – Средняя температура сечения середины бочки верхних рабочих валков в клетях №8 во время исполнения программы прокатки № 49170 до и после изменения согласно классификации

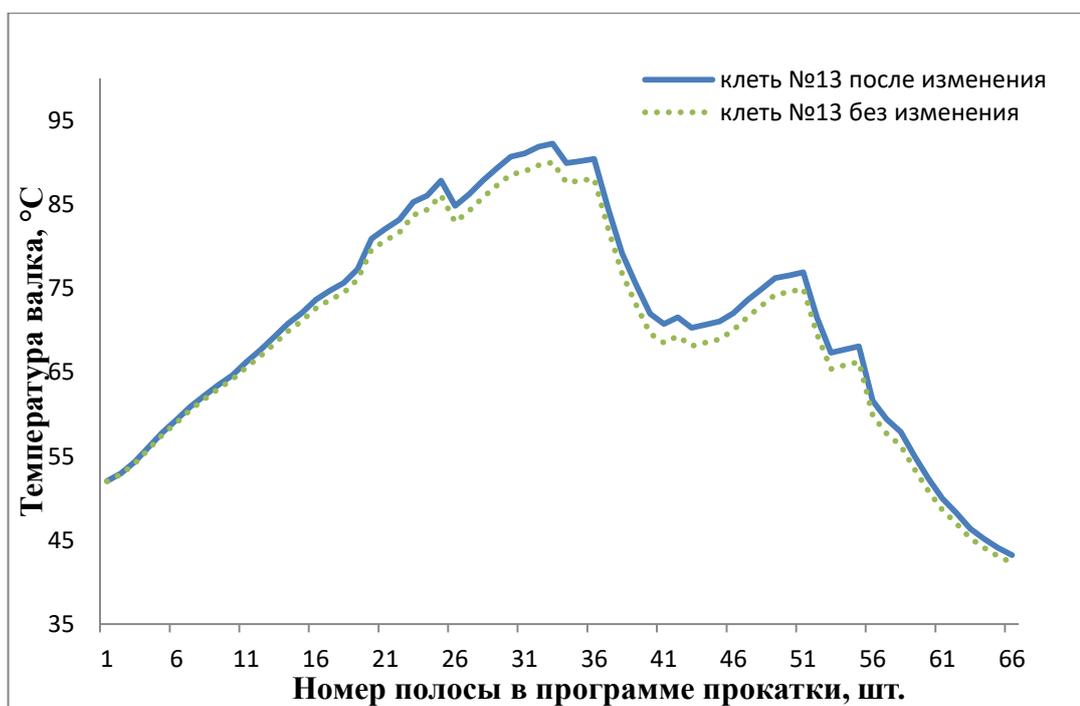


Рисунок 4.11 – Средняя температура сечения середины бочки верхних рабочих валков в клети №13 во время исполнения программы прокатки № 49170 до и после изменения согласно классификации

4.3.2 Совершенствование конструкции коллектора охлаждения

Для управления тепловым состоянием рабочих валков, с учетом предложенных решений по определению расхода охладителя, предложены изменения в конструкцию коллектора охлаждения (рис. 4.12) [92,106,107]. Конструкция полученного коллектора следующая. На коллекторе установлены форсунки с шагом n (50...150 мм) в m (1÷4) рядов. Коллектор поделен на центральную секцию, промежуточные секции и крайние секции. Секции отличаются значением расходов форсунок. Внутри коллектора установлены перегородки с отверстиями для направления потоков охладителя. Фактический расход охладителя через форсунки зависит от режима подачи охладителя и может меняться. На данное устройство подана заявка на изобретение.

Обеспечение различной интенсивности охлаждения по секциям позволяет снизить термические напряжения в рабочем валке.

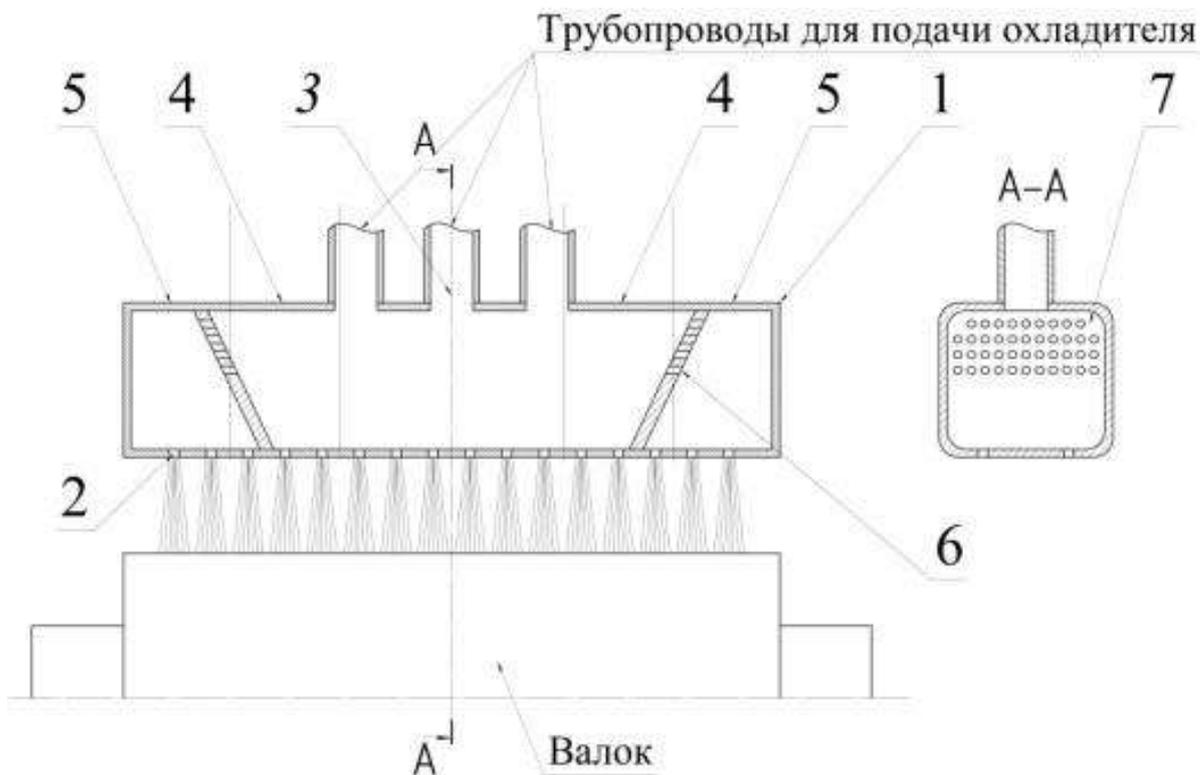


Рисунок 4.12 - Конструкция коллектора охлаждения рабочих валков:
 1 – коллектор; 2 – форсунки; 3 – центральная секция коллектора; 4,5 -
 промежуточные и крайние секции соответственно; 6 – перегородка; 7 –
 отверстия в перегородке

В таблице 4.4 приводятся расходы форсунок коллектора предложенной конструкции в зависимости от их нахождения в различных секциях. На рисунке 4.13 изображен график расхода охладителя в коллекторе по бочке валка до изменения конструкции, на рисунке 4.14 – после.

Таблица 4.4 - Пропускная способность форсунок коллектора предложенной конструкции

Секция коллектора	Расход форсунки, л/мин (при давлении в коллекторе 0,8 МПа)
Центральная	95...105
Промежуточная	75...85
Крайняя	37...45

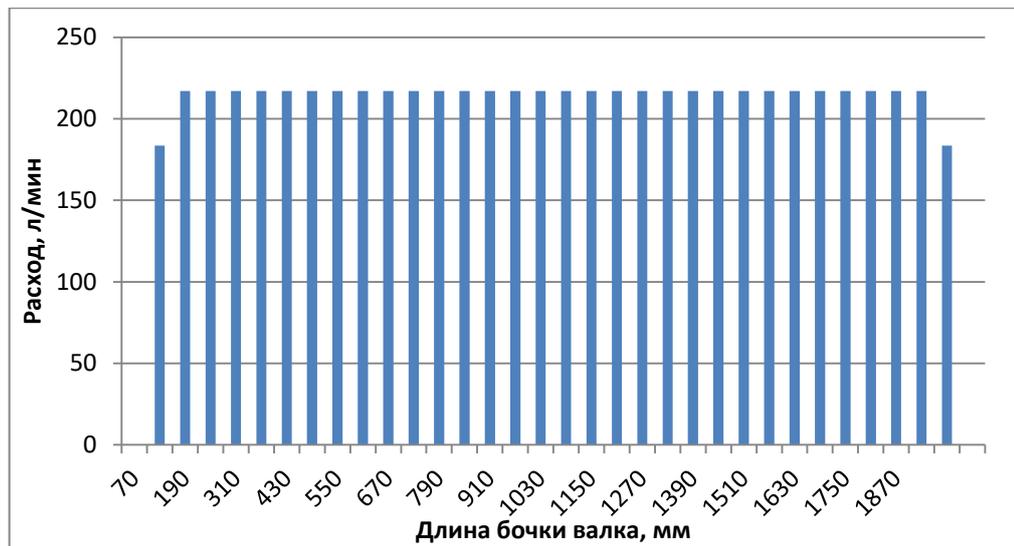


Рисунок 4.13 - Расход охладителя в коллекторе по бочке валка до изменения конструкции в клети №7 на выходе

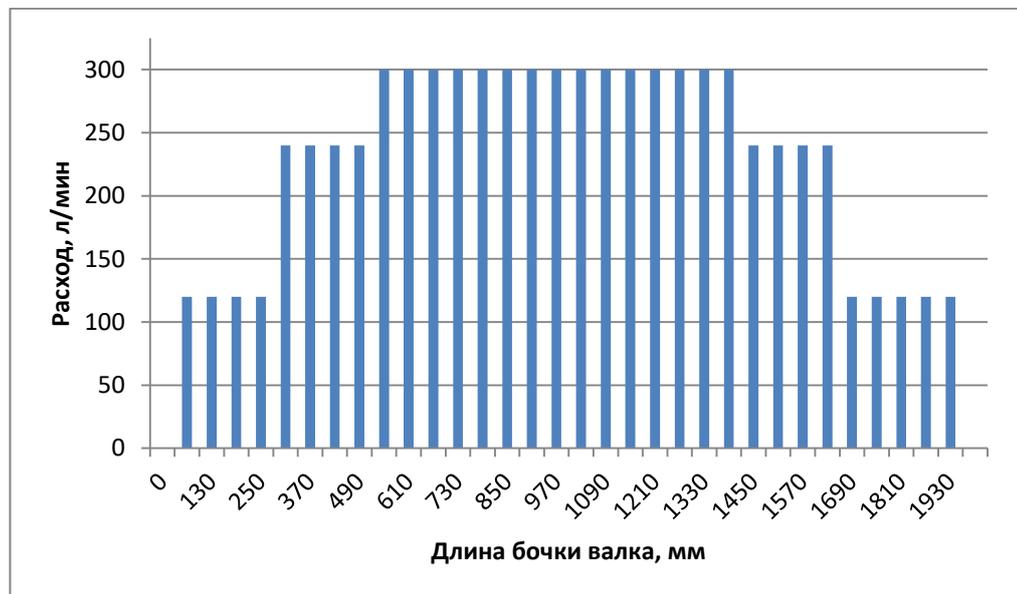


Рисунок 4.14 - Расход охладителя в коллекторе по бочке валка после изменения конструкции в клети №7 на выходе

Аналитическое исследование эффективности работы предложенной конструкции провели в созданной программе «Расчет температурного состояния рабочих валков ШСГП 2000 ПАО «ММК»» [101]. Пересчет теплового состояния валков для полученной конструкции коллектора охлаждения согласно распределению расхода на рисунке 4.15 приведены графики снижения максимальной температуры для наиболее нагреваемых валков в клетях №7-10 на 4,4...9,5 °С в центре бочки валка и графики

повышения температуры на 4...10,5°С на крайних точках бочки валка (800, 1000 мм от центра).

Пример рассчитанных температур согласно распределению расхода охладителя по бочке валка после изменения конструкции коллектора для программы прокатки № 49170 протяженностью 34000 м приведен на графиках ниже (рис. 4.15). В данном случае максимальная температура верхних валков в клетке №7 в центре бочки валка упала на 4,1°С, а в точках 1000 и 800 мм от центра бочки валка температура повысилась на 2,7 и 3,7 °С.

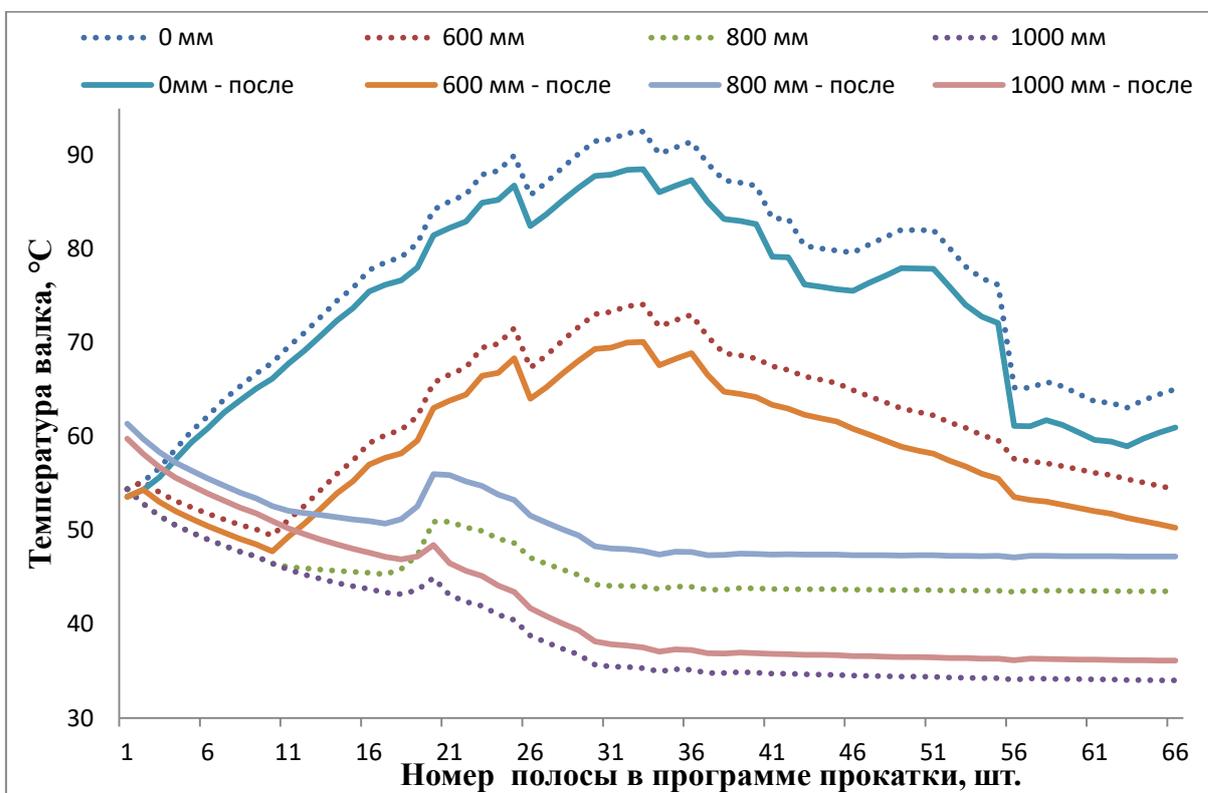


Рисунок 4.15 – Тепловое расширение бочки верхнего рабочего валка по длине в точках в 600, 800 и 1000 мм от ее середины (0 мм) в клетке №7 при исполнении программы прокатки № 49170 (расчетные значения до и после изменения конструкции коллектора охладителя)

4.4 Оценка эффекта от внедрения разработанных мероприятий, направленных на повышение стойкости рабочих валков

С марта по декабрь 2019 г. была проведена оценка эффективности внедрения разработанных технологических и технических решений. Были внедрены режимы охлаждения рабочих валков и конструкции коллекторов

охлаждения для клетей №7-9 в чистой группе ШСГП 2000 в листопрокатном цеху №10 (ЛПЦ-10) ПАО «ММК» (Приложение В, Приложение Г).

4.4.1 Оценка повышения стойкости рабочих валков чистой группы клетей на ШСГП 2000 ПАО «ММК»

Было произведено сопоставление средних значений величин съёмов и температурного состояния рабочих валков по характеристикам программ прокатки. Результаты обобщенных значений представлены в таблицах 4.5 и 4.6 [92,106,107].

Таблица 4.5 – Средние величины съёмов (мм) рабочих валков при их шлифовке в вальцешлифовальном отделении ЛПЦ-10 ПАО «ММК»

L _{сум} программы прокатки, м	Валок в клетей	Номер клетки													
		7	8	9	10	11	12	13							
L _{сум} <55000	верх.	$\frac{0,32^*}{0,28}$	**	$\frac{0,60}{0,38}$	-0,22	$\frac{0,40}{0,36}$	-0,04	$\frac{0,96}{0,68}$	-0,28	$\frac{1,10}{0,90}$	-0,20	$\frac{0,88}{1,02}$	+0,14	$\frac{0,56}{0,62}$	+0,06
	нижн.	$\frac{0,32}{0,28}$	-0,04	$\frac{0,60}{0,38}$	-0,22	$\frac{0,40}{0,36}$	-0,04	$\frac{0,96}{0,68}$	-0,34	$\frac{1,10}{1,18}$	+0,02	$\frac{0,88}{0,96}$	+0,08	$\frac{0,62}{0,80}$	+0,18
55000≤L _{сум} ≤105000	верх.	$\frac{0,36}{0,30}$	-0,06	$\frac{0,48}{0,42}$	-0,06	$\frac{0,46}{0,40}$	-0,06	$\frac{1,04}{0,72}$	-0,32	$\frac{1,08}{0,80}$	-0,28	$\frac{0,70}{0,76}$	+0,06	$\frac{0,48}{0,62}$	+0,14
	нижн.	$\frac{0,36}{0,30}$	-0,06	$\frac{0,48}{0,42}$	-0,06	$\frac{0,46}{0,40}$	-0,06	$\frac{1,02}{0,72}$	-0,30	$\frac{1,08}{0,74}$	-0,34	$\frac{0,66}{0,72}$	+0,06	$\frac{0,54}{0,62}$	+0,08
L _{сум} >105000	верх.	$\frac{0,36}{0,32}$	-0,04	$\frac{0,48}{0,40}$	-0,08	$\frac{0,46}{0,42}$	-0,04	$\frac{1,04}{0,84}$	-0,20	$\frac{1,08}{0,74}$	-0,34	$\frac{0,70}{0,60}$	-0,10	$\frac{0,48}{0,52}$	+0,04
	нижн.	$\frac{0,36}{0,32}$	-0,04	$\frac{0,48}{0,40}$	-0,08	$\frac{0,46}{0,42}$	-0,04	$\frac{1,02}{0,84}$	-0,18	$\frac{1,08}{0,74}$	-0,34	$\frac{0,66}{0,56}$	-0,10	$\frac{0,54}{0,52}$	-0,02

Примечания:
* В числителе указаны величины съёмов до внедренных мероприятий, в знаменатели – после.
** Изменение съёмов после внедрения мероприятий (мм)

Таблица 4.6 – Зафиксированное изменение температуры рабочих валков (°C) чистой группы клетей ШСГП 2000 ПАО «ММК»

L _{сум} программы прокатки, м	Валок в клетей	Номер клетки						
		7	8	9	10	11	12	13
L _{сум} <55000	верх.	-4,0*	-5,8	-5,2	-1,4	3,9	3,3	3,6
	нижн.	-4,2	-4,0	-4,8	-2,0	3,3	3,9	3,8
55000≤L _{сум} ≤105000	верх.	-5,0	-6,0	-7,4	-3,6	2,9	3,4	4,5
	нижн.	-4,8	-6,2	-6,8	-3,8	3,0	3,6	4,1
L _{сум} >105000	верх.	-6,6	-6,4	-6,2	-3,0	3,5	3,6	5,6
	нижн.	-5,1	-6,2	-7,3	-3,1	3,4	4,4	5,0

Примечание.
*Указано усредненное изменение температуры рабочих валков (°C) после внедрения предложенных мероприятий

Температура рабочих валков фиксировалась после их вывалки по методике, приведенной в главе 3. В таблице 4.6 приведено усредненное изменение температуры рабочих валков после внедрения предложенной конструкции коллектора для клетей №7-9 и режимов охлаждения. Из таблицы 4.6 видно, что зафиксировано снижение температур рабочих валков на клетях № 7-10. Данное снижение объясняется использованием коллекторов с измененной конструкцией и повышением объема охладителя, подаваемого на клетки №7-9. Несмотря на то, что согласно рекомендациям (табл. 4.4) гидрозатвор для подачи охладителя в клетку № 10 частично перекрывается, в ней тоже зафиксировано снижение температур валков. Это объясняется тем, что перекрытие затворов на клетях №11-13 приводит к увеличению давления в системе охлаждения и увеличению объемов охладителя на предыдущих клетях, что нивелирует незначительное перекрытие затвора на клетки №10. В клетях №11-13 зафиксировано повышение температур, что соответственно объясняется частичным перекрытием затворов согласно разработанным рекомендациям охлаждения рабочих валков (табл. 4.4).

В таблице 4.6 приведены средние величины съемов рабочих валков, измеренных при их шлифовке в вальцешлифовальном отделении ЛПЦ-10 ПАО «ММК». Зафиксировано снижение съемов рабочих валков на клетях №7-10 и частично на клетях №11-13. Снижение съемов рабочих валков в клетях №7-9 объясняется снижением температур рабочих валков на поверхности (зафиксировано в таблице 4.5) и соответственно уменьшением среднеинтегральных температур и термических напряжений в них. Отклонение данных по съемам рабочих валков в клетях №10 и 11 объясняется переходом в них с высокохромистых индифинитных валков на валки из быстрорежущей стали марки 200 ХВФМ во время сбора данных. В клетях № 12-13 в целом наблюдается тенденция увеличения съемов для программ прокатки меньше $L_{\text{сум}} \leq 105000$, что согласуется с зафиксированным увеличением температуры на данных клетях. Отклонение

от предполагаемого увеличения съёмов в клетях № 12-13 для программы прокатки $L_{\text{сум}} > 105000$ объясняется использованием небольшой выборки при оценке расхода рабочих валков. Обобщение данных собранных за период с 25 марта по 31 декабря 2019 г. по перешлифовке рабочих валков показало снижение их удельного расхода с $(6,9...8,5) \cdot 10^{-5}$ кг/т до $(6,21...7,65) \cdot 10^{-5}$ кг/т в среднем по клетям чистой группы стана, что прибавило к сроку службы рабочих валков 7...10 дополнительных эксплуатационных часов работы (7...10%). Это 2...5 дополнительные программы прокатки средней суммарной протяженностью полос ($55000 \leq L_{\text{сум}} \leq 105000$). Экономический эффект от внедрения предложенных мероприятий, выраженный в увеличении срока эксплуатации рабочих валков непрерывной чистой группы ШСГП 2000 ПАО «ММК» составляет более 3,2 млн. руб., что подтверждается актом (Приложение Г).

4.4.2 Оценка изменений качества полосы ШСГП 2000 ПАО «ММК»

На ШСГП 2000 ПАО «ММК» поперечный профиль полосы контролируется профилемером компании «IMS Messsysteme GmbH» (Германия), установленным за последней 13-ой чистой клетью. Профиль полосы представлен на рисунке 4.15. Программное обеспечение профилимера определяют усредненное значение разнотолщинности по всей длине полосы (на рисунке 1 обозначен как «среднее»), а также трех участков полосы: передняя часть (первые 15 метров полосы), концевая часть (последние 15 м полосы) и средняя часть полосы (на рисунке 4.15 - «тело»). В программном обеспечении отображается распределение параметров («толщина полосы») и («клиновидность») по длине полосы (рис. 4.16). Под клиновидностью понимается разность значений толщины полосы, замеренных в точках, равноудалённых от противоположных кромок полосы.

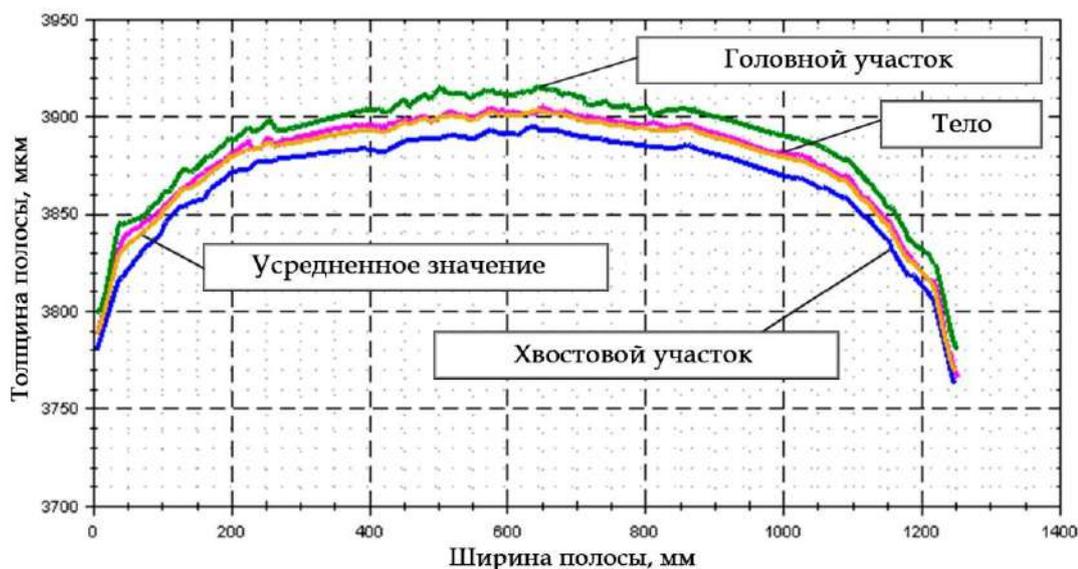


Рисунок 4.15 - Профиль полосы 4,0x1310 мм на ШСГП 2000 ПАО «ММК»

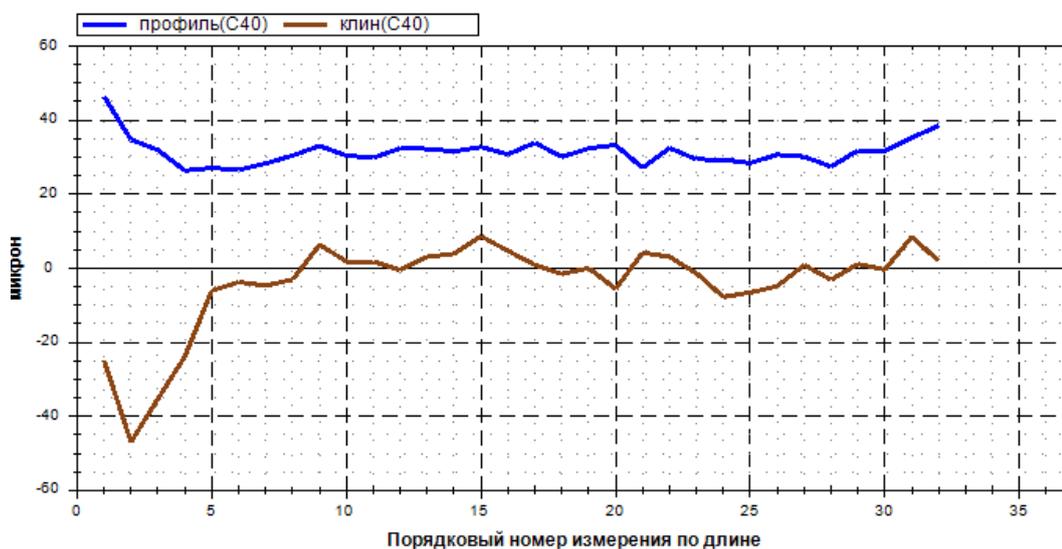


Рисунок 4.16 – Толщина полосы и «клиновидность» по длине для полосы (2,5x1310 мм) на ШСГП 2000 ПАО «ММК»

В ПАО «ММК» в ЛПЦ-10 согласно СТО ММК 2018-2009 установлены следующие предельные отклонения для горячекатаного подката:

1) по толщине проката:

- не более $\pm 0,15$ мм для толщин 1,20...2,00 мм;
- не более $\pm 0,20$ мм для толщин 2,01...3,99 мм;
- не более $\pm 0,25$ мм для толщин 4,00...6,00 мм;

2) выпуклость профиля:

- $0,06 \pm 0,02$ мм для ширин 1000...1250 мм при толщине до 3 мм (вкл.);
- $0,07 \pm 0,03$ мм для ширин 1000...1250 мм при свыше 3 мм;
- $0,07 \pm 0,03$ мм для ширин 1251...1850 м.

Клиновидность полосы (разность толщин, измеренных на расстоянии 40 мм от левой и правой кромок) не должна превышать согласно данному стандарту 0,04 мм.

Обработка данных за указанный период [98] показала, что по критерию «поперечная разнотолщинность» частота проявления дефектов снизилась на 5,5 % или на 11,5 тыс. тон продукции.

Выводы по четвертой главе

1. Произведены теоретические исследования изменения теплового состояния и теплового профиля рабочих валков в процессе прокатки на ШСГП 2000 ПАО «ММК». Аналитически определено, что температура рабочих валков во время исполнения различных программ прокатки достигает 95...110 °С, в отдельных случаях до 110...120 °С, что значительно превышает рекомендуемые производителями валков 80 ± 10 °С. Температурный градиент между средними температурами поперечных сечений средней частью бочки валка и ее краем может достигать 80...90 °С. Для стабилизации температурного состояния и теплового профиля рабочего валка предложено перераспределить объём расхода охладителя по клетям и изменить конструкцию коллектора для увеличения интенсивности теплообмена с центральной части бочки валка.

2. По результатам проведенных теоретических исследований разработаны рекомендации по изменению конструкции коллекторов охлаждения (подана заявка на изобретение РФ) и режимам охлаждения рабочих валков. Для систематизации предложенных решений предложена классификация программ прокатки, учитывающая коэффициент V_{pr} , характеризующий ширину полос в программе прокатки. Применение предложенной классификации позволяет определять и оценивать тепловые режимы рабочих валков непрерывной чистовой группы клетей ШСГП.

3. Внедрение результатов исследования произведено на ШСГП 2000 ПАО «ММК». Оценка эффективности внедренных мероприятий на стане 2000 горячей прокатки ПАО «ММК» показало снижение удельного расхода с $6,9...8,5 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $6,21...7,65 \cdot 10^{-5}$ кг/т, что позволило дополнительно повысить ресурс рабочих валков на 7...10 эксплуатационных часов работы (7...10%). Оценка качества полосы показала незначительно уменьшение дефектов по критерию «разнотолщинность» на 3,5 % (на 11,5 тонн), что находится в пределах статистической погрешности изменения качества произведенных полос по данному критерию на ШСГП 2000 ПАО «ММК».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача повышения стойкости рабочих валков путем разработки и внедрения научно обоснованных технологических и технических решений, заключающихся в определении рациональных режимов охлаждения валков и совершенствовании конструкции коллекторов охлаждения валков на основе результатов исследования их теплового состояния с помощью методов регрессионного, математического и нейросетевого моделирования.

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

1. Для условий ШСГП был реализован промышленный эксперимент, по результатам которого оценено влияние технологических факторов на тепловое состояние рабочих валков чистовой группы клетей стана. Построена корреляционная матрица, с помощью которой определено, что наибольший вклад в изменении теплового состояния рабочих валков в клетки вносят следующие факторы: сортамент полос программы прокатки, температура полосы во время прокатки ($T_{п}$, °C), паузы во время прокатки ($t_{п}$, сек), температура охладителя ($T_{охл}$, °C), скорость прокатки (V , м/с), которая в свою очередь зависит от обжатий (ε) в клетях (исследования проведены на ШСГП 2000 ПАО «ММК»).

2. Для прогнозирования исследуемых технологических параметров предложена методика, в основу которой заложено построение искусственных нейронных сетей и регрессионных зависимостей.

С использованием ИНС получены алгоритмы для прогнозирования:

– коэффициента суммарного обжатия ($\eta_{сум}$) и числа задействованных клетей в чистовой группе стана ($N_{кл}$);

– обжатий (ε) в клетях чистовой группы стана (на основе метода Имаи), которые определены с помощью коэффициентов использования мощности главных приводов (β_w).

С помощью регрессионного анализа разработаны алгоритмы для прогнозирования:

– скорости захвата ($V_{кз}$, м/с) и скорости прокатки ($V_{к}$, м/с) в последней катающей клетки, в зависимости от толщины полосы на выходе;

– температуры полосы перед чистовой группой клеток ($T_{п}$, °С).

На основе описанных статистических моделей и обученной ИНС разработана методика расчета технологических параметров прокатки в чистовой группе ШСГП. Методика реализована в виде программы для ЭВМ № 2021665583.

3. Для системы «полоса-валок» предложена и численно реализована математическая модель теплового состояния рабочего валка. Новизна модели заключается в том, что в качестве граничных условий учитывается градиент температуры полосы по ее ширине в очаге деформации. Для определения температурного градиента полосы был реализован промышленный эксперимент и получены аппроксимирующие уравнения, описывающие изменение температуры прокатываемой полосы по ее ширине в зависимости от условных групп прокатываемого сортамента.

Отличительной особенностью реализованной модели является последовательное определение независящих друг от друга тепловых состояний в j -ых поперечных профилях рабочего валка (с учетом симметрии $j = 1 \dots 5$).

4. Для определения теплофизических коэффициентов, входящих в разработанную модель, предложено использовать подход с построением и обучением ИНС. Применительно к ШСГП 2000 ПАО «ММК» с помощью нейросетевой модели адаптирована математическая модель теплового состояния рабочих валков, получены численные значения коэффициентов теплопередачи для каждой клетки в чистовой группе стана с учетом технологических режимов прокатки: от полосы рабочему валку ($\alpha_{конт.}$) 3669, 3552, 3745, 3480, 3398, 3249, 3243 Вт/(м²×°С); от рабочего валка охладителю ($\alpha_{в.р.}$) 3575, 3461, 3649, 3391, 3311, 3165, 3160 Вт/(м²×°С).

5. Произведены теоретические исследования изменения теплового состояния рабочих валков в процессе прокатки на ШСГП 2000 ПАО «ММК». Аналитически определено, что средняя температура рабочих валков во время исполнения различных программ прокатки значительно (на 25...35%) превышает рекомендуемые значения. Температурный градиент между средними температурами поперечных сечений центральной части бочки валка и ее краем составляет 80...90 °С. Полученные результаты теоретических исследований сопоставляли с экспериментальными данными, относительная ошибка не превышает 19%.

Для стабилизации теплового состояния рабочих валков предложен ряд рекомендаций.

6. Разработаны рекомендации по режимам охлаждения рабочих валков (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021665573) и совершенствованию конструкции коллекторов охлаждения (подана заявка на изобретение РФ). Предложены изменения в классификацию программ прокатки, заключающиеся в применении коэффициента (B_{pr}), характеризующего ширину полос. С применением данной классификации оценено влияние программ прокатки на тепловое состояние рабочих валков чистовой группы клеток ШСГП.

7. Внедрение на ШСГП 2000 ПАО «ММК» предложенных технологических и технических решений позволило повысить стойкость рабочих валков. Повышение стойкости выражено в снижении удельного расхода на 10 % (с $6,9...8,5 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $6,21...7,65 \cdot 10^{-5}$ кг/т) и увеличении срока службы рабочих валков на 7...10% (7...10 эксплуатационных часов работы). В результате зафиксировано снижение дефектов полосы по критерию «поперечная разнотолщинность» (на 3,5%).

8. Экономический эффект от внедрения предложенных мероприятий, выраженный в экономии рабочих валков чистовой группы ШСГП 2000 ПАО «ММК» из-за увеличения их срока эксплуатации, составляет более 3,2 млн. руб., что подтверждается соответствующим актом.

9. Результаты исследований внедрены в образовательный процесс и используются при преподавании учебных дисциплин при подготовке бакалавров и аспирантов по направлениям 15.03.01 и 15.06.01 соответственно («Машиностроение»).

Список литературы

1. World Steel Association. Steel Statistical Yearbook 2020 concise version. – Режим доступа: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:5001dac8-0083-46f3-aadd-35aa357acbce/Steel%20Statistical%20Yearbook%202020%20%2528concise%20version%2029.pdf>.
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. ПАО «ММК». Годовой отчет 2020. – Годовые отчеты. – Режим доступа: http://mmk.ru/upload/iblock/add/Годовой%20отчет%202020_clean.pdf.
4. Северсталь. Годовой отчет 2020. – Годовые отчеты. – Режим доступа: https://www.severstal.com/files/55799/Annual_report_2020_RUS.pdf.
5. 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.
6. Горячая прокатка широких полос / В.Н. Хлопонин, П.И. Полухин, В.И. Погоржельский, В.П. Полухин. - М.: Металлургия, 1991. - 198 с.
7. Прокатные станы: Справочник в 3-х томах. Т. 3. Листопрокатные станы и профилегибочные агрегаты / В.Г. Антипин, Д.К. Нестеров, В.Г. Кизиев и др. - М.: Металлургия, 1992. - 428 с.
8. 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.
9. 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.
10. Станы Стэккеля для прокатки стальных листов // Новости черной металлургии за рубежом. - 1996. - № 3. - С. 104-106.

11. 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.
12. Королев, А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов / А.А. Королев. - М.: Металлургия, 1987. - 480 с.
13. Полухин, П.И. Прокатка толстых листов / П.И. Полухин, В.М. Клименко, В.П. Полухин и др. - М.: Металлургия, 1984. - 288 с.
14. 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.
15. Сивак, Б.А. Технологические основы проектирования машин и оборудования прокатного производства / Б.А. Сивак, В.Б. Галкин. - Москва, Учеба. - 2003. - 55 с.
16. 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.
17. Полухин, П.И. Прокатка на многовалковых станах / П.И. Полухин, В.П. Полухин, А.Ф. Пименов и др. - М.: Металлургия, 1981. - 248 с.
18. Голубченко, А.К. Перспективы развития технологии и модернизации оборудования цехов горячей прокатки широкополосной стали / А.К. Голубченко // Сталь. - 1992. - №8. - С. 36-41.
19. 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.
20. Матвеев, Б.Н. Новое в производстве горячекатаной рулонной стали / Б.Н. Матвеев // Сталь. - 1995. - №11. - С. 34-40.

21. Никитина, Л.А. Состояние и перспективы развития производства проката в России и за рубежом / Л.А. Никитина // Производство проката. - 2000. - № 8. - С. 7-15.
22. Юрьев, А.Б. Направления инновационного развития черной металлургии / А.Б. Юрьев, Л.М. Полторацкий, И.А. Барнаев // Сталь. - 2004. - № 11. - С. 106-110.
23. Неменов, А. Металлургия: ключевые проблемы / А. Неменов // Металлург. - 2006. - № 4. - С. 10-15.
24. Юсупов, В.С. Некоторые тенденции развития листопрокатного производства / В.С. Юсупов // Производство проката. - 2005. - № 2. - С. 32-35.
25. 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.
26. 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.
27. SMS group GmbH – Selected references. – Режим доступа: <https://www.sms-group.com/plants/all-plants/hot-strip-mills-steel/>.
28. 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.
29. 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.
30. Шичков, А.Н. Тепломассобмен при производстве листового проката / А.Н. Шичков, В.Г. Лайбейш. - Л.:СЗПИ, 1982. - 80 с.
31. Авторское свидетельство СССР № 852394, МПК В21В 27/10. Устройство для охлаждения прокатных валков /А.Л. Остапенко, И.В.

Гончаров, Ю.В. Коновалов и др., заявл. 23.10.1979; № 2834075/22-02; опубл. 07.08.1981, Бюл. № 29 – 3 с.

32. Гарбер Э.А., Гончарский А.А., Шаравин М.П. Технический прогресс систем охлаждения прокатных станов. – М.: Metallurgia, 1991. – 256 с.

33. Полезная модель RU 97949, МПК В21В 27/10. Устройство для охлаждения рабочих валков полосового прокатного стана / Э.А. Гарбер, М.В. М.В. Хлопошин, А.Ф. Савиных, Е.С. Попов, Р.Б. Палигин. - № 2010122133/02; заявл. 31.05.2010; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 27. - 2 с.

34. 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.

35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. 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).

40. 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.
41. 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.
42. Yanagi, K.-i. Prediction of strip temperature for hot strip mills. / K.-i Yanagi // Transactions ISIJ. - 1976. - Vol. 16. - P. 1-19.
43. Целиков, А.И. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. - М.: Metallurgy, 1982. - 335 с.
44. Полухин, П.И. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / П.И. Полухин, В.А. Николаев, В.П. Полухин и др. - М. Metallurgy. 1974. - 200 с.
45. Colas, R. Modelling heat transfer during hot rolling of steel strip / R. Colas // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. - 1995. - Vol.3. - P. 437-453.
46. 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.
47. Хлопонин, В.Н. Эффективность активного и псевдоактивного способов снижения охлаждения подката в условиях ШПС горячей прокатки / В.Н. Хлопонин, А.Н. Тинигин // - Metallurg. - 2011. - № 10. - С. 77-82.
48. 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.

49. 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.
50. 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.
51. Колдин, А.В. Исследование теплообмена в поверхностном слое металла при натекании жидкой струи / А.В. Колдин, Н.И. Платонов // Теплоэнергетика. - 2008. - № 3. - С. 37-40.
52. 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.
53. Макаров, Е.В. Разработка технологических режимов горячей прокатки стальных полос с применением систем принудительного охлаждения: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Макаров. – НИТУ «МИСиС». Москва, 2012.
54. Румянцев, М.И. Развитие модели прогноза температуры металла в линии широкополосного стана горячей прокатки / М.И. Румянцев, А.Н. Завалищин // Теория и технология металлургического производства. 2020. № 1 (32). С. 41-46.
55. 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.
56. 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.

57. 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.

58. Третьяков, А.В. Температурный режим работы валков прокатных станов / А.В. Третьяков, А.В. Грачев, П.Т. Орешки // М.: Металлургия, 1964. – 112 с.

59. 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.

60. Гарбер, Э.А. Повышение эффективности охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки с использованием адаптивных математических моделей теплового баланса / Э.А. Гарбер, М.В. Хлопотин, А.Ф. Савиных, А.И. Трайно // Сталь. - 2008. - №3. - С. 51-53.

61. Ковалев, Д.А. Повышение качества поверхности горячекатаных полос на широкополосных станах на основе моделирования и совершенствования тепловых режимов прокатки в чистовой группе клетей: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Д.А. Ковалев. - Липецкий гос. техн. ун-т. Липецк, 2020.

62. Хлопотин, М.В. Исследование теплового режима валков широкополосных станов горячей прокатки и его влияния на поперечный профиль горячекатаных полос: автореферат дис. ... канд. техн. наук / М.В. Хлопотин. - Череповец. гос. ун-т. Череповец, 2010.

63. 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.

64. 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.

65. Румянцев, М.И. Развитие методики синтеза режима обжатый при горячей прокатке на широкополосных станах. Сообщение 1. Выбор числа активных чистовых клетей / М.И. Румянцев // Калибровочное бюро. - 2015. - № 6. - С. 100-107.
66. Румянцев, М.И. Развитие методики синтеза режима обжатый при горячей прокатке на широкополосных станах. Сообщение 2. Выбор толщины промежуточного раската / М.И. Румянцев // Калибровочное бюро. - 2015. - № 6. - С. 108-114.
67. Коновалов, Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки: справочник // Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев. - М. Металлургия, 1986. - 430 с.
68. Румянцев, М.И. Развитие методики синтеза частных обжатый горизонтальными валками при горячей прокатке на широкополосных станах / М.И. Румянцев // Калибровочное бюро. - 2016. - № 8. - С. 23-32.
69. Румянцев, М.И. Развитие методики синтеза режима обжатый при горячей прокатке на широкополосных станах. Сообщение 3. Выбор ширины промежуточного раската / М.И. Румянцев // Калибровочное бюро. - 2015. - № 6. - С. 115-121.
70. Kermanpur, A. Artificial Neural Network Modeling of High Pressure Descaling Operation in Hot Strip Rolling of Steels / A. Kermanpur, A. Ebnonnasir, A.R.K. Yeganeh and J. Izadi // ISIJ International. – 2008. – Vol. 48. – No. 7. – P. 963–970.
71. Aghasafari, P. Artificial Neural Network Modeling of Flow Stress in Hot Rolling / P. Aghasafari, H. Abdi and M. Salimi // ISIJ International. – 2014. – Vol. 54. – No. 4. – P. 872-879.
72. Guo Z.Y. Application of finite element method and artificial neural networks to predict the rolling force in hot rolling of Mg alloy plates / Z.Y. Guo, J.N. Sun, and F.S. Du // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2016. – Vol. 116. – P. 43-48.

73. Амиров, Р.Н. Применение нейронных сетей для моделирования энергосиловых параметров клеток чистой группы НШСП 2000 ОАО "ММК" / Р.Н. Амиров, Р.Р. Дёма, С.И. Лукьянов, А.В. Ярославцев, У.Д. Мартынова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2012. – № 2 (38). – С. 102-103.
74. Дёма, Р.Р. Применение нейронных сетей для описания и прогнозирования энергосиловых параметров горячей прокатки полос / Р.Р. Дёма, У.Д. Мартынова, Р.Н. Амиров // Сталь. – 2014. – №12. – 43-47.
75. Hodgson, P.D. The prediction of the hot strength in steels with an integrated phenomenological and artificial neural network model / P.D. Hodgson, L.X. Kong, C.H.J. Davies // Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – Vol. 87. – P. 131-138.
76. Korczak, P. Using neural network models for predicting mechanical properties after hot plate rolling processes / P. Korczak, H. Dyja, E. Labuda // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – Vol. 80-81. – P. 481-486.
77. Kusiaka, J. Modelling of microstructure and mechanical properties of steel using the artificial neural network / J. Kusiaka, R. Kuziak // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 127. – P. 115–121.
78. Park, J.S. Application of neural networks to minimize front end bending of material in plate rolling process / J.S. Park, D.H. Na, Z. Yang, S.M. Hur, S.H. Chung and Y. Lee // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture. – 2015. – Vol. 230(4). – P. 1-14.
79. Прогнозирование твердости горячекатаных листовых сталей с использованием нейросетевых моделей / В.В. Шкатов, И.П. Мазур, В.В. Шкатов // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – №7 (15). – P. 103-107.
80. Chen, B. Application of backpropagation neural network for controlling the front end bending phenomenon in plate rolling / B. Chen, X.R. Cheng, Y.S. Hu et. al. // International Journal of Materials and Product Technology. – 2013. – Vol. 46. P. 166-176.

81. Alaei, H. Online prediction of work roll thermal expansion in a hot rolling process by a neural network / H. Alaei, M. Salimi, A. Nourani // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 85. – P. 1769–1777.
82. Shahani, A.R. Prediction of influence parameters on the hot rolling process using finite element method and neural network / A.R. Shahani, S. Setayeshi, S.A. Nodamaie, M.A. Asadi, S. Rezaie // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209. – P. 1920-1935.
83. Jambunathan, K. Evaluating convective heat transfer coefficients using neural networks / K. Jambunathan, S.L. Hartle, S. Ashforth-Frost, V.N. Fontama // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1996. – Vol. 39. – No. 11. – P. 2329-2332.
84. Sablani, S.S. Non-iterative estimation of heat transfer coefficients using artificial neural network models / S.S. Sablani, A. Kacimov, J. Perret, A.S. Mujumdar, A.Camp // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 48. – No. 3-4. – P. 665-679.
85. Мунтин, А.В. Анализ особенностей износа рабочих валков чистовой группы клетей в условиях стана 1950 ЛПК АО "ВМЗ" / Мунтин А.В., Севидов А.Е., Тихонов С.М., Ионов С.М., Зиновьев А.В., Лабышкина Т.А. // *Металлург*. – 2021. – № 3. – С. 57-62.
86. Платов, С.И. Определение теплофизических коэффициентов с помощью нейронной сети / С.И. Платов, О.Р. Латыпов // *Современные достижения университетских научных школ. Сборник докладов национальной научной школы-конференции*. – 2019. – С. 59-61.
87. Tietjen, G. Some Grubb's type statistics for the detection of several outliers / G.Tietjen, H. Moore // *Technometrics*. – 1972. – Vol. 14. P. 583-597.
88. Latypov, O.R. Determination of the reduction coefficients in a continuous finishing group of stands in a hot rolling mill using artificial neural network / O.R. Latypov, S.I. Platov, R.R. Dema, N.V. Urtsev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. - 2020. Vol. 15. - C. 012101.

89. 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.
90. Платов, С.И. Нейросетевая модель прогнозирования обжати в чистовой группе клеток на стане 2000 горячей прокатки / С.И. Платов, Р.Р. Дёма, О.Р. Латыпов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. - 2020. - Т.11. - №1. - С. 242.
91. Андреев, Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава / Л.В. Андреев, Г.Г. Тюленев, Б.С. Прицкер // Сталь. - 1972. - № 6. - С. 522-523.
92. Дёма, Р.Р. Определение текущей величины износа рабочих валков при широкополосной горячей прокатке / Дёма Р.Р., Платов С.И., Козлов А.В., Латыпов О.Р., Амиров Р.Н. // Сталь. - 2018. - № 10. - С. 30-34.
93. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021665583. Расчет технологических параметров процесса прокатки на широкополосных станах горячей прокатки с учётом их конструктивных особенностей / Р.Н. Амиров, В.С. Банщиков, Р.Р. Дёма, О.Р. Латыпов, А.А. Николаев, С.И. Платов, М.В. Харченко. Заявл. 8.10.2021, опубл. 15.10.2021.
94. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг. - М.: Атомиздат, 1979. - 290 с.
95. Баскаков, А.П. Теплотехника / А.П. Баскаков. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 240 с.
96. 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.
97. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов – М: Наука, 1975. – 632с.

98. Dema, R.R. Mathematical model for assessing the management of quality parameters of hot-rolled strips according to the criterion of local thickness variation / R.R. Dema, R.N. Amirov, O.R. Latypov // *Materials Today: Proceedings. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019.* - 2019. - С. 2417-2421.
99. Платов, С.И. Математическое моделирование теплового состояния рабочих валков и полосы на широкополосном стане горячей прокатки / С.И. Платов, Р.Р. Дема, О.Р. Латыпов, А.В. Колдин // *Перспективные материалы и технологии. Сборник материалов международного симпозиума.* Под ред. В.В. Рубаника. - 2019. - С. 513-515.
100. 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.
101. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021665573. Расчет теплового состояния валков четырехвалковых клеток «кварто» с учетом технологии листовой горячей прокатки / Р.Н. Амиров, В.С. Банщиков, Р.Р. Дёма, О.Р. Латыпов, Т.А. Мурзабаев, А.А. Николаев, С.И. Платов, М.В. Харченко. Заявл. 8.10.2021, опубл. 12.10.2021.
102. Платов, С.И. Исследование влияния температурно-скоростных режимов горячей прокатки на процесс окалинообразования / С.И. Платов, Р.Р. Дёма, О.Р. Латыпов, В.С. Банщиков, В.А. Мустафин, М.В. Харченко, Д.В. Терентьев // *Технология металлов.* – 2020. – № 12. – С. 36-40.
Переводная версия: Platov, S.I. Effect of the Temperature–Speed Hot-Rolling Conditions on Scale Formation / S.I. Platov, R.R. Dema, O.R. Latypov et al. // *Russian Metallurgy (Metally).* – 2021. – Vol. 2021. – No. 13. – P. 128-132
103. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020661646. Программа реализации комплексной математической модели теплового состояния тяжело нагруженных узлов трения металлургического оборудования, на примере подшипниковых узлов листовых станов горячей

прокатки / Платов С.И., Харченко М.В., Николаев А.А., Гришин И.А., Латыпов О.Р., Нефедьев С.П., Дема Р.Р., Амиров Р.Н., Банщиков В.С., Мустафин В.А., Урцев Н.В. Заявл. 21.09.2020, опубл. 29.09.2020.

104. 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.

105. Platov, S. The use of neural network modeling for the selection of thermophysical coefficients / S. Platov, O. Latypov, R. Dema, O. Kalugina // 2nd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE 2020. 2. 2020. С. 9179376.

106. Платов, С.И. Режимы охлаждения рабочих валков стана 2000 горячей прокатки / С.И. Платов, О.Р. Латыпов, Р.Н. Амиров, В.С. Банщиков, В.А. Мустафин // В книге: актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции. 2021. С. 161.

107. Платов, С.И. Конструкция коллектора охлаждения рабочих валков стана 2000 горячей прокатки / С.И. Платов, О.Р. Латыпов, В.С. Банщиков, Т.А. Мурзабаев, А.П. Азаров // В книге: актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции. – 2021. – С. 160.

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ:

Начальник научно-технического
центра ПАО «ММК»


« 3 » _____ 11 _____ 2020 г. Картунов А.Д.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов работ по договору № 232152 от 02.06.2017 г.

«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»»

Краткое описание выполненной работы.

Разработана и численно реализована математическая модель управления системой охлаждения рабочих валков в клетях №№7-13, а также системой антишелушения в клетях №№7-9 стана 2000 г.п. ПАО «ММК».

Математическая модель реализована в следующем комплексе программных продуктов

- «Расчет рационального режима обжатий в чистовой группе клетей»;
- «Расчет температурного поля полосы широкополосных станов горячей прокатки»;
- «Расчет температурного поля твердого тела в полярной системе координат»;
- «Расчет поперечной разнотолщинности полосы на стане 2000 г.п.»;
- «Расчет теплового состояния рабочих валков чистовой группы стана 2000г.п. ЛПЦ №10 ПАО «ММК».

Полученный результат.

В процессе реализации договора получены следующие практические результаты:

- разработан и численно реализован программный продукт «Расчет теплового состояния рабочих валков чистовой группы стана 2000 г.п. ЛПЦ №10 ПАО «ММК»;
- разработаны рекомендации и выпущены технологические письма, регламентирующие настройку системы охлаждения рабочих валков в клетях №№7-13 стана 2000 г.п., (ТД- 0565 от 12.09.2018 г.), а также системы антишелушения в клетях №№7-9 стана 2000 г.п. (ТД- 0566 от 12.09.2018 г.);
- разработаны рекомендации и выпущено технологическое письмо, регламентирующее эксплуатацию системы охлаждения валков в чистовой группы клетей №№7-13 стана 2000 г.п. (ТД- 0564 от 12.09.2018 г.);
- разработана методика измерения температуры рабочих валков. Выпущено регламентирующие письмо исходящий №72.04-3761 от 02.11.2018 г.;
- разработана методика определения температуры рабочих валков в процессе прокатки. Выпущено регламентирующие письмо исходящий №72.04-3761 от 02.11.2018г.

Продолжение приложения А

Дата фактического внедрения _____ 2021 г.

Срок полезного использования - _____ год

Руководитель
структурного подразделения
Начальник Л10



Подпись, дата

В.С. Банщиков

Зам. начальника ЛПЦ-10
по технологии



Подпись, дата

А.Г. Федин

Главный специалист ПАО «ММК»
по направлению,
главный прокатчик



Подпись, дата

И.Н. Фомичев

Главный специалист
по прокатному производству
НТЦ



Подпись, дата

В.Е. Телегин

Ведущий специалист по контролю
прокатных волков



Подпись, дата

В.А. Мустафин

Научный руководитель
к.т.н., доцент каф. МиТОДиМ
ФГБОУ ВО «МГТУ им.г.И. Носова»



Подпись, дата

Р.Р. Дема

Доцент каф. «МиТОДиМ», к.т.н.
ФГБОУ ВО «МГТУ им.г.И. Носова»



Подпись, дата

Р.Н. Амиров

Доцент каф «ПитФ», к.т.н.
ФГБОУ ВО «МГТУ им.г.И. Носова»



Подпись, дата

А.В. Колдин

Аспирант каф. «МиТОДиМ»
ФГБОУ ВО «МГТУ им.г.И. Носова»



Подпись, дата

О.Р. Латыпов

Приложение Б

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательной деятельности
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
 Д.В. Терентьев
« 2 » 11 2021



АКТ

использования в учебном процессе
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им.
Г.И. Носова» результатов диссертационной работы Латыпова О.Р. на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Материалы диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс на кафедре *машин и технологий обработки давлением и машиностроения* и используются при подготовке:

- бакалавров направления 15.03.01 – «Машиностроение» при преподавании учебных дисциплин «Технология и оборудование процессов производства листового и сортового металла», «Технологические процессы обработки металлов давлением»;

- аспирантов направления 15.06.01 – «Машиностроение» при преподавании учебных дисциплин «Технологии и машины горно-металлургического производства» и «Методы оценки напряженно-деформированного состояния и способы увеличения жесткости, стойкости и прочности штампового инструмента».

Согласованно:

Заведующий каф. МиТОДиМ,
д.т.н., профессор



С.И. Платов

Исполнитель:

Ассистент каф. МиТОДиМ



О.Р. Латыпов

Приложение В

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 чистовой группы клетей №№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 чистовой группы клетей №№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, съёмов при перешлифовках и стойкости рабочих валков клетей №№7 - 13 стана 2000 г.п.;
 - 3.2 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. 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. А. Лукашин

Продолжение приложения В

Приложение А к ТД _____ от _____

Настройка системы охлаждения валков в зависимости от характеристик программ прокатки на стане 2000 ШСТГ ПАО «ММК»

Тип программы прокатки	Характеристика программы прокатки		Чистовая группа клетей стана 2000 г.п. ПАО «ММК»									
	Значение $L_{сум}$, м	$V_{пр}$	7	8	9	10	11	12	13	Процент открытия гидрозатвора COB, % (Q_c , м ³ /час)		
базовый	$L_{сум} < 5000$	$V_{пр} \geq 0,63$	100 (1303)	100 (1303)	100 (1156)	95 (927)	90 (774)	85 (731)	75 (560)			
	$5000 \leq L_{сум} \leq 105000$	$V_{пр} \geq 0,51$	100 (1310)	100 (1310)	95 (1070)	90 (878)	90 (775)	85 (732)	75 (561)			
	$L_{сум} > 105000$	-	100 (1291)	100 (1291)	100 (1145)	95 (927)	90 (817)	85 (774)	80 (634)			
подкат двойной ширины	$L_{сум} < 5000$	$V_{пр} \geq 0,63$	100 (1301)	100 (1301)	100 (1153)	95 (927)	90 (774)	85 (731)	80 (597)			
	$5000 \leq L_{сум} \leq 105000$	$V_{пр} \geq 0,51$	100 (1310)	100 (1310)	100 (1070)	95 (878)	90 (775)	85 (732)	80 (561)			
	$L_{сум} > 105000$	-	100 (1294)	100 (1294)	100 (1148)	95 (927)	90 (817)	85 (731)	80 (634)			
с марками стали 07ТБЮ, 07ТБЮА, 07ТБЮТА	$L_{сум} < 5000$	$V_{пр} \geq 0,63$	100 (1311)	100 (1311)	100 (1162)	90 (878)	90 (774)	80 (688)	75 (560)			
	$5000 \leq L_{сум} \leq 105000$	$V_{пр} \geq 0,51$	100 (1304)	100 (1304)	100 (1156)	95 (878)	90 (774)	85 (731)	80 (597)			
	$L_{сум} > 105000$	-	100 (1297)	100 (1297)	100 (1150)	95 (927)	90 (817)	85 (731)	80 (597)			

Примечание.

$L_{сум}$ – суммарная длина монтажной партии (программа компания), м;

$V_{сум}$ – сумма всех ширин полос в программе прокатки, мм;

$V_{пр} = L_{сум} / V_{сум}$ – коэффициент, учитывающий ширину полос в программе прокатки.

Если коэффициент $V_{пр}$ ниже установленного (0,63, 0,51), то назначается режим для программы прокатки с большой суммарной длиной полос.

Приложение Г

УТВЕРЖДАЮ
 Главный прокатчик ПАО «ММК»
 И.Н. Фомичев
 « 22 » ЦЛК 2021



АКТ

передачи научно-технической продукции
 от ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» в ПАО «ММК»

Результатами передачи научно-технической продукции являются:

Рекомендации по настройке системы охлаждения валков (СОВ) в чистой группе клеток стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК», в зависимости от содержания программ прокатки. Рекомендации по настройке системы охлаждения приведены в таблице.

Таблица. Настройка системы охлаждения валков в зависимости от содержания программ прокатки на стане 2000 ШСГП ПАО «ММК»

Тип программы прокатки	Характеристика программы прокатки		Чистовая группа клеток стана 2000 г.п. ПАО «ММК»						
	Значение L_{cyt} , м	V_{pr}	7	8	9	10	11	12	13
базовый	$L_{cyt} < 55000$	$V_{pr} \geq 0,63$	100 (1303)	100 (1303)	100 (1156)	95 (927)	90 (774)	85 (731)	75 (560)
	$55000 \leq L_{cyt} \leq 105000$	$V_{pr} \geq 0,51$	100 (1310)	100 (1310)	95 (1070)	90 (878)	90 (775)	85 (732)	75 (561)
	$L_{cyt} > 105000$	-	100 (1291)	100 (1291)	100 (1145)	95 (927)	95 (817)	90 (774)	85 (634)
подкат двойной ширины	$L_{cyt} < 55000$	$V_{pr} \geq 0,63$	100 (1301)	100 (1301)	100 (1153)	95 (927)	90 (774)	80 (731)	80 (597)
	$55000 \leq L_{cyt} \leq 105000$	$V_{pr} \geq 0,51$	100 (1310)	100 (1310)	100 (1070)	95 (878)	90 (775)	85 (732)	80 (561)
	$L_{cyt} > 105000$	-	100 (1294)	100 (1294)	100 (1148)	95 (927)	95 (817)	85 (731)	85 (634)
с марками стали 07ГБЮ, 07ГБЮА, 07ГБЮТА	$L_{cyt} < 55000$	$V_{pr} \geq 0,63$	100 (1311)	100 (1311)	100 (1162)	90 (878)	90 (774)	80 (688)	75 (560)
	$55000 \leq L_{cyt} \leq 105000$	$V_{pr} \geq 0,51$	100 (1304)	100 (1304)	100 (1156)	95 (878)	90 (774)	85 (731)	80 (597)
	$L_{cyt} > 105000$	-	100 (1297)	100 (1297)	100 (1150)	95 (927)	95 (817)	85 (731)	80 (597)

Примечание.

L_{cyt} – суммарная длина монтажной партии (программа кованья), м;

V_{cyt} – сумма всех ширин полос в программе прокатки, мм;

$V_{pr} = L_{cyt} \cdot V_{cyt}$ – коэффициент, учитывающий ширину полос в программе прокатки.

Если коэффициент V_{pr} ниже установленного (0,63, 0,51), то назначается режим для программы прокатки с большой суммарной длиной полос.

Продолжение приложения Г

Работа системы охлаждения валков чистовой группы стана 2000 горячей прокатки ПАО «ММК» по предложенным настройкам осуществлялось с 25.03.2019 г. по 31.12.2019 г.

В этот период зафиксировано снижение удельного расхода рабочих валков с $6,9...8,5 \cdot 10^{-5}$ кг/т до $6,21...7,65 \cdot 10^{-5}$ кг/т.

Экономический эффект от снижения удельного расхода рабочих валков и увеличения их срока службы на 7...10% вследствие использования рекомендованных настроек системы охлаждения составляет 3 245 000 руб. (три миллиона двести сорок пять тысяч рублей).

От ПАО «ММК»

Начальник ЛПЦ 10



В.С. Банщиков

Зам. начальника ЛПЦ 10
по технологии

А.Г. Федин

И.о. зам. главного прокатчика

А.В. Трофимов

От ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

д.т.н., профессор каф. МиТОДиМ

С.И. Платов

ассистент каф. МиТОДиМ

О.Р. Латыпов

к.т.н., доцент каф. физики

А.В. Колдин

к.т.н., доцент каф. МиТОДиМ

Р.Н. Амиров

к.т.н., доцент каф. механики

М.В. Харченко

ассистент каф. МиТОДиМ

Е.С. Шеметова