



ЛАТЫПОВ ОЛЕГ РАФИКОВИЧ

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

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор  
Платов Сергей Иосифович

Официальные оппоненты:

ШАТАЛОВ Роман Львович,  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Обработка материалов давлением и аддитивные  
технологии» ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический университет», г. Москва.

МУНТИН Александр Вадимович,  
кандидат технических наук, заместитель  
директора по научно-исследовательской  
деятельности инженерно-технологического  
центра АО «Выксунский металлургический  
завод», г. Выкса.

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный  
университет (национальный исследовательский  
университет)», г. Челябинск

Защита состоится «1» марта 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.111.03 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ, ауд. 233 (конференц-зал).

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Терентьев Д.В.

**Актуальность работы.** Снижение эксплуатационных затрат при производстве стальных полос на широкополосных станах горячей прокатки (ШСП) 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 клетки 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 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 ( $\epsilon$ , %) скорости ( $V$ , м/с) и паузы ( $t$ , с) прокатки в каждой клетки и температуры полос ( $T_p$ , °C) перед чистовой группой клеток.
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/(м<sup>2</sup>×°C) и от рабочего валка охладителю ( $\alpha_{\text{р.в.}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>×°C)).

3. Результаты внедрения технологических и технических решений, направленных на повышение стойкости рабочих валков в чистовой группе клетей ШСГП, выраженное в снижении удельного расхода с  $6,9...8,5 \times 10^{-5}$  кг/т до  $6,21...7,65 \times 10^{-5}$  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 ( $T_n$ ), скоростей ( $V$ ) и пауз ( $t$ ) прокатки с помощью регрессионных уравнений в зависимости от конечной толщины проката, а также использование нейросетевых моделей для определения обжатий ( $\varepsilon$ ) 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 ( $T_{\text{пер}}$ ,  $V_{\text{ср}}$ ) 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 клетей 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/(м<sup>2</sup>·°C); от рабочего валка охладителю ( $\alpha_{\text{р.в.}}$ ) 3575, 3461, 3649, 3391, 3311, 3165, 3160 Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

3. Внесены изменения в классификацию программ прокатки, согласно которым предложено учитывать коэффициент ( $B_{\text{р}}$ ), характеризующий ширину прокатываемых полос. С использованием классификации определено влияние программ прокатки на тепловое состояние рабочих валков непрерывной чистовой группы клетей 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  $6,9...8,5 \cdot 10^{-5}$  кг/т до  $6,21...7,65 \cdot 10^{-5}$  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 работы 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 страниц машинописного текста, содержит 57 иллюстраций, 21 таблицу, 4 приложения, объём библиографического списка составляет 107 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении автором раскрыта актуальность, сформулирована цель, поставлены задачи, а также приведена научная новизна и практическая значимость работы.

Показано, что с целью снижения эксплуатационных затрат и себестоимости выпускаемой продукции, необходимо постоянно решать вопросы, направленные на повышение эксплуатационной стойкости рабочих валков ШСГП. В работе под стойкостью валков понимается их удельный расход (кг/т): потерянная масса валков непосредственно во время прокатки и при их шлифовке в вальцешлифовальном отделении на тонну прокатанной продукции. Одним из путей решения данной задачи является стабилизация температурного состояния рабочих валков. Поставленные задачи возможно решить путем моделирования и исследования тепловых процессов, протекающих в системе «полоса-валок», проведением комплексного исследования и выдачи рекомендаций по поиску и внедрению рациональных режимов охлаждения, а также изменению конструкции коллекторов охлаждения.

**В первой главе** на основе патентных и литературных данных представлен анализ современного состояния по вопросам функционирования системы «полоса-валок», в частности, исследований тепловых режимов валков и полосы ШСГП. В работе изучены и представлены основные направления, а также известные математические подходы для определения основных технологических параметров широкополосной горячей прокатки с целью описания функционирования системы «полоса-валок». Литературный анализ показал, что для построения моделей и исследования тепловых процессов необходимо обладать знаниями о теплофизических коэффициентах теплопередачи в системе «полоса-валок», при этом сами коэффициенты изменяются во времени в зависимости от температуры, сильно зависят от химического состава прокатываемых полос и материала валков. Зачастую литературных данных является недостаточно, а для экспериментального определения указанных коэффициентов необходимо использовать специальные теплофизические стенды и дорогостоящее оборудование. С учетом того, что сортамент прокатываемых горячекатаных полос достаточно разнообразен, необходимо искать альтернативные решения, позволяющие определять (прогнозировать) теплофизические коэффициенты, без проведения дорогостоящих и длительных испытаний.

Проведенный анализ позволил поставить цель и определить задачи исследования.

**Во второй главе** последовательно решены две взаимосвязанные задачи:

1. Статистическая оценка влияния различных технологических параметров в системе «полоса-валок» на тепловое состояние рабочих валков для четырехвалковых клетей ШСГП.
2. Построение модели прогнозирования технологических параметров в системе «полоса-валок» четырехвалковых клетей чистой группы ШСГП.

Для решения первой задачи в работе применяли методы описательной статистики.

Экспериментально-аналитическим путем исследовано влияние технологических факторов на тепловое состояние рабочих валков и полосы в чистовой группе клетей, и определены следующие наиболее влияющие факторы: обжатия в клетях, скорость прокатки, пауза между прокатываемыми полосами; химический состав полосы, геометрические параметры прокатываемых полос, число задействованных клетей в чистовой группе стана.

В результате статистической обработки экспериментальных данных (более 25000 полос) определено, что при доверительной вероятности в 95 % влияние исследуемых факторов на изменение теплового состояния рабочих валков подтверждается.

В результате исследований выявлена наиболее значимая группа технологических факторов, а также их совместное воздействие, оказывающее наибольшее влияние на тепловое состояние рабочих валков чистовой группы клетей ШСП: скорость прокатки ( $V$ , м/с), значения величины деформации ( $\epsilon$ ), число активных клетей ( $N_{\text{кл}}$ , шт.). Что потребовало разработки дополнительного алгоритма для определения исследуемых параметров.

Для решения второй задачи в работе использовалось сочетание известных статических методов и ИНС. Для расчета и прогнозирования технологических параметров прокатки составлена методика (рис. 1), в которой определение основных параметров разбито на пять последовательных этапов.

Этап 1. Определение толщины полосы перед чистовой группой клетей ( $h_p$ , мм) и числа задействованных клетей в чистовой группе стана ( $N_{\text{кл}}$ , шт.) решается на основе подхода д.т.н., профессора Румянцева М.И., в котором используется важный технологический параметр: коэффициент суммарного обжатия в чистовой группе ( $\eta_{\text{сум}}$ ).

В работе предлагается определять коэффициент суммарного обжатия ( $\eta_{\text{сум}}$ ) и число задействованных клетей ( $N_{\text{кл}}$ , шт.) на основе современного метода прогнозирования параметров при помощи обученной ИНС. Для определения толщины полосы перед чистовой группой клетей ( $h_p$ , мм) был разработан алгоритм, представленный на рис. 2.



Рисунок 1 – Методика расчета технологических параметров прокатки

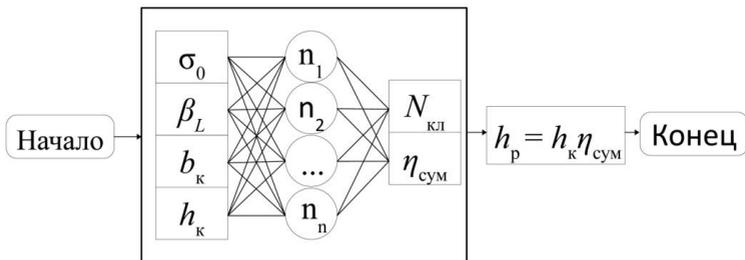


Рисунок 2 - Алгоритм определения толщины полосы ( $h_p$ , мм) перед чистой группой клеток с помощью ИНС:  $\sigma_0$  – базовое сопротивление деформации, МПа для условия  $\xi = 1 \text{ c}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 0,1$ ,  $T = 1000^\circ\text{C}$ ;  $\beta_L = b_p / L_p$  – коэффициент использования бочки вала, где  $b_p$  – ширина полосы, мм;  $L_p$  – длина бочки рабочего вала, мм;  $N_{\text{ккл}}$  – количество задействованных в процессе прокатки клеток, шт.;  $b_k, h_k$  – ширина и толщина полосы в конце прокатки ( $b_p = b_k$ ), мм;  $\eta_{\text{сум}}$  – коэффициент суммарного обжатия.

Входящая в алгоритм нейросетевая модель представляет собой многослойный перцептрон, который состоит из входного, скрытого и выходного слоев, содержащих 4, 9 и 2 нейрона соответственно. В качестве функции активации использовалась функция «ReLU». Обучение и построение нейронной сети реализовано с помощью библиотеки «PyTorch» интерпретируемого языка программирования «Python». Средняя относительная ошибка ИНС составила 4,7 %, максимальная относительная ошибка - 19,1 %.

Этап 2. «Определение обжатий в чистой группе клеток». Для определения обжатий в чистовых группах ШСГП в работе предлагается модифицировать известные методы Имаи, развитые в работах д.т.н., профессора Румянцева М.И.

Прогнозирование режимов частных обжатий в чистой группе клеток ШСГП реализуется при помощи алгоритма, структура которого приведена на рис. 3.

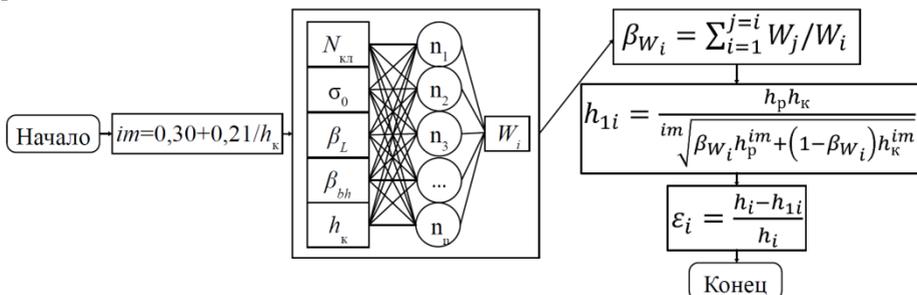


Рисунок 3 - Алгоритм определения обжатий в чистовых клетях стана горячей прокатки:  $\sigma_0$  – базовое сопротивление деформации, МПа для условия  $\xi=1 \text{ c}^{-1}$ ,  $\varepsilon=0,1$ ,  $t=1000^\circ\text{C}$ ;  $\beta_{bh} = b_k/h_k$  – коэффициент отношения ширины полосы ( $b_k$ , мм) к толщине полосы ( $h_k$ , мм);  $h_{1i}$  – зазор между рабочими вальками в  $i$ -й клетке (базовое уравнение Имаи);  $im$  – коэффициент Имаи;  $\beta_{W_i}$  – коэффициенты использования мощности главных приводов;  $W_i$  – мощность, необходимая для прокатки в  $i$ -й клетке.

Нейросетевая модель, входящая в алгоритм определения обжатий в чистой группе клеток, состоит из входного, одного скрытого и выходного слоев,

содержащих 5, 11 и 7 нейронов соответственно. Средняя относительная ошибка ИНС составила 6,3 %, максимальная относительная ошибка - 12,4 %.

**Этап 3.** «Определение скоростных параметров процесса прокатки». Для чистовой группы клетей ШСГП прогнозирование скорости прокатки ( $V_i$ , м/с) было реализовано с помощью алгоритма, структура которого приведена на рис. 4. Расчет скоростных параметров процесса прокатки был реализован с применением метода регрессионного анализа, который был проведен в программе STATISTICA 6.0.

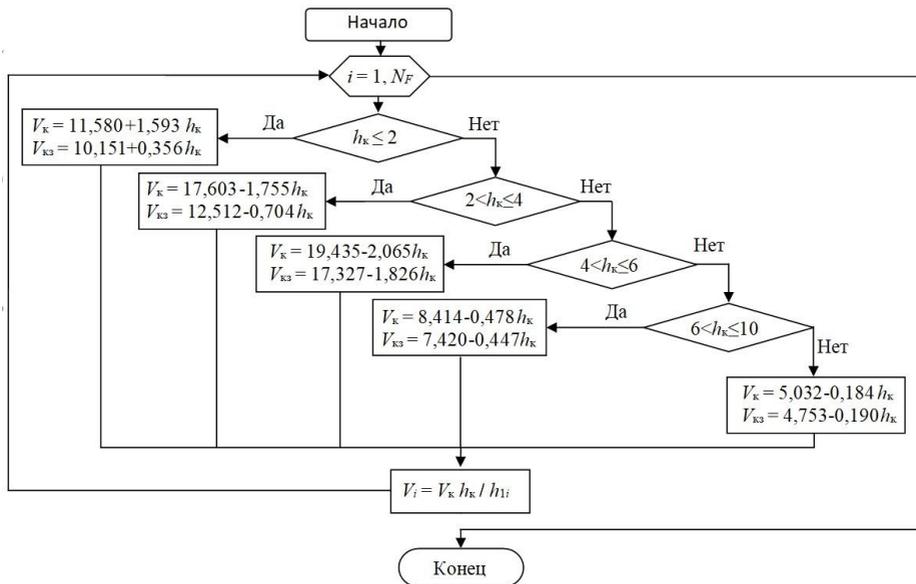


Рисунок 4. Алгоритм расчета скоростных параметров процесса прокатки в чистовой группе ШСГП:  $V_k$  – скорость прокатки в последней задействованной клетей, м/с;  $V_{кз}$  – скорость захвата полосы в последней задействованной клетей, м/с;  $V_i$  – скорость прокатки в  $i$ -ой клетей, м/с;  $h_k$  – конечная толщина полосы, мм

**Этап 4.** «Определение температуры перед чистовой группой клетей». Температура  $T_7$  (°C) определена с помощью регрессионного уравнения, составленного в программном комплексе Statistica 6.0. Стандартное отклонение полученного уравнения (1) составило 9,7 °C, а средняя ошибка составила 1,2 %. Критерий Фишера для уровня значимости  $p = 0,05$  составил  $F_{расч} = 664$  ( $F_{крит} = 2,4$ ).

$$T_7 = 418,479 + 0,549 \cdot T_6 - 0,124 \cdot h_k + 0,014 \cdot b_k - 0,034 \cdot L, \quad (1)$$

где  $T_6$  – температура полосы после черновой группы клетей, °C;  $h_k$ ,  $b_k$  – конечная толщина и ширина полосы соответственно после прокатки в чистовой группе клетей, мм;  $L$  – длина полосы после прокатки в чистовой группе клетей, мм.

**Этап 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 не выявлены. Поэтому в работе при

определении теплового состояния рабочих валков до непосредственно самой прокатки значения пауз определялись по среднему значению. Среднее значение пауз между прокаткой полос одной плавки-партии приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Среднее значение пауз (с) прокатки на ШСГП 2000 ПАО «ММК»

Конечная толщина полосы, 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
Пауза, с	5,5	6,5	7,0	10,5	13,0	14,0	19,0

Результаты исследований прошли апробацию на ШСГП 2000 ПАО «ММК». Адекватность расчетов, произведенных по разработанным алгоритмам, оценивалась по средней ошибке ( $\bar{\delta}$ ) и стандартному отклонению ( $\sigma$ ), которые составили не более 10 %, что позволяет признать разработанную модель достоверной.

Необходимо отметить, что разрабатываемая математическая модель является прогнозной, т.е. позволяет с вероятностью не менее чем  $P(t)=0,85$  прогнозировать технологические параметры в чистой группе клеток ШСГП, а также учитывать наиболее значимые факторы влияющие на тепловое состояние рабочих валков.

**Третья глава** посвящена моделированию теплового состояния в системе «полоса-валок».

Исследование теплового состояния в системе «полоса-валок» производилось в несколько этапов:

- на первом этапе разрабатывалась модель, описывающая тепловое состояние прокатываемой полосы, с учетом влияния внешних технологических факторов;
  - на втором этапе разрабатывалась модель двумерного температурного поля рабочего валка с учетом модели теплового состояния полосы и процесса тепловыделения в результате пластической деформации прокатываемой полосы;
- Первый этап исследования.* Моделирование теплового состояния прокатываемой полосы основывалась на численном решении базового уравнения теплопроводности (2). При решении задачи принималось, что скорость движения полосы больше скорости распространения тепла в ней, поэтому решение задачи сводится к одномерной модели, расчетная схема которой приведена на рис. 5.

Для решения задачи определены граничные условия:

$$V = \frac{\partial x}{\partial t}; a = \frac{\lambda}{c\rho}; V \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (2)$$

где  $V$  - скорость прокатки, м/с;  $a$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала полосы, Вт/(м·°С).

Каждый шаг  $\Delta x_i$  по координате  $X$  характеризуется своей скоростью  $V_i$ , которая определяется (3, 4):

$$V_i = \frac{V_{i-1}h_{i-1}}{h_i} = \frac{V_{i-1}h_{i-1}}{h_{i-1}-2\Delta y_i}, \quad (3)$$

$$\Delta y_i = \sqrt{r^2 - (l_i - \Delta x_i)^2 - r^2 - l^2}, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус рабочего валка, мм;  $l$  – длина очага деформации, мм;  $h_i$ ,  $h_{i-1}$  – толщина полосы на выходе и входе в клеть соответственно, мм.

При решении задачи для каждой из зон теплообмена в системе «полоса-валок» были использованы дополнительные уравнения, описывающие процесс теплообмена при конвективном охлаждении воздуха и теплообмене излучением. Для учета теплофизических свойств воздуха использованы полиномы

зависимостей числа Рейнольдса, числа Прандтля, кинетической вязкости и теплопроводности от температуры.

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. 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 прокатываемого сортамента) определены численные значения температурных градиентов, диапазон которых составляет 15...90 °С. Получены регрессионные уравнения (5, 6), описывающие изменение температуры прокатываемой полосы по ее ширине (градиента). Для каждой предложенной условной группы определены численные значения коэффициентов входящих в уравнения.

$$\Delta T_{200} = a_{200} \cdot h + b_{200} \cdot B + c_{200} \cdot T_n; \quad (5)$$

$$\Delta T_{100} = a_{100} \cdot h + b_{100} \cdot B + c_{100} \cdot T_n, \quad (6)$$

где  $\Delta T_{200}$ ,  $\Delta T_{100}$  – градиент температуры между центром и точками в 200 мм и 100 мм от края полосы соответственно (рис. 5), °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;  $T_n$  – температура в центре полосы, °С.

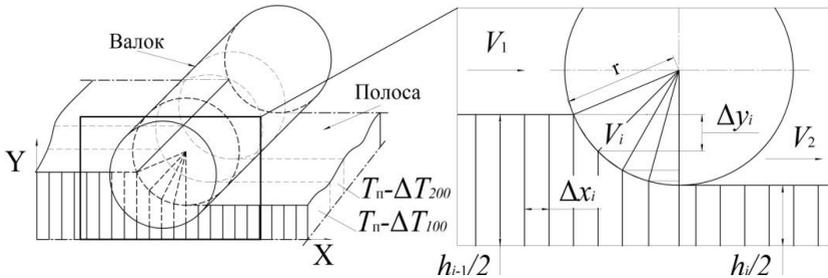


Рисунок 5 – Расчетная схема тепловой модели для полосы в системе «полоса-валок»:

$V_1$  – скорость полосы на входе в очаг деформации, м/с;  $V_2$  – скорость полосы на выходе из очага деформации, м/с;  $V_i$  – скорость в  $i$ -точке очага деформации, м/с;  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  – минимальный шаг для расчета скорости в  $i$ -точке, мм;  $T_n$  – 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

*Второй этап исследования.* Разработанная модель двумерного температурного поля рабочего вала основана на известных работах А.Н. Шичкова, Э.А. Гарбера, М.В. Хлопотина. Расчетная схема модели представлена на рис. 6.

Численная реализация модель базировалась на решении уравнений теплового баланса (7-9) и уравнения теплопроводности (10) в цилиндрических координатах:

$$Q_{p.v.} = Q_{охл.p.v.}^{вх.} + Q_{охл.p.v.}^{вых.}; \quad (7)$$

$$Q_{охл.p.v.}^{сум} = Q_{p.v.}; \quad Q_{охл.p.v.}^{сум} = \alpha_{p.v.} \cdot F_{охл.p.v.}^{сум} \cdot (t_{p.v.} - t_{охл.}); \quad (8)$$

$$Q_{p.v.} = \alpha_{конт} \cdot l_{од.} \cdot b \cdot (T_n - t_{p.v.}); \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} ar \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} a \frac{\partial T}{\partial \varphi}, \quad (10)$$

где  $a = a(r; \varphi)$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

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

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

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

Отличительная особенность решаемой модели заключается в авторской постановке схемы ее численной реализации (рис. 6). Она заключается в последовательном решении независимых друг от друга расчета теплового состояния в  $j$ -х точках поперечного профиля рабочего валка. С учетом симметрии задается  $j = 1 \dots 5$  с шагом 200 мм.

Основной проблемой, с которой сталкиваются исследователи, является определение коэффициентов теплопередачи от рабочего валка полосе  $\alpha_{в.р.}$  и теплопередачи от полосы рабочему валку  $\alpha_{конт.}$ . При этом данные коэффициенты достаточно сильно зависят от типа оборудования, условий его эксплуатации и т.п.



Рисунок 6. Схема численной реализации модели теплового состояния рабочего валка при взаимодействии с полосой:  $r$  – радиус рабочего валка, мм;  $\varphi$  - угол, определяющий зону контакта валка с полосой, град;  $d\varphi$ ,  $dr$  – минимальный шаг при расчете теплового состояния валка по углу (град) и радиусу (мм) соответственно

Для адаптации математической модели к условиям ШСГП 2000 ПАО «ММК» была разработана ИНС, обученная на данных, представленных на рис. 7.

Основные данные для обучения ИНС были выгружены из цеховой базы учета данных технологии прокатки на ШСГП 2000 ПАО «ММК». Данные фиксировались непосредственно датчиками АСУ ТП стана (кроме температуры рабочих валков).

В условиях листопрокатного цеха температура рабочих валков чистой группы измеряется после их вывалки из клетки вручную и заносится в базу учета данных. Съемка рабочих валков производится тепловизором SDS-Infrared

HotFind-DXT. Для снижения ошибки измерения температуры из-за разности коэффициентов светоотражения вдоль бочки вала клеилась лента из крепированной бумаги с известной степенью излучения. При обучении ИНС коэффициенты теплопередачи  $\alpha_{р.в.}$  рассчитывались по математической модели теплового состояния рабочих валков исходя из разности значений расчетных и фактических температур валков. После расчета коэффициента  $\alpha_{в.р.}$  для каждой клетки в чистой группе стана рассчитывались коэффициенты теплопередачи от полосы рабочему валку  $\alpha_{конт.}$  с помощью составленных систем уравнения теплового баланса (11).

$$\alpha_{конт.} = \frac{\alpha_{р.в.} \cdot F_{охл.р.в.}^{сум} \cdot (t_{р.в.} - t_{охл.})}{l_{о.д.} \cdot b \cdot (T_n - t_{р.в.})} \quad (11)$$

Нейросетевая модель (многослойный перцептрон), показавшая наименьшие ошибки, состоит из входного, двух скрытых и выходного слоев, содержащих 11, 15, 5 и 7 нейронов соответственно. В качестве функции активации использовалась функция «ReLU». Нейронная сеть реализована в научно вычислительном пакете «PyTorch» в интерпретируемом языке программирования «Python».

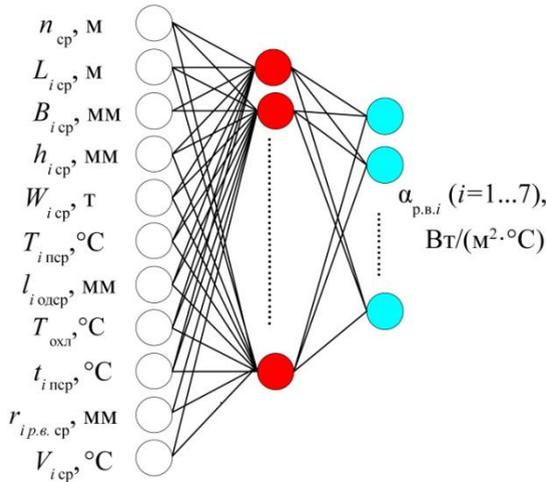


Рисунок 7 – Входные и выходные данные нейронной сети для определения коэффициента теплопередачи  $\alpha_{р.в.}$ :  $n$  – количество полос в программе прокатки, шт;  $L_{i\text{cp}}$  – средняя длина полосы по программе прокатки в  $i$ -клетки, мм;  $B_{i\text{cp}}$  – средняя ширина полосы по программе 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, т;  $T_{i\text{спр}}$  – средняя температура полосы по программе прокатки в  $i$ -ой клетки, °C;  $l_{i\text{одеp}}$  – средняя длина очага деформации по программе прокатки в  $i$ -ой клетки, мм;  $T_{\text{охл}}$  – температура воды в системе охлаждения валков и полосы, °C;  $r_{i\text{р.в.}}$  – радиус рабочего вала в  $i$ -ой клетки, мм;  $t_{i\text{спр}}$  – средняя паузы между проходами полос в  $i$ -ой клетки, с;  $V_{i\text{спр}}$  – средняя скорость прокатки в  $i$ -той клетки, м/с.

Предложенный метод адаптации, на основе построенной ИНС, позволяет определять коэффициенты теплопередачи от рабочего вала охладителю  $\alpha_{р.в.}$  и теплопередачи от полосы рабочему валку  $\alpha_{конт.}$  в каждой клетки чистой группы ШСГП для конкретных условий производства. Усредненные значения коэффициентов составили:  $\alpha_{конт.}$  – 3669, 3552, 3745, 3480, 3398, 3249, 3243

Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\alpha_{p.v.}$  – 3575, 3461, 3649, 3391, 3311, 3165, 3160 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Значения коэффициентов согласуются с результатами исследований Хлопотина М.В., по которым значения коэффициента  $\alpha_{p.v.}$  находятся в диапазоне 2300...3900 Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

На заключительном этапе исследования произведена численная реализация математической модели (программа для ЭВМ №2021665573).

Принципиальным отличием предложенного решения заключается в том, что программный продукт позволяет проводить расчет в автоматическом режиме. Из данных цеховых учета программа получает данные о сформированной программе прокатки за 2...3 часа до начала процесса прокатки и производит расчет процесса прокатки по всем чистовым клетям стана. Модель позволяет на этапе формирования программы прокатки с учетом влияния внешних технологических факторов прогнозировать с вероятностью 80...85 % следующие параметры: тепловое состояние рабочих валков и его изменение в процессе прокатки (тепловой профиль рабочего валка в 5 поперечных сечениях).

Погрешность разработанной математической модели оценивали сравнением значений температур рабочих валков, рассчитанных по данным цехового учета, и значениями температур, измеренных после вывалки. Средняя абсолютная ошибка, средняя ошибка и стандартное отклонение не превышают 11,4 %, 7,1 °С и 8,8 °С соответственно и в среднем по всем клетям составляют 8,7 %, 5,4 °С и 6,7 °С.

**В четвертой главе** проведены теоретические исследования изучаемых технологических факторов на изменение температуры и теплового профиля рабочих валков. С целью повышения стойкости рабочих валков разработаны рекомендации по режимам их охлаждения и изменению конструкции коллекторов охлаждения.

С помощью численно реализованной модели теплового состояния рабочих валков проведены исследования изменения их теплового состояния и теплового расширения профиля по длине бочки валка. Результаты исследований приведены на рис. 8, 9. Анализ результатов, позволил сделать заключение, что наблюдается повышение температуры рабочих валков, в отдельных случаях до 110...120 °С, и практически в каждой программе прокатки до 95...110 °С, что значительно превышает рекомендуемые производителями валков 80 ± 10 °С.

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 прокатных клетей в зависимости от суммарной длины программы прокатки ( $L_{сум}$ , м) и коэффициента, учитывающего ширину полос ( $B_{pr}$ ). Изменение и управление расходом охладителя предложено производить посредством частичного перекрытия гидрозатвора в системе охлаждения валков для каждой клетки ШСГП 2000 ПАО «ММК». За счет частичного закрытия гидрозатворов на последних клетях чистой группы (№10-13) происходит перераспределение расхода охладителя по клетям.

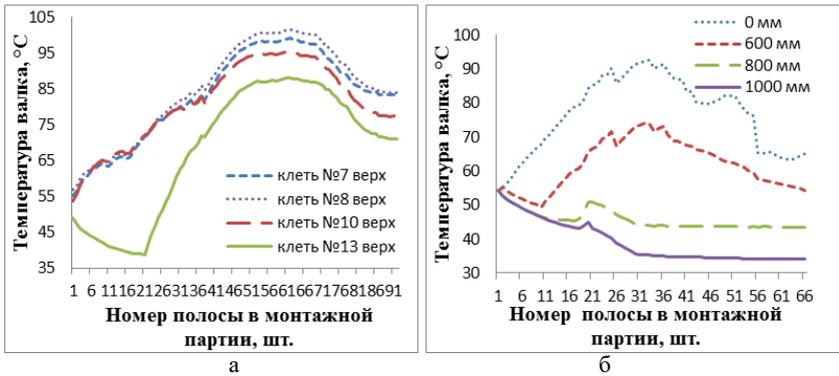


Рисунок 8 – Тепловое состояние рабочего валька в процессе прокатки во время исполнения программы прокатки № 49373: а – средняя температура сечения середины бочки рабочих валков; б - средняя температура поперечных сечений бочки рабочего валька в клети №7 от середины (0 мм) до края (1000 мм)

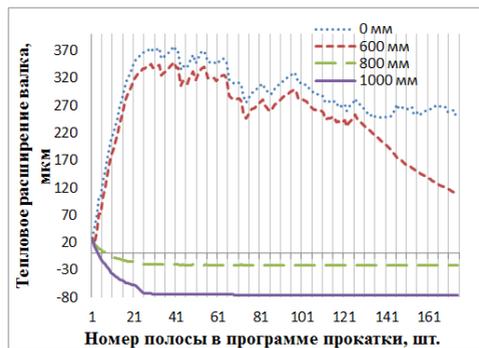


Рисунок 9 – Тепловое расширение верхнего рабочего валька по длине бочки в точках в 600, 800 и 1000 мм от ее середины (0 мм) в клети №7 при исполнении программы прокатки № 49171

Для управления тепловым состоянием рабочих валков, с учетом предложенных решений по определению расхода охладителя, предложена конструкция коллектора охлаждения (рис. 10). Коллектор поделен на центральную зону, промежуточные и крайние зоны. В каждой зоне коллектора установлены нерегулируемые форсунки. Расход форсунок в центральной зоне составляет 95...105 л/мин, в промежуточной – 75...85 л/мин, в крайней – 37...45 л/мин. Внутри коллектора установлены перегородки с отверстиями для направления потоков охладителя в нем. На данное устройство подана заявка на изобретение.

Различная интенсивность охлаждения по зонам коллектора позволяет снизить градиент температуры по длине бочки валька и, следовательно, термические напряжения в нем.

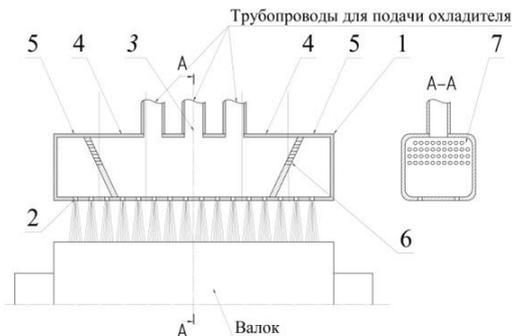


Рисунок 10 – Конструкция коллектора охлаждения рабочих валков: 1 – коллектор; 2 – форсунки; 3 – центральная зона коллектора; 4,5 – промежуточные и крайние зоны соответственно; 6 – перегородка; 7 – отверстия в перегородке

Внедрение результатов исследования произведено на ШСГП 2000 ПАО «ММК». Оценка эффективности внедренных мероприятий показала 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 срок службы рабочих валков на 7...10 эксплуатационных часов работы (7...10 %). Оценка качества полосы показала уменьшение дефектов по критерию «поперечная разнотолщинность» на 3,5 %, что находится в пределах статистической погрешности изменения качества произведенных полос по данному критерию на ШСГП 2000 ПАО «ММК».

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ

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 изменение теплового состояния рабочих валков в клетях 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 ( $\epsilon$ ) в клетях (исследования проведены на ШСГП 2000 ПАО «ММК»).

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

С использованием ИНС получены алгоритмы для прогнозирования:

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

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

С помощью регрессионного анализа разработаны алгоритмы для прогнозирования:

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

– температуры полосы перед чистовой группой клеток ( $T_7$ , °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 вала. 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 вала (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 ( $\alpha_{\text{конт.}}$ ) 3669, 3552, 3745, 3480, 3398, 3249, 3243 Вт/(м<sup>2</sup>×°С); от рабочего вала охладителю ( $\alpha_{\text{в.р.}}$ ) 3575, 3461, 3649, 3391, 3311, 3165, 3160 Вт/(м<sup>2</sup>×°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 вала 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 клетей 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  $6,9...8,5 \times 10^{-5}$  кг/т до  $6,21...7,65 \times 10^{-5}$  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»).

#### ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

– в научных изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. 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, **О.Р. Латыпов** и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 12. – С. 93-99 (перечень ВАК).

2. Дёма, Р.Р. Компьютерное моделирование и исследование процесса горячей прокатки на базе программного комплекса Deform-3D / Р.Р. Дёма, С.И. Платов, А.В. Козлов, **О.Р. Латыпов** и др. // Производство проката. – 2018. – № 11. – С. 36-40 (перечень ВАК).

3. Дёма, Р.Р. Определение текущей величины износа рабочих валков при широкополосной горячей прокатке / Р.Р. Дёма, С.И. Платов, А.В. Козлов, **О.Р. Латыпов** и др. // Сталь. – 2018. – № 10. – С. 30-34 (перечень ВАК).

4. 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 (перечень ВАК).

– в научных изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах WoS и Scopus:

5. 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. – 2020. – P. 9179376 (Scopus).

6. **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. – P. 012101 (Scopus).**

7. 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. - P. 2417-2421 (Scopus и WoS).**

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

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

9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021665573. Расчет теплового состояния валков четырехвалковых клетей «кварто» с учетом технологии листовой горячей прокатки / Р.Н. Амиров, В.С. Банщиков, Р.Р. Дема, **О.Р. Латыпов**, Т.А. Мурзабаев, А.А. Николаев, С.И. Платов, М.В. Харченко. Заявл. 8.10.2021, опублик. 12.10.2021.

10. 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. Дема, **О.Р. Латыпов**, А.А. Николаев, С.И. Платов, М.В. Харченко. Заявл. 8.10.2021, опублик. 15.10.2021.

– в других изданиях:

11. Платов, С.И. Конструкция коллектора охлаждения рабочих валков стана 2000 горячей прокатки / С.И. Платов, **О.Р. Латыпов**, В.С. Банщиков и др. // В книге: актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова – 2021. – С. 160.

12. Платов, С.И. Режимы охлаждения рабочих валков стана 2000 горячей прокатки / С.И. Платов, **О.Р. Латыпов**, Р.Н. Амиров, и др. // В книге: актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова – 2021. С. – 161.

13. Платов, С.И. Нейросетевая модель прогнозирования обжатий в чистой группе клетей на стане 2000 горячей прокатки / С.И. Платов, Р.Р. Дема, **О.Р. Латыпов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова – 2020. – Т.11. – №1. – С. 242.**

14. 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** и др. // Перспективные материалы и технологии. Сборник материалов международного симпозиума. Под ред. В.В. Рубаника. Брест: Витебский государственный технологический университет – 2019. – С. 513-515.

15. 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. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова – 2019. – С. 59-61.