

На правах рукописи

СЕВИДОВ АЛЕКСЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ СТАЛЬНЫХ
ТОНКИХ ПОЛОС НА ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНОМ КОМПЛЕКСЕ

Специальность 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Мунтин Александр Вадимович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
оборудования и технологий прокатки МГТУ им. Н.Э.
Баумана, заместитель директора по научно-
исследовательской деятельности инженерно-
технологического центра АО «Выксунский
металлургический завод»

Официальные оппоненты: Дёма Роман Рафаэлевич
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова», кафедра машин и
технологий обработки давлением и машиностроения

Шопин Иван Иванович
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Липецкий государственный технический
университет», кафедра обработки металлов
давлением

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский политехнический университет»

Защита состоится «___» _____ 2023 года в ___ часов ___ минут на
заседании диссертационного совета 24.2.331.01 при Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я
Бауманская, 5, стр. 1.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по
указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и
на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Плохих А. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время одним из значимых инновационных решений в черной металлургии является разработка технологии производства горячекатаной стальной полосы на литейно-прокатных комплексах (ЛПК) из тонкослябовой непрерывнолитой заготовки, которая поступает напрямую в прокатный стан без охлаждения до комнатной температуры и повторного нагрева. В мире введено в эксплуатацию более 60 ЛПК, в России по состоянию на 2023 год – один комплекс на Выксунском металлургическом заводе (ВМЗ). Для ЛПК особенно перспективным является выпуск горячекатаных широких от 1200 до 1300 мм тонких полос толщиной от 1,0 до 1,5 мм. Это связано с большим спросом на рулонный прокат такого сортамента при производстве профильных труб для строительной отрасли.

В настоящее время доля промышленного производства тонкой полосы толщиной менее 1,5 мм на литейно-прокатных комплексах с дискретной задачей сляба в стан составляет 5-10% и продолжает расти. Например, на ЛПК ВМЗ за период 2015-2020 гг. производство такого сортамента увеличилось в 2 раза с 34900 тонн до 69000 тонн в год. При таком объеме производства только на одном ЛПК ВМЗ отбраковывается до 3000 тонн дефектной продукции, из которых не менее 80% связаны с неудовлетворительной планшетностью.

Решению проблемы улучшения качества тонкой полосы по геометрическим параметрам посвящены многие работы отечественных и зарубежных ученых, таких как Целиков А.И., Полухин В.П., Грудев А.П., Шаталов Р.Л., Гинзбург В.Б., Павлов И.М. Известные исследования описывают природу отклонений планшетности полосы, однако не все вопросы удалось изучить достаточно подробно, в частности, степень влияния состояния прокатных вал ков на поперечную разнотолщинность. Отсутствие достаточного объема данных промышленного мониторинга ранее не позволяло с высокой точностью прогнозировать поперечный профиль полосы, формирующий планшетность. В то же время даже наличие этих данных без обработки и создания математических моделей, внедренных в систему автоматизированного управления станом, не принесёт требуемый эффект для реального осуществления процесса горячей прокатки планшетных полос.

Таким образом, снижение дефектности тонких полос по планшетности на основе совершенствования математических моделей автоматизированной системы управления (АСУ) прокатного стана является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является снижение количества дефектов планшетности горячекатаных стальных полос толщиной 1,0-1,5 мм из Ст2пс при их производстве на литейно-прокатном комплексе.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Обзор современных технологий, оборудования и автоматизации, анализ факторов, влияющих на возникновение дефектов планшетности при производстве стальной горячекатаной тонкой полосы на ЛПК, выбор и обоснование методик исследования;

2. Исследование реологических свойств низколегированной стали Ст2пс в диапазоне температурных и деформационных параметров, применяемых при производстве тонкой полосы, определение термомеханических коэффициентов;

3. Уточнение значения коэффициента трения при промышленной прокатке тонких горячекатаных полос посредством статистической обработки большого объема измерений технологических параметров в клети;

4. Разработка усовершенствованных математических моделей механического износа рабочих валков с использованием современных методик машинного обучения, а также конечно-разностной модели температурного расширения рабочих валков чистовой группы клетей стана 1950 ЛПК;

5. Разработка режимов обжати в чистовой группе клетей и параметров противоизгибов рабочих валков, обеспечивающих снижение количества дефектов планшетности, а также внедрение рекомендательной системы поддержки производства тонких полос толщиной 1,0-1,5 мм в автоматизированную систему управления станом литейно-прокатного комплекса ВМЗ.

Научная новизна:

1. Впервые с использованием реальных промышленных данных горячей прокатки стальных полос на непрерывном широкополосном стане определен коэффициент трения между полосой и рабочим валком при установившемся процессе. Значения коэффициента для полос толщиной 1,0-1,5 мм находятся в пределах 0,12-0,21, для металла толщиной 7-10 мм в пределах 0,19-0,32. Данные получены для температурного диапазона 817-986 °С, степени обжатия 0,17-0,94 и окружной скорости вращения валков 0,5-8,0 м/с.

2. Получена уточненная зависимость, описывающая отношение коэффициента трения при захвате к коэффициенту трения при установившемся процессе. Диапазон значений отношения $\frac{\mu_{\text{зах}}}{\mu_{\text{уст}}}$ для скоростей от 0,5 до 8,0 м/с составляет от 1,26 до 2,52 и описывается следующей формулой:

$$\frac{\mu_{\text{зах}}}{\mu_{\text{уст}}} = 1,5 \cdot V_B^{0,25}$$

3. Впервые реализован новый метод моделирования механического износа рабочего валка с использованием алгоритмов машинного обучения (решающие деревья и нейронные сети), позволяющий прогнозировать не менее 300 точек по длине бочки валка с точностью по средней абсолютной ошибке в 4 раза выше, чем в классических моделях.

Практическая значимость и внедрение результатов. С применением результатов представленной работы произведено более 215 тысяч тонн тонкой полосы (толщиной менее 1,5 мм) из Ст2пс в условиях стана 1950 ЛПК ВМЗ. Разработанные модели внедрены в АСУ стана 1950, что позволило снизить количество симметричных дефектов планшетности на 33%, асимметричных на 17%, снизить количество аварийных остановок при прокатке тонкой полосы в 3 раза. Полученные результаты обеспечили снижение расходного коэффициента металла на 11 кг/т при производстве полосы толщиной менее 1,5 мм из Ст2пс. Результаты работы

использованы в научном проекте ПРИОР/СН/НУ/22/СП5/26 «Создание инновационных цифровых инструментов для применения прикладного искусственного интеллекта и продвинутого статистического анализа больших данных в технологических процессах производства металлургической продукции», выполняемого в рамках программы стратегического академического лидерства Российской Федерации «Приоритет-2030», а также используются в учебном процессе кафедры МТ10 «Оборудование и технологии прокатки» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность результатов экспериментальных исследований гарантируется их проведением на современном сертифицированном оборудовании. Исследование реологических свойств стали проводились на имитационном комплексе Gleeble 3800 и 3180. Верификацию полученной модели сопротивления деформации проводили с помощью метода базисных давлений на лабораторном стане ДУО 300. Обработку технологических данных проводили с использованием новейшего лицензионного программного обеспечения. Обоснованность теоретических выводов и результатов экспериментальных исследований подтверждается положительными результатами реализации предложенных технологических решений в промышленных условиях.

Апробация работы. Полученные результаты и положения диссертационной работы были обсуждены на 2-х международных и 3-х российских конференциях: XI Международный конгресс прокатчиков. Магнитогорск. 2017 г.; X научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК, Выкса, 2017 г; XIII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва. 2020 г.; XIII научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК, Выкса, 2020 г; METAL 2021 – 30th International Conference on Metallurgy and Materials, Брно, Чехия, 2021 г.

Личный вклад автора. Севидов А.Е. лично провел анализ современных технологических тенденций производства тонкой полосы на непрерывных широкополосных станах и литейно-прокатных комплексах, получил собственную модель расчёта сопротивления деформации на основе новых экспериментальных данных, на основе промышленных данных уточнил коэффициент трения при установившемся процессе прокатки в чистовой группе клетей широкополосного стана, с использованием машинного обучения разработал уникальную модель износа рабочих валков, а также с использованием конечно-разностного подхода уточнённую температурную модель валков, внедрил в АСУ стана 1950 ЛПК АО «Выксунский металлургический завод» уникальную систему поддержки производства тонкого проката, которая обеспечила повышение качества продукции по планшетности.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 7 научных трудах, из которых 4 статьи в журналах, входящих в базу Scopus, 4 статьи – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также патент на изобретение РФ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы из 125 наименований. Работа изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков и 11 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность проводимой работы, определены цель и поставлены задачи для достижения результата, сформулирована научная новизна и практическая ценность работы, приведены данные об апробации работы и публикациях по теме.

В первой главе проведен анализ современных технологических решений, оборудования и автоматизации, применяемых для производства тонкой полосы на литейно-прокатных комплексах и традиционных непрерывных широкополосных станах. Определены ключевые факторы, оказывающие влияние на возникновение дефектов планшетности. Обоснована необходимость повышения точности математических моделей. Показана актуальность применения различных алгоритмов машинного обучения при обработке большого объёма данных с датчиков АСУ для применения в новых моделях. Таким образом, в главе обосновывается выбор направления и способов исследования.

Вторая глава посвящена обоснованию выбора материала исследования и описанию методик исследования. В качестве материала выбрана низкоуглеродистая низколегированная сталь 2пс по ГОСТ 380 двух химических составов с фактическим содержанием углерода 0,05% и 0,15%, легированная марганцем и кремнием. Данная марка стали наиболее распространена при производстве горячекатаной тонкой полосы. Экспериментальные исследования сопротивления деформации стали проводили с применением цилиндрических образцов на сжатие $\text{Ø}10 \times 12-18$ мм и на растяжение $\text{Ø}10$ мм. Испытания проводили на установках Gleeble 3800 и 3180. Лабораторные прокатки проводили на стане ДУО 300. Сбор и анализ данных с технологической линии осуществлялся с помощью специализированных программ, таких как: Oracle Database, ibaPDA, ibaAnalyzer, Microsoft Excel и другие. Разработка моделей и вычисления проводились с помощью языков программирования Python и C++. Данные по технологическим параметрам собирались в единый набор данных, с которым производились дальнейшие вычисления в среде Jupyter Notebook. Промышленное опробование и внедрение проводили на ЛПК АО «ВМЗ», который включает в себя стан 1950, предназначенный для производства полос из низкоуглеродистых, углеродистых и низколегированных сталей из сляба толщиной 90-105 мм, смотанных в рулоны массой до 40 тонн (схема и описание в пункте 1.2 диссертации).

В третьей главе представлены результаты экспериментов, проведённых с применением лабораторного комплекса Gleeble, определены термомеханические коэффициенты для расчета сопротивления деформации исследуемых конструкционных сталей 2пс (с содержанием углерода 0,05% и 0,15%). Испытания образцов проводили в температурном диапазоне 700–1200 °С при скорости деформации 0,1-20,0 сек⁻¹. При сжатии максимальная истинная деформация составила около 0,9, а при растяжении – 0,15-0,20 в связи с разрушением образца.

На Рисунке 1 приведено сравнение результатов испытаний при различных условиях деформации. Сравнение образцов на сжатие и растяжения показало незначительное различие до 3-4% (Рисунок 1, а). Для оценки влияния размеров

образца при сжатии на результаты испытаний проведены сравнительные тесты на цилиндрических образцах из стали 2пс диаметром 10мм и высотой 12, 15 и 18 мм. Результаты всех вариантов испытаний на сжатие и растяжение близки, однако отличия в процессе образования бочки на образце влияют на появление расхождений при степени деформации выше 0,4 (Рисунок 1, б). В итоге для построения модели и определения термомеханических коэффициентов использовали испытание на цилиндрическом образце высотой 15мм.

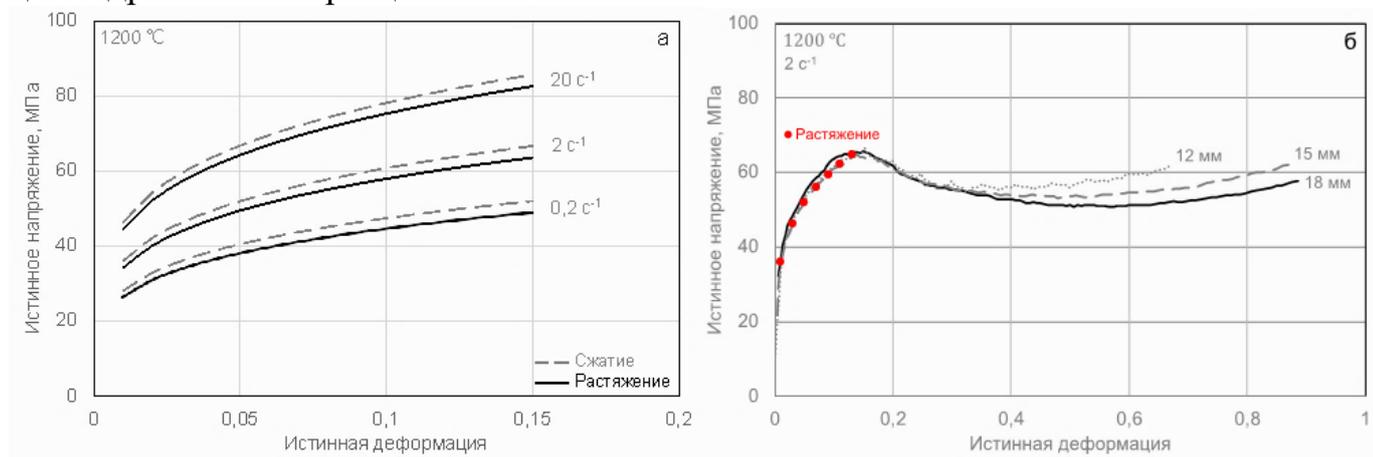


Рисунок 1. Сравнение результатов испытаний стали 2пс на растяжение и сжатия образцов различной высоты 12, 15 и 18 мм

Для увеличения точности аппроксимации полученных значений напряжений в модель сопротивления деформации интегрированы коэффициенты, которые учитывают влияние температуры на чувствительность к изменению степени деформации. Коэффициент детерминации при описании экспериментальных данных составил 0,986. Полученные кривые напряжения в результате преобразований и аппроксимации описывались с помощью уравнения:

$$\sigma_{sm} = \sigma_{ref} \left(\left(\sigma_1 \cdot \frac{T}{T_{ref}} + \sigma_2 \right) + \left(A_1 \cdot \frac{T}{T_{ref}} + A_2 \right) \cdot e^{\frac{-\varepsilon/\varepsilon_{ref}}{b_1 \cdot T/T_{ref} + b_2}} \right) \cdot e^{c \cdot \frac{T}{T_{ref}}} \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \right)^{m_1 \cdot \frac{T}{T_{ref}} + m_2},$$

где: T – среднемассовая температура деформации [°C]; ε – логарифмическая степень деформации; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации [с⁻¹]; $\varepsilon_{ref} = 0,2$, $\dot{\varepsilon}_{ref} = 10$ с⁻¹, $T_{ref} = 900$ °C, $\sigma_{ref} = 122$ МПа – референтные значения параметров деформации; σ_1 , σ_2 , A_1 , A_2 , b_1 , b_2 , c , m_1 , m_2 – коэффициенты модели (Таблица 1).

Таблица 1

Термомеханические коэффициенты

Сталь	σ_1	σ_2	A_1	A_2	b_1	b_2	c	m_1	m_2
2пс С 0,05%	-4,20	12,91	5,51	-11,48	-1,23	2,19	-2,016	0,090	0,002
2пс С 0,15%	-4,33	12,86	5,02	-11,28	-1,46	2,60	-1,765	0,196	-0,125

Для верификации новой модели сопротивления деформации применительно к процессу прокатки использовали метод базисных давлений. На лабораторном стане ДУО 300 проведены прокатки заготовок размерами 30x160x200 мм из Ст2пс в два прохода. Размер заготовок выбирали таким образом, чтобы при прокатке обеспечить отношение длины очага деформации к средней толщине проката равным единице. Температурный диапазон составил 818-1146 °С при степенях деформации 0,13-0,22.

В ходе эксперимента реальные усилия прокатки сравнивали с расчетными значениями, которые были получены с использованием новой модели сопротивления деформации. Коэффициент детерминации сравнения составил 0,87. Полученные результаты внесли в АСУ стана 1950 ЛПК ВМЗ, что позволило уточнить энергосиловые параметры и расчёт составляющей профиля полосы, обусловленной изгибом рабочих валков.

Четвёртая глава посвящена исследованию коэффициента трения при горячей прокатке в чистовой группе клетей ЛПК (F1...F6 – порядковые обозначения чистовых клетей). В работе реализована методика определения коэффициента трения при установившемся процессе через опережение по следующему алгоритму:

1. Определение расстояния L между соседними клетями путём прямого измерения;

2. Расчёт времени T прохождения головного участка полосы от одной клетки к последующей, исходя из показаний сигнала наличия металла в очаге деформации, который формируется на основе измерений токовых нагрузок на привод и усилия прокатки;

3. Вычисление фактической скорости полосы v_1 как отношение расстояния L ко времени T ;

4. Вычисление опережения S через фактическую скорость полосы v_1 и окружную скорость рабочего валка v_0 ;

5. Вычисление угла захвата α через абсолютное обжатие Δh и диаметр рабочего валка D ;

6. Вычисление нейтрального угла γ через толщину на выходе из очага деформации h_1 и радиус рабочего валка R ;

7. Расчет коэффициента трения путём выделения μ из формулы Эжелунда. Общая блок-схема алгоритма продемонстрирована на Рисунке 2.

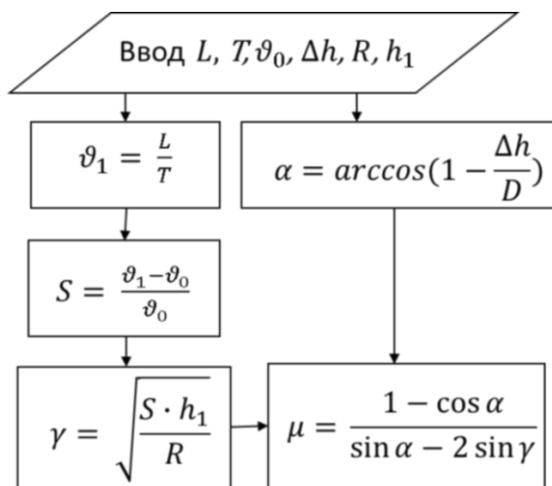


Рисунок 2. Блок-схема вычисления коэффициента трения через опережение

Реализация представленной методики автоматизирована и применена для более 14000 прокатанных в условиях стана 1950 ЛПК полос различного сортамента. В результате получен массив данных по параметрам прокатки каждого рулона и вычисленному коэффициенту трения при установившемся процессе. Стоит отметить, что метод опережения дает достаточно надежные значения коэффициента трения только при прокатке тонких полос, когда $l_d/h_{cp} > 3 \div 4$, так как в этом случае неравномерность деформации металла слабо выражена и влиянием участка заторможенной деформации можно пренебречь. В силу этого, представленный алгоритм применили только для чистой группы клеток стана-1950, где фактор формы находится в диапазоне $2 < l_d/h_{cp} < 10$.

На Рисунке 3 приведены гистограммы распределения значений коэффициента трения для 490 полос при установившемся процессе марки стали Ст2пс толщиной менее 1,5 мм для первой и пятой клетки чистой группы. Процесс прокатки представленного сортамента характеризуется высокой скоростью прокатки (до 10 м/с), то есть погрешность методики для тонких полос является наибольшей. Для клетки F1 распределение имеет небольшую дисперсию, достаточно чётко может быть определено среднее значение. Для клетки F5 дисперсия увеличивается, имеется характерный «хвост» в область повышенных значений, однако характер распределения позволяет использовать средние значения при наличии большого количества измерений.

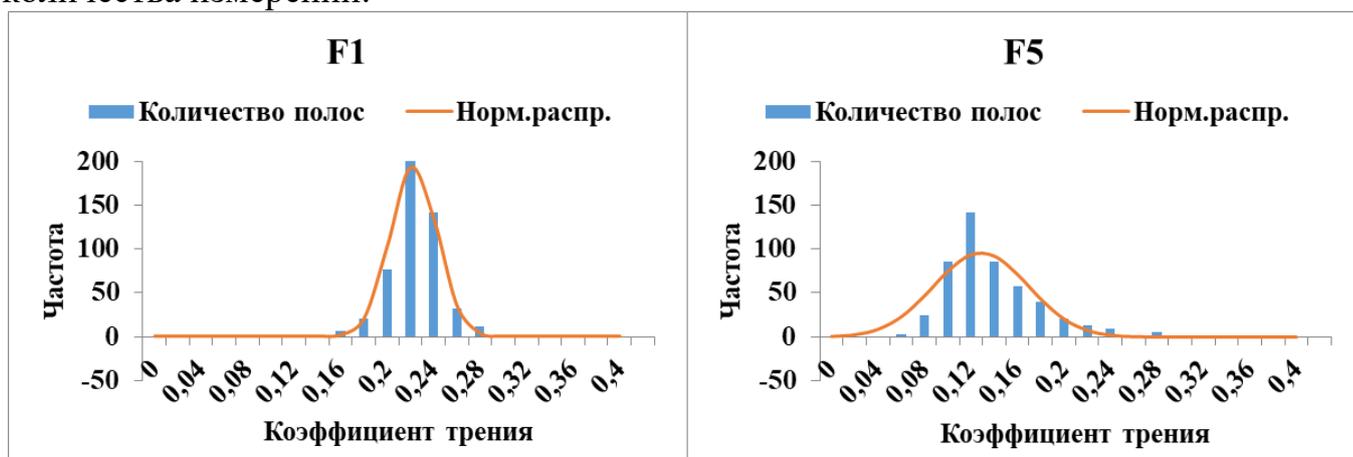


Рисунок 3. Графики распределения полученного значения коэффициента трения для клеток F1 и F5 чистой группы стана 1950 ЛПК

Средние значения коэффициентов трения по расчётам для трёх различных сортаментных позиций приведены в Таблице 2. Коэффициент трения снижается при переходе полосы в последующие клетки, кроме небольшого увеличения значения в F3. Это объясняется тем, что в чистой группе клеток используются разные типы рабочих валков где в F1-F2 используются валки с рабочим слоем из высокохромистого чугуна, в то время как для F3-F6 – валки с рабочим слоем из индифинитного чугуна. Исходя из результатов расчета следует, что рабочий слой из высокохромистого чугуна F1-F2 имеет более низкий коэффициент трения с полосой по сравнению с клетями F3-F5. Полученные значения коэффициента трения не противоречат литературным данным, при этом представленный метод позволяет уточнить параметры именно для исследуемых промышленных условий.

Таблица 2

Коэффициент трения μ при установившемся процессе в клетях чистой группы стана 1950 ЛПК при различных температуре, обжатии и скорости валков

Марка стали	Конечная толщина	Клеть	T, °C	ϵ	V, м/с	μ	STD(μ)
22ГЮ	8 мм	F1	986	0,45	0,75	0,32	0,04
		F2	958	0,36	1,08	0,23	0,02
		F3	930	0,32	1,48	0,26	0,04
		F4	905	0,21	1,88	0,22	0,04
		F5	881	0,18	2,24	0,19	0,05
06Г2Б	8 мм	F1	947	0,47	0,87	0,28	0,03
		F2	925	0,34	1,23	0,27	0,04
		F3	902	0,29	1,65	0,28	0,07
		F4	882	0,21	2,05	0,28	0,05
		F5	863	0,17	2,41	0,23	0,07
Ст2пс	1,3 мм	F1	957	0,94	1,01	0,21	0,02
		F2	914	0,74	2,08	0,17	0,01
		F3	871	0,59	3,63	0,17	0,02
		F4	840	0,36	5,39	0,18	0,05
		F5	817	0,31	7,50	0,12	0,04

Проведённый анализ данных по расчётному коэффициенту трения для чистовых клетей F1-F5 стана 1950 ЛПК показал, что наибольшее влияние на коэффициент трения оказывают скорость прокатки и величина обжатия (Рисунок 4). Значимого влияния температуры не установлено, вероятно из-за ограниченного температурного диапазона прокатки в чистой группе клетей ($\approx 817-986$ °C), особенно с учётом значительного влияния на коэффициент трения скорости прокатки.

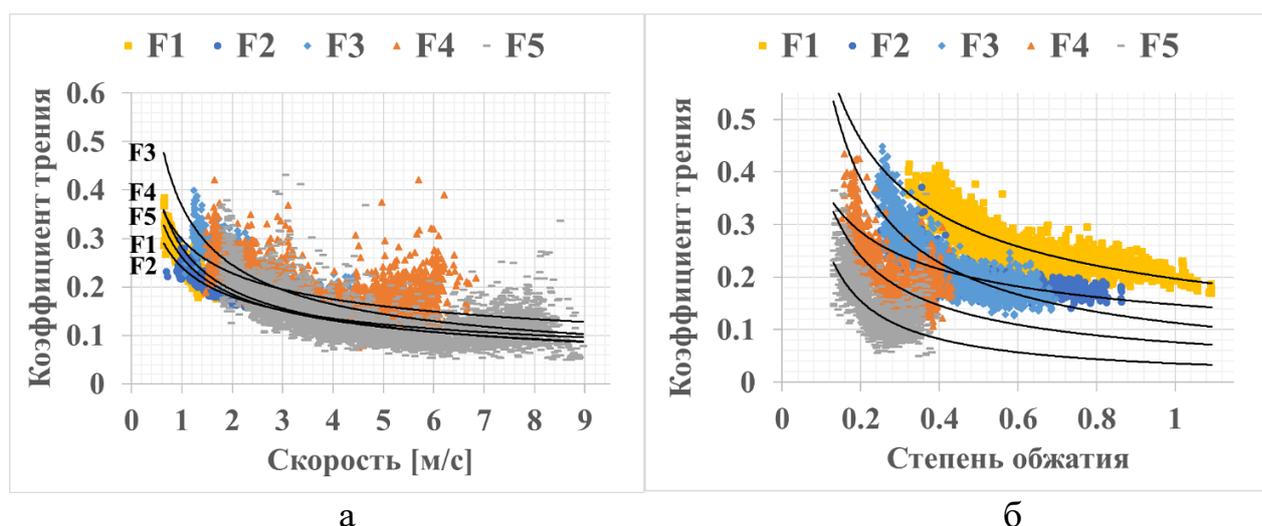


Рисунок 4. Зависимость коэффициента трения для каждой клетки F1-F5 а) от скорости; б) от степени деформации

Экспериментальные данные Целикова А.И., Полухина В.П., Кривенцова А.М. и др. демонстрируют влияние скорости прокатки V_B на коэффициент трения при

захвате металла валками $\mu_{\text{зах}}$ во время горячей прокатки. Обобщенные опытные данные можно описать с помощью единой кривой, характеризующейся следующим уравнением (1):

$$\mu_{\text{зах}} = \frac{0,43}{V_B^{0,225}} \quad (1)$$

Известно, что значение коэффициента трения при установившемся процессе ниже коэффициента трения при захвате. Сравнение результатов данного исследования с кривой уравнения (1) показало, что отношение коэффициента трения при захвате к коэффициенту трения при установившемся процессе $\frac{\mu_{\text{зах}}}{\mu_{\text{уст}}}$ по факту является не постоянной величиной и зависит от окружной скорости вала V_B . Для условий широкополосного стана предложена уточнённая формула расчёта этого отношения в следующем виде:

$$\frac{\mu_{\text{зах}}}{\mu_{\text{уст}}} = 1,5 \cdot V_B^{0,25}$$

В пятой главе представлены исследования термического расширения и механического износа рабочих валков в условиях стана горячей прокатки ЛПК. Для прогнозирования износа валков как правило применяют упрощенные инженерные формулы, в основном зависящие от длины прокатываемой полосы с некоторым коэффициентом, полученным экспериментальным путем. Расчётные значения износа по такой упрощённой модели постоянны для каждого участка вдоль длины рабочего вала, что довольно часто не совпадает с реальными значениями механического износа. Помимо этого, инженерные формулы не учитывают различия в износе между верхним и нижним рабочим валком (Рисунок 5).

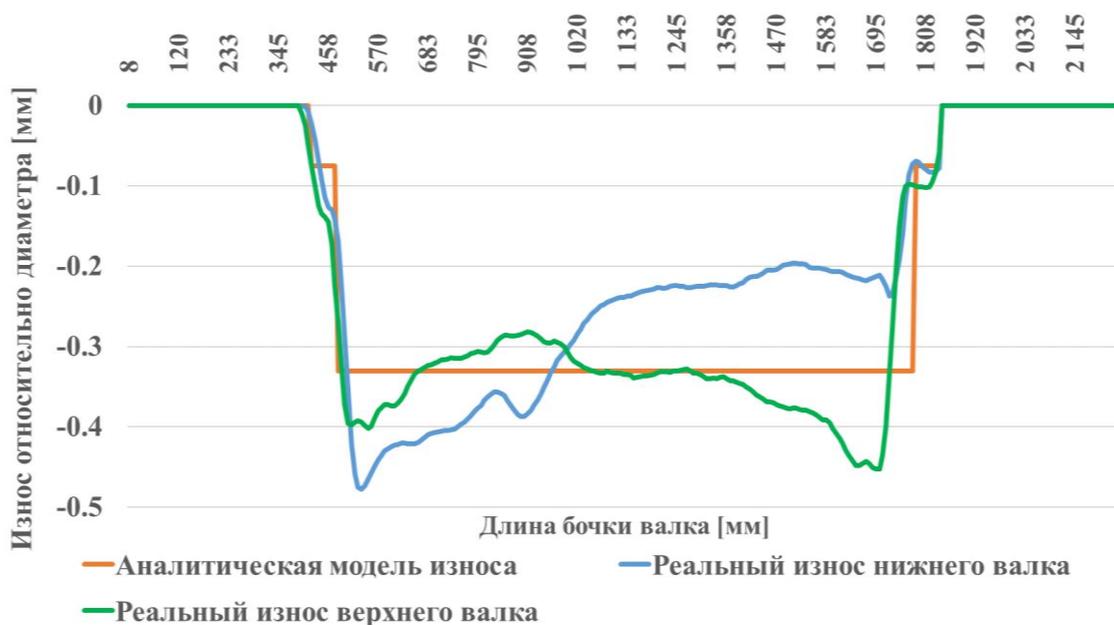


Рисунок 5. Сравнение расчетного и фактического износа для пары рабочих валков F3

Для анализа характера износа собраны данные по результатам переточек рабочих валков чистовой группы стана 1950 ЛПК. Величину износа для каждого валка получали на станках в вальцешлифовальной мастерской, в процессе замера перед шлифовкой. Подготовлен набор данных с базой накопительных технологических параметров производства более 100 000 полос и значениями механического износа, измеренного после различных прокатных кампаний перед 6500 операциями переточки рабочих валков.

Таким образом, формулируется задача численного прогнозирования целевой переменной (значение износа по 300 точкам по длине бочки рабочего валка), которую можно решить с помощью современных методов, основанных на использовании алгоритмов машинного обучения, которые позволяют максимально уточнить существующие физические и математические модели. Для решения поставленной задачи применены следующие алгоритмы: многомерная линейная регрессия, деревья решений, градиентный бустинг, искусственная нейронная сеть.

Входные независимые переменные предварительно подвергнуты статистической нормализации для приведения данных к одинаковой области значений. Для обучения моделей использовалась техника разделения генеральной совокупности данных на обучающую и тестовую выборку в соотношении 80/20. Сравнение моделей с фактическими измерениями демонстрирует довольно высокую точность прогнозирования механического износа валка на основе ранее описанных признаков. Средняя абсолютная ошибка расчёта износа по моделям машинного обучения более чем в 4 раза ниже, чем по традиционным линейным уравнениям (Таблица 3).

Таблица 3

Сравнение моделей механического износа в условиях стана 1950

Модель	Коэффициент детерминации (обучение)	Коэффициент детерминации (тест)	Средняя абсолютная ошибка [мм]	Среднеквадратичная ошибка [мм]
Линейная регрессия	0,67	0,63	0,03	0,0012
Случайный лес	0,92	0,75	0,02	0,0008
Градиентный бустинг	0,83	0,77	0,02	0,0007
Нейронная сеть	0,92	0,72	0,02	0,0011
Классика	-	-	0,09	0,0113

Сравнение статистических метрик модели по обучающей и тестовой выборке показало, что нейронная сеть и алгоритм случайного леса демонстрируют наибольшую степень переобучения ввиду отличия коэффициента детерминации для тестовой и обучающей выборки. Наиболее предпочтительнее в плане практического использования является модель машинного обучения, основанная на градиентном бустинге. При достаточной точности на обучающей и тестовой выборке, алгоритм быстро работает при расчетах, что является необходимым условием для внедрения алгоритма в АСУ стана 1950 ЛПК. Примеры сравнения графиков тестовой выборки и

прогноза модели, построенной на основе метода градиентного бустинга, представлены на Рисунке 6. Стоит отметить, что в течение кампании прокатки рабочих валков на стане 1950, производится различный сортамент по ширине и толщине полосы. В таких случаях, модель градиентного бустинга корректно учитывает количество прокатанных типоразмеров, что видно по наличию ступенек на кривой механического износа.

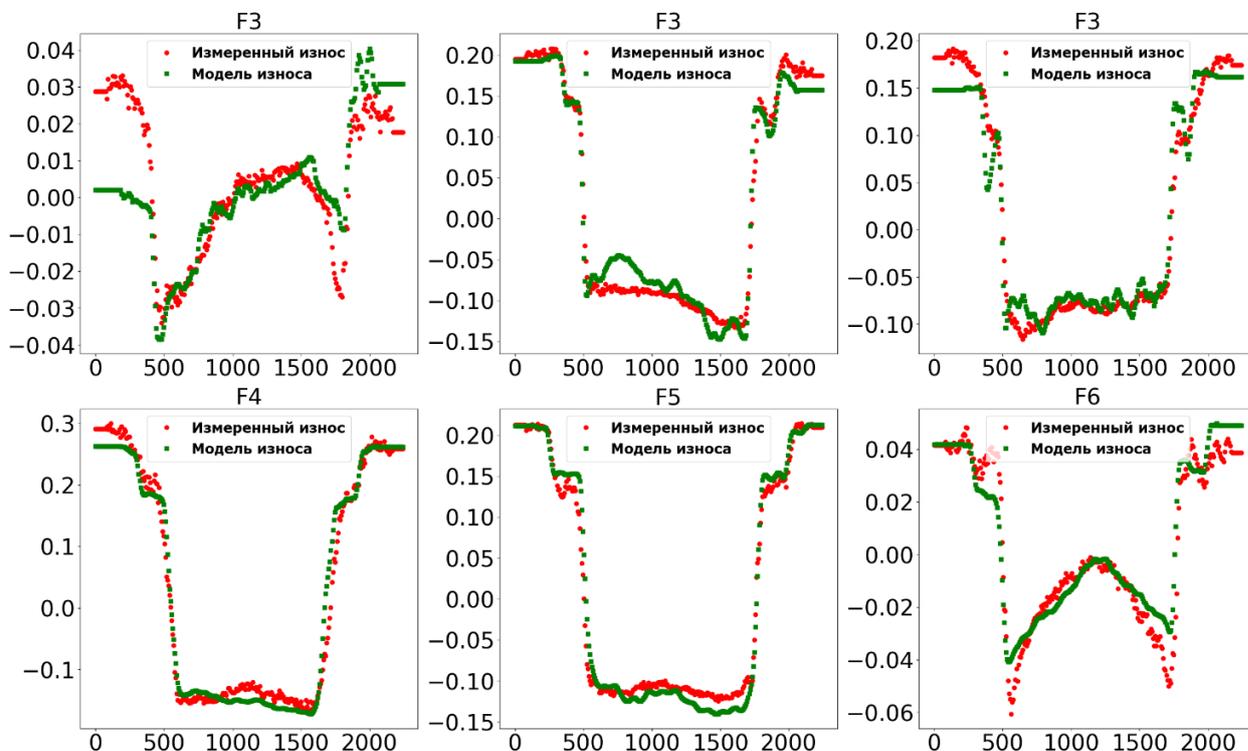


Рисунок 6. Сравнение реального износа с разработанной моделью градиентного бустинга для F3-F6 клеток.

Анализ по модели также показал, что наибольший износ наблюдается при прокатке узких полос (менее 1300 мм) и абсолютных обжатиях в диапазоне 2-4 мм. Анализ фактического износа указывает на диапазон значений усилия противоизгибов 1800-2400 КН, при которых возникают условия повышенного износа рабочих валков. Кроме того, на клетях чистовой группы средний механический износ верхних валков в среднем на 50% выше, чем нижних.

Учет интенсивности и характера механического износа каждой клетки помогает оптимально распределить нагрузки по чистовой группе клеток, тем самым увеличивается стойкость валков при продолжительном использовании в линии стана. Также подробная информация о текущем состоянии валков позволяет более гибко планировать время перевалки, в том числе возможна оптимизация времени данной операции за счет частичной смены рабочих валков в зависимости от текущего износа.

При расчете профиля межвалкового зазора необходимо также принимать во внимание неравномерное температурное расширение валков по длине, обусловленное локальным характером их разогрева, который происходит только в зоне контакта с прокатываемой полосой. Для расчёта температурного поля валка вся поверхность валка делилась на 8 участков с различными температурными

граничными условиями при использовании водяного охлаждения (Рисунок 7). Граничные условия, соответствующие технологическому режиму охлаждения (нагрева) и отражающие его прерывистый характер, выбирались в виде условий третьего рода на участках охлаждения водой (участки 2 и 5) и воздухом (участки 1,3,4,6) и в виде условий четвертого рода на контакте рабочего валка с прокатываемой полосой (участок ОД) и опорным валком (участок ОР). Для решения такой задачи необходимо использовать многомерные нестационарные уравнения теплопроводности с нелинейными коэффициентами. Универсальным и очень эффективным методом решения таких уравнений является метод конечных разностей или метод сеток.

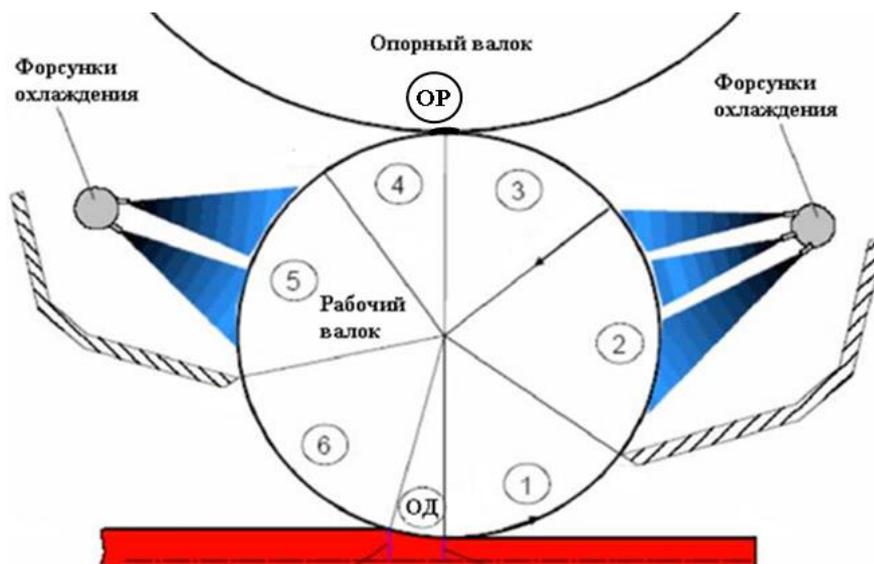


Рисунок 7. Основные участки поверхности рабочего валка с различными температурными граничными условиями

В ходе работы определены методические основы расчета температурного поля рабочего валка прокатного стана и базовые принципы работы модели термического расширения валков стана 1950 ЛПК в процессе эксплуатации, учитывающие стадии охлаждения и нагрева металла за один оборот валка и за одну кампанию. С целью верификации разработанной модели проведено опробование системы расчетов при промышленном производстве полос, причем прокатные кампании выбирались, исходя из условия существенного различия по сортаменту и длительности прокатки и пауз между ними. Экспериментальные данные по температуре поверхности рабочих валков получены путем измерения пирометром 60 валков в 7 точках после переделки. Время после окончания прокатки и замером температур валков составляло 6-8 минут.

Для повышения точности расчетов проведена адаптация модели, включающая уточнение коэффициентов теплоотдачи при охлаждении валков в непрерывной группе чистовых клетей, в соответствии с экспериментальными данными. Коэффициенты пропорциональности определялись методом Монте-Карло. После определения коэффициентов пропорциональности для всех серий замеров температур валков и клетей F1...F6 определялись медианы, которые приняты в качестве оценок коэффициентов пропорциональности.

По итогам адаптации модели средняя абсолютная ошибка результатов расчета от экспериментальных данных после вывалки составляет 1,5 °С. Таким образом, ошибка в расчете профиля рабочего валка в среднем составляет 0,014 мм, что характеризует высокую точность работы температурной модели, достаточную для практического применения в условиях стана 1950 ЛПК.

Шестая глава посвящена внедрению результатов исследования в технологический процесс стана горячей прокатки 1950 ЛПК ВМЗ. Полученные модели последовательно внедрены в АСУ стана в период 2019-2021 гг. и объединены в экспертную систему поддержки производства тонкого металлопроката, с помощью которой проводятся все предварительные расчеты режимов прокатки. На первом этапе алгоритм проводит расчеты текущего профиля валка на основе предварительного расчёта усилия прокатки, контактного смятия валков, теплового профиля и механического износа. Далее, оценивается стрела прогиба рабочего валка и, с учетом профиля полосы с предыдущей клетки, производится оценка соответствия профиля валка и профиля полосы после обжатия. В результате система применяет корректировку усилия гидравлического изгиба рабочего валка для улучшения планшетности. Общая блок-схема разработанной экспертной системы поддержки производства представлена на Рисунке 8. На блок-схеме оранжевым отмечены новые модели, полученные в рамках настоящей работы, белым - ранее известные модели и расчётные методики (точность которых достаточная для достижения положительного результата по планшетности), зелёным - выходной параметр системы.

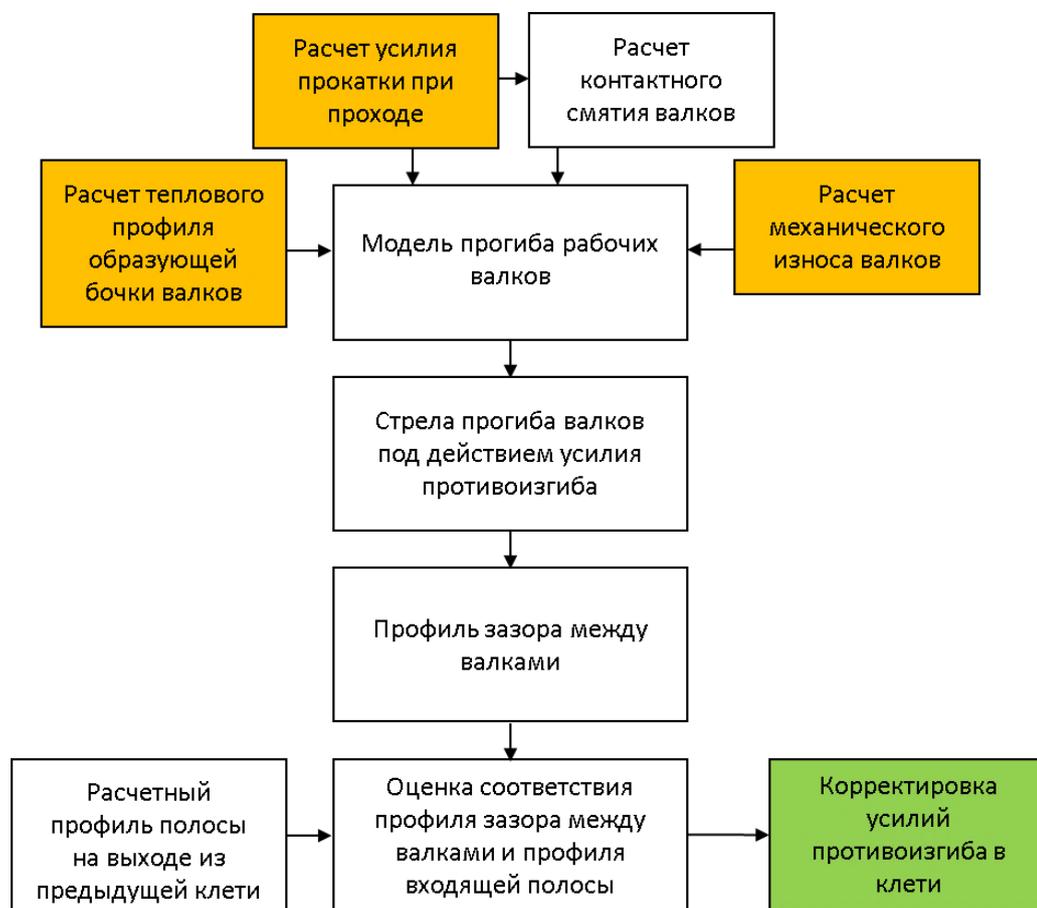


Рисунок 8. Блок-схема экспертной системы поддержки производства

С применением разработанных моделей и использованием рекомендаций экспертной системы поддержки производства произведено 215 тысяч тонн тонкой полосы в условиях стана 1950 ЛПК ВМЗ. Даже с учетом возрастающих объемов производства тонкой полосы в период 2018-2021 гг. удалось более чем в 3 раза снизить количество аварийных остановок по причине сильных отклонений по геометрическим параметрам в процессе прокатки.

Оценка влияния полученных в настоящей работе моделей на качество тонкой полосы проведена по значению расходного коэффициента металла, так как вырезка дефектных участков тонкой полосы в большинстве случаев происходит из-за отклонений по планшетности. После внедрения результатов работы отмечено снижение величины отклонения от планшетности на 33%, расходный коэффициент последовательно снижен на 11 кг/т в 2021 году по сравнению с 2018 годом (Рисунок 9), что при объёме производства 50 тысяч тонн в год соответствует в среднем 550 тоннам дополнительного годного металла. Подтвержденный экономический эффект составил 7,56 млн. руб.

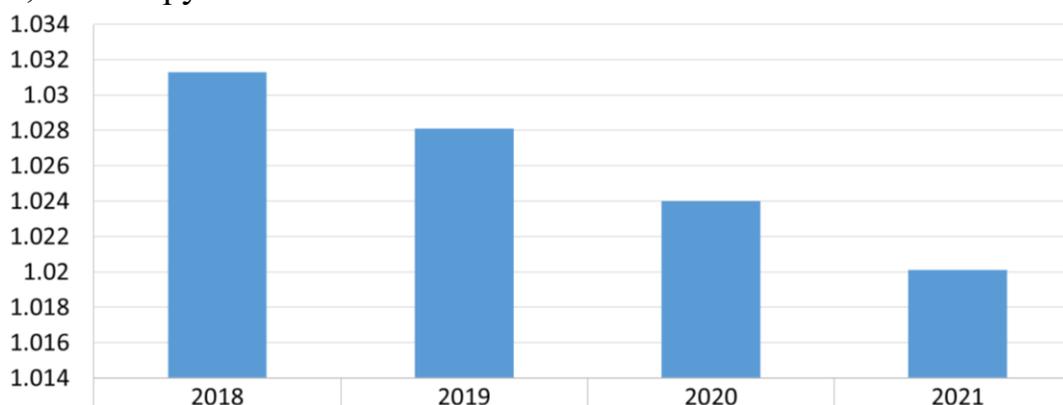


Рисунок 9. Изменение расходного коэффициента металла с 2018 по 2021 год для марки Ст2пс

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведённый анализ показал, что наиболее влияющими на планшетность факторами являются изгиб валков, трение, износ и термическое расширение. При этом для определения изгиба требуется уточнение расчёта усилия прокатки и сопротивления деформации прокатываемой стали. Для определения сопротивления деформации эффективно физическое моделирование. Задачи уточнения коэффициента трения и прогнозирования износа целесообразно решать методами машинного обучения на основе обработки больших массивов технологических параметров. Температурную задачу для рабочего валка – методом конечных разностей.

2. Выполнено исследование сопротивления деформации сталей 2пс с различным содержанием углерода (0,05% и 0,15%) при температуре 700 – 1200 °С и скорости деформации 0,1 - 10 сек⁻¹. На основании экспериментальных данных разработана новая модель сопротивления деформации, отличающаяся учетом взаимного влияния параметров деформации на коэффициенты модели. Коэффициент детерминации модели при описании экспериментальных данных составляет 0,986. Модель проверена для условий прокатки на лабораторном стане ДУО 300. Точность расчёта

усилия прокатки с полученными данными сопротивления деформации при прокатке составила $R2 = 0,87$.

3. Разработан алгоритм определения коэффициента трения при установившемся процессе с использованием фактических измерений в условиях промышленного стана. Получено свыше 100 000 экспериментальных значений по различным маркам сталей и параметрам прокатки для температурного диапазона 817-986 °С, степени обжатия 0,17-0,94 и окружной скорости валков 0,5-8,0 м/с. Определены значения коэффициента трения, которые находятся в диапазоне 0,12-0,32 (в зависимости от параметров деформации в проходе). Предложена уточнённая формула зависимости между коэффициентом трения при захвате и при установившемся процессе для непрерывных широкополосных станов. Установлено, что их отношение зависит от окружной скорости валков при прокатке следующим образом:

$$\frac{\mu_{\text{зах}}}{\mu_{\text{уст}}} = 1,5 \cdot V_B^{0,25}$$

4. Разработана математическая модель износа рабочих валков в 300 точках по длине бочки, где исходными данными для модели являлись измерения профиля 6500 валков после кампаний, а также 93 параметра горячей прокатки более 100000 полос, произведенных за 3 года. Модель построена с помощью методов машинного обучения, таких как разновидности решающих деревьев, множественная регрессия и нейронные сети. Максимальная точность среди исследуемых методов достигнута в модели градиентного бустинга с коэффициентом детерминации $R2 = 0,77$ и средней абсолютной ошибкой $MAE = 0,02$ мм. Наибольший износ наблюдается при прокатке узких полос (менее 1300 мм) и абсолютных обжатиях в диапазоне 2-4 мм. Анализ фактического износа указывает на диапазон значений усилия противоизгибов 1800-2400 КН, при которых возникают условия повышенного износа рабочих валков. На клетях чистовой группы средний механический износ верхних валков в среднем на 50% выше, чем нижних.

5. Разработана конечно-разностная модель температуры рабочего валка для расчета термического расширения и профиля. Модель адаптирована по фактическим данным измерения температуры 60 валков в 7 точках по длине бочки. Средняя абсолютная ошибка модели по температуре составляет 1,5 °С, что позволяет добиться среднего отклонения расчета термического расширения по диаметру рабочего валка не более чем 0,014 мм.

6. Разработана экспертная система поддержки производства, включающая в себя описанные в настоящей работе модели. С применением результатов представленной работы произведено более 215 тысяч тонн тонкой полосы (толщина менее 1,5 мм) в условиях стана 1950 ЛПК ВМЗ. Разработанные алгоритмы внедрены в систему автоматизации, что позволяет улучшить показатели планшетности при производстве тонкой полосы. Применение новых моделей, разработанных в рамках диссертационной работы, позволило снизить количество аварийных остановок при прокатке тонкой полосы в 3 раза. Удалось уменьшить количество симметричных дефектов планшетности на 33%, асимметричных на 17%, что привело к снижению расходного коэффициента металла на 11 кг/т. Подтвержденный экономический эффект от внедрения – 7,56 млн. руб.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Способ производства особо тонких горячекатаных полос на широкополосном стане литейно-прокатного комплекса: патент 2679159 РФ / Ерыгин В.А., Мунтин А.В., Севидов А.Е., Азин Р.Ю. [и др.]; заявл. 07.03.2018; опубл. 06.02.2019. Бюлл. №4.
2. Анализ технологических факторов обеспечения плоскостности при прокатке ультратонкой горячекатаной полосы на широкополосном стане 1950 АО «Выксунский металлургический завод» / Севидов А.Е. [и др.] // Производство проката, 2019. №7. С.4-13. (0,63 п. л. / 0,2 п. л.)
3. Севидов А.Е. Разработка и внедрение экспертной системы оценки профиля рабочих валков на стане горячей прокатки ЛПК // Сборник докладов 13-ой научно-практической конференции молодых специалистов ОМК. Выкса, 2020. С. 27-28. (0,13 п. л. / 0,13 п. л.)
4. Анализ особенностей износа рабочих валков чистовой группы клетей в условиях стана 1950 ЛПК АО «ВМЗ» / Севидов А.Е. [и др.] // Металлург. 2021. № 3. С. 57-62. (0,38 п. л. / 0,06 п. л.)
5. Sevidov A. E., Muntin A. V. Determination of the friction coefficient during hot strip rolling under industrial condition using forward slip // METAL 2021 - 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. Brno, 2021. P. 299-305. (0,44 п. л. / 0,32 п. л.)
6. Севидов А.Е., Мунтин А.В., Румянцев А.В. Исследование коэффициента трения при установившемся процессе непрерывной горячей прокатки стальных полос в условиях промышленного стана 1950 // Черные металлы. 2021. № 9. С. 29-35. (0,44 п. л. / 0,22 п. л.)
7. Севидов А.Е., Мунтин А.В., Колесников А.Г. Моделирование механического износа рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки методами машинного обучения // Черные металлы. 2022. № 11. С. 22-27. (0,38 п. л. / 0,26 п. л.)