

*На правах рукописи*



ЧЕРНОМЫРДИН Василий Игорьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДЛЯ  
СТАБИЛИЗАЦИИ ТОЛЩИНЫ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПОЛОС НА  
КОНЦЕВЫХ УЧАСТКАХ ПРИ ПРОКАТКЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
СТАЛЕЙ

Специальность 2.6.4 – "Обработка металлов давлением"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

Научный руководитель: кандидат технических наук, и.о. директора  
Дирекции технической поддержки и развития  
продаж ПАО «НЛМК»  
Дегтев Сергей Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры  
«Обработка материалов давлением и аддитивные  
технологии», Федеральное государственное  
автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Московский политехнический  
университет»  
Шаталов Роман Львович

кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Металлургические машины и оборудование»,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Череповецкий государственный  
университет»  
Шалаевский Дмитрий Леонидович

Ведущая организация:  
Государственный научный центр ФГУП «ЦНИИчермет» им. И.П. Бардина

Защита диссертации состоится 22 апреля 2026 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.078.02 (Д002.060.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, БКЗ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН, а также на официальном сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru/> и на сайте ВАК РФ <https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, Диссертационный совет 24.1.078.02 (Д002.060.02). Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: [andreev.imet.dis@mail.ru](mailto:andreev.imet.dis@mail.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Андреев В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Современные электротехнические стали, которые являются премиальным продуктом, кроме определенного уровня магнитных и механических свойств и качественных характеристик по классу плоскостности, должны удовлетворять более высоким требованиям по продольной разнотолщинности по сравнению с нормируемыми пределами, указанными в стандартах ГОСТ 21427.2-83, ГОСТ 33212-2014, EN10106-2015. Эти стандарты регламентируют предельные отклонения по толщине проката: для нормальной точности  $\pm 0,04$  мм и для повышенной  $\pm 0,03$  мм. В спецификациях на поставку продукции заказчики отдельно устанавливают дополнительные требования к точности по толщине холоднокатаных полос, а именно, разнотолщинность по длине, измеренная вдоль продольной оси проката, не должна превышать  $\pm 0,02$  мм для номинальной толщины 0,50 мм.

Как показывает практика, толщина концевых участков холоднокатаных полос выходит за пределы допусков, причём длина этих участков может достигать 60–100 м в зависимости от группы легирования. Широко распространённым методом снижения разнотолщинности остаётся их обрезка, которая приводит к существенным материальным потерям.

Поэтому вопросы разработки эффективных методов регулирования толщины полосы при прокатке концевых участков электротехнических марок сталей на нестационарных стадиях процесса применительно к современным действующим станам холодной прокатки остаются актуальными.

### **Степень разработанности темы исследования**

При заправке и выпуске холоднокатаных полос на низких скоростях, при отсутствии соответственно переднего и заднего натяжения, за счёт давления валков из очага деформации выдавливается смазка, что увеличивает коэффициент трения между полосой и рабочими валками. Персонал станов холодной прокатки вынужден увеличивать предварительное нагружение клетей для достижения номинальной толщины. Это приводит к значительной деформации рабочих валков, и, как следствие, к неконтролируемому изменению толщины с риском травмирования инструмента.

Исследованию процесса формирования продольной разнотолщинности холоднокатаных полос и решению вопросов ее снижения посвящено большое число теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых представлены в работах И.М. Павлова, А.И. Целикова, А.И. Трайно,

Ю.Д. Железнова, Л.А. Кузнецова, А.П. Долматова, А.Н. Абрамова и многих других. Тем не менее, остаётся нерешённой проблема регулирования толщины концевых участков, которые обрабатываются на нестационарных режимах (заправка-разгон и торможение-выпуск). Во многих исследованиях отсутствует чёткое разделение стадий прокатки на стационарные и нестационарные, существенно отличающихся по условиям деформации.

**Цель работы** заключается в изучении и разработке режимов холодной прокатки в нестационарных стадиях процесса, позволяющих снизить длину обрезаемых концевых участков полос с продольной разнотолщинностью более  $+0,02$  мм и, соответственно, снизить расходный коэффициент.

Для достижения цели диссертационной работы поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ современной научно-технической литературы и выполнить патентный поиск по вопросам формирования толщины на концевых участках полос при холодной прокатке на непрерывных станах.

2. Выполнить экспериментальные исследования изменения толщины по длине полос электротехнической изотропной (ЭИС) и анизотропной (ЭАС) сталей и основных параметров прокатки на непрерывном четырехклетевом стане 1400 на различных стадиях технологического процесса без целенаправленного регулирования его параметров.

3. Исследовать влияние режимов холодной прокатки и толщины горячекатаного проката на формирование толщины холоднокатаных полос в нестационарных стадиях процесса.

4. Разработать математические модели формирования толщины полосы при прокатке на непрерывном четырехклетевом стане с учетом временных задержек регулирующих воздействий (усилие прокатки в клетях, удельное натяжение и скорость полосы) с использованием аналитического и эмпирического методов.

5. Разработать алгоритмический подход для прокатки концевых участков холоднокатаных полос на стане 1400, предусматривающий получение оптимальных режимов с использованием алгоритма регулирования толщины в 1-й и 4-й клетях, а также проведение верификации результатов с применением конечно-элементного анализа в среде QForm,

6. Апробировать в промышленных условиях цеха динамной стали (ЦДС) ПАО «НЛМК» режимы холодной прокатки, обеспечивающие достижение заданного уровня продольной разнотолщинности  $+0,02$  мм при минимальных производственных издержках.

### **Научная новизна.**

1. Установлены закономерности образования повышенной продольной разнотолщинности (утолщений более  $+0,02$  мм) на концевых участках полос электротехнических сталей. Показано, что на нестационарных стадиях процесса (заправка-разгон, торможение-выпуск) без автоматического регулирования толщины формируются утолщенные участки полосы значительной длины: для стадий заправки-разгона — 18–40 м, торможения-выпуска — 12–50 м

2. Впервые для электротехнических сталей определена обратная зависимость толщины полосы от основных технологических параметров прокатки (обжатие, удельное натяжение, скорость) с учетом временных задержек управляющих воздействий.

3. Разработан алгоритмический подход для управления толщиной концевых участков холоднокатаных полос, основанный на прогнозировании изменения толщины после первой и последней клетях с учетом временных задержек, расчете регулирующих воздействий, а также их верификации посредством численного моделирования методом конечных элементов в программном модуле QForm.

### **Практическая значимость работы.**

1. Построены регрессионные уравнения для управления толщиной полос ЭИС и ЭАС с учетом временной задержки при коррекции параметров прокатки (усилия, удельного натяжения и скорости прокатки).

2. Рассчитаны режимы холодной прокатки полос на нестационарных стадиях процесса: заправка, разгон до момента включения САРТ, торможение с момента отключения САРТ до скорости выпуска полосы, выпуск полосы, обеспечивающие снижение продольной разнотолщинности до уровня  $+0,02$  мм и длины концевых участков полос ЭИС 2-4 групп легирования и ЭАС с 0,9% (45м) до 0,28% (15 м) от длины рулона.

3. Разработанные технологические режимы позволяют исключить операцию подготовки холоднокатаных полос на агрегате подготовки холоднокатаных рулонов для полос ЭТС. Таким образом достигнуто снижение расходного коэффициента на 3,5 кг/т для ЭИС полос и на 1,2 кг/т для ЭАС полос.

4. Полученные в диссертации практические результаты формирования продольной разнотолщинности концевых участков холоднокатаных полос с учетом временных задержек могут быть использованы при оптимизации режимов холодной прокатки на аналогичных станах других металлургических

предприятий.

5. Плановый годовой экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы и реализации разработанных режимов в ПАО «НЛМК» составляет 20 млн. руб.

### **Методология и методы исследования**

Экспериментальные исследования проведены в промышленных условиях на непрерывном четырехклетевом стане 1400 ЦДС ПАО «НЛМК».

Измерения параметров прокатки осуществлялось при помощи приборов в линии стана. Усилие прокатки измеряли с помощью тензометрического датчика KELK L1535-1B, удельное натяжение полосы - тензометрическим роликом KELK D1097-1, скорость прокатки – импульсным датчиком, толщину радионуклидным толщиномером FN46. При построении регрессионных уравнений зависимостей толщины полосы от параметров прокатки использовали метод наименьших квадратов и программное обеспечение MiniTab, для числового моделирования процесса прокатки - QForm.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Выявлены закономерности формирования продольной разнотолщинности (утолщений более +0,02 мм) по длине концевых участков полос ЭИС и ЭАС. Данные участки соответствуют нестационарным стадиям процесса прокатки: заправка, разгон до момента включения САРТ, торможение с момента отключения САРТ до скорости выпуска полосы, выпуск полосы.

2. Влияние основных параметров прокатки (усилия прокатки и удельного натяжения) в зависимости от скорости прокатки полосы на формирование ее толщины при нестационарных стадиях процесса в первой и последней клетях непрерывного стана 1400 с учетом временной задержки регулирующих воздействий. Установлена и количественно оценена временная задержка влияния технологических факторов холодной прокатки на изменение толщины, которая составляет 0,5 – 3,5 с.

3. Разработан алгоритмический подход регулирования продольного профиля полосы на концевых участках. С его помощью рассчитаны и верифицированы режимы прокатки для нестационарных стадий процесса, обеспечивающие снижение длины утолщенных концевых участков полос ЭТС.

### **Степень достоверности полученных результатов**

Разработанные режимы прокатки утолщённых концевых участков полос электротехнических сталей, основанные на корректировке распределения

обжатий и изменении натяжения при заданных скоростях прокатки, прошли верификацию с помощью имитационного моделирования в среде QForm. Достоверность полученных результатов подтверждена промышленными испытаниями на стане 1400 «НЛМК». Разработанные режимы внедрены в программный модуль системы управления станом 1400 ЦДС и применяются при прокатке утолщенных концевых участков полос.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на XIII и XIV Международных конгрессах прокатчиков (Москва, 2023 г. и Череповец, 2024 г.), на 23-й научно-технической конференция «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения» (Москва, 2024 г.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертации.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, 1 приложения, изложена на 147 страницах машинописного текста и содержит 57 рисунков, 21 таблица, библиографический список из 82 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и научная новизна диссертации, отмечена научная и практическая ценность результатов исследований.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ представлены результаты анализа научно-технической литературы, посвященной проблемам формирования толщины холоднокатаных полос в нестационарных стадиях процесса прокатки.

На основе литературных данных изучено влияние основных параметров прокатки (усилие в клети, удельное натяжение полосы, скорость полосы) на толщину холоднокатаных полос.

Несмотря на большое количество работ и достоинств различных способов, позволяющих повысить эффективность процесса прокатки и улучшить качество холоднокатаных полос, проблема минимизации длины концевых участков полос с толщиной вне поля допусков на нестационарных стадиях прокатки до сих пор не решена.

В свою очередь, нестационарные стадии также следует разделять на отдельные, связанные с различными значениями изменения скорости и условий деформации, подпроцессы: заправки полос в стан; разгона (ускорения полос); торможения (замедления) и выпуска полос из стана. И в каждом подпроцессе, как правило, не учитывается существующая разница во времени начала изменения деформаций (обжатий) и начала изменения регулирующих воздействий на толщину полос по клетям стана. Другими словами, изменение толщины полосы из-за динамики процесса, то есть из-за изменения условий деформаций вследствие изменения скорости прокатки (ускорение или замедление) опережает изменение толщины от прикладываемых регулирующих воздействий. Возникает сдвиг во времени, так называемая, временная задержка по влиянию на толщину этих регулирующих воздействий (усилия и скорости прокатки, натяжения полосы).

Выполненный анализ научно-технической литературы позволил установить, что в настоящее время отсутствуют научно обоснованные методы холодной прокатки, позволяющие минимизировать длину концевых участков полос электротехнических сталей с толщиной, выходящей за пределы допусков. Выделены ключевые технологические факторы, влияющие на разнотолщинность этих участков, исследованы их диапазоны, в которых требуется обеспечить необходимый уровень продольной разнотолщинности полосы. Отмечен недостаток комплексных сведений о влиянии этих факторов на толщину полосы на всех стадиях процесса прокатки.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ приведена методика и результаты исследований распределения толщины полос ЭИС и ЭАС по их длине и соответствующих изменений во времени (по длине полос) параметров прокатки на непрерывном четырехклетевом клетевом стане 1400 ЦДС.

Исследования проводили на основном сортаменте, обрабатываемом на стане 1400 ЦДС: ЭИС 2-4 групп легирования в объеме 16 483 т и ЭАС в объеме 6 756 т.

Стан 1400 ЦДС имеет следующие основные характеристики: ширина прокатываемых полос 750-1250 мм; входная толщина проката 1,6-3,5 мм; выходная толщина полосы 0,35-1,0 мм; максимальная скорость прокатки 900 м/мин; диаметр рабочих валков 400/440 мм; диаметр опорных валков 1300/1400 мм; длина бочки валков 1400 мм; максимальное усилие прокатки 26 МН; максимальное натяжение полосы на разматывателе/моталке 91/92 кН; максимальное натяжение полосы в межклетевых промежутках 300 кН; усилие изгиба-противоизгиба 640 кН; средний модуль жесткости рабочих клеток 5,7 Н/мм. Стан оснащен: САРН (система

автоматического регулирования натяжений); САРТ (система автоматического регулирования толщины); САРС (система автоматического регулирования скорости); САУ ГНУ (система автоматического управления гидронажимным устройством).

Толщину полосы измеряли на входе и выходе первой и четвертой клетей стана радиий-изотопными толщиномерами (диапазон измерения 0-4,0 мм, погрешность  $\pm 0,25$  %). Усилие прокатки - тензометрическим датчиком (диапазон изменения 0-16 МН, погрешность  $\leq 1\%$ ), натяжение – тензометрическим роликом (тензометр натяжения) с диапазоном 0-300 кН и погрешностью  $\leq 1\%$ . Усилие нажима ГНУ - с помощью тензометрических датчиков, установленных между подушкой верхнего опорного вала и плунжером гидроцилиндра со стороны привода ( $P_i^п$ ) и обслуживания ( $P_i^о$ ).

Из результатов наблюдений для анализа сформировали два специальных массива данных из обработанных полос для каждой из исследуемых сортаментных групп металла: массив для участка заправки, разгона до момента включения САРТ, торможения с момента отключения САРТ до скорости выпуска полосы и выпуск полосы. Дальнейшие расчеты и анализ результатов выполнены отдельно для каждого из выделенных массивов данных по методике, включающей отсев грубых погрешностей, проверку соответствия эмпирического распределения данных закону нормального распределения, расчет статистических характеристик.

Допуски, предъявляемые к толщине полос после прокатки на стане 1400 для исследуемых сортаментных групп представлены в таблице 1.

Таблица 1. Предельные отклонения по толщине проката в соответствии с нормативной документацией

№ п/п	Тип стали	Толщина полосы, мм	Предельные отклонения по толщине проката, мм	Примечание
1	ЭИС	0,50	$\pm 0,04$ (норм. точность) $\pm 0,03$ (повыш. точность)	Требование ГОСТ 21427.2
2			8% от толщины полосы ( $\pm 0,04$ )	Требование EN10106 (ГОСТ 33212-2014)
3			$\pm 0,02$	Перспективные требования заказчиков стали (спецификации)
4	ЭАС	0,70	$\pm 0,02$	Требования к толщине после первой прокатки на стане 1400 при назначении на конечную толщину 0,27; 0,30; 0,35 мм
5	ЭИС	0,50	+0,30	Внутренние требования ПАО «НЛМК» к концевым участкам полос, регламентированные нормативами расхода металла и контрактными возможностями агрегатов непрерывного отжига (АНО)
6	ЭАС	0,70		

Исследование изменения толщины и параметров прокатки по длине полос

Результаты исследования позволили установить характер изменения толщины и параметров прокатки на четырехклетевом стане 1400 по длине полос ЭИС 2-4 групп легирования и ЭАС.

Для примера на рис.1 представлено изменение толщины по длине полосы ЭИС 2-й группы легирования в зависимости от скорости прокатки в 4-й клетки. Подобные изменения толщины полос наблюдаются для ЭИС 3-4 групп легирования и ЭАС.

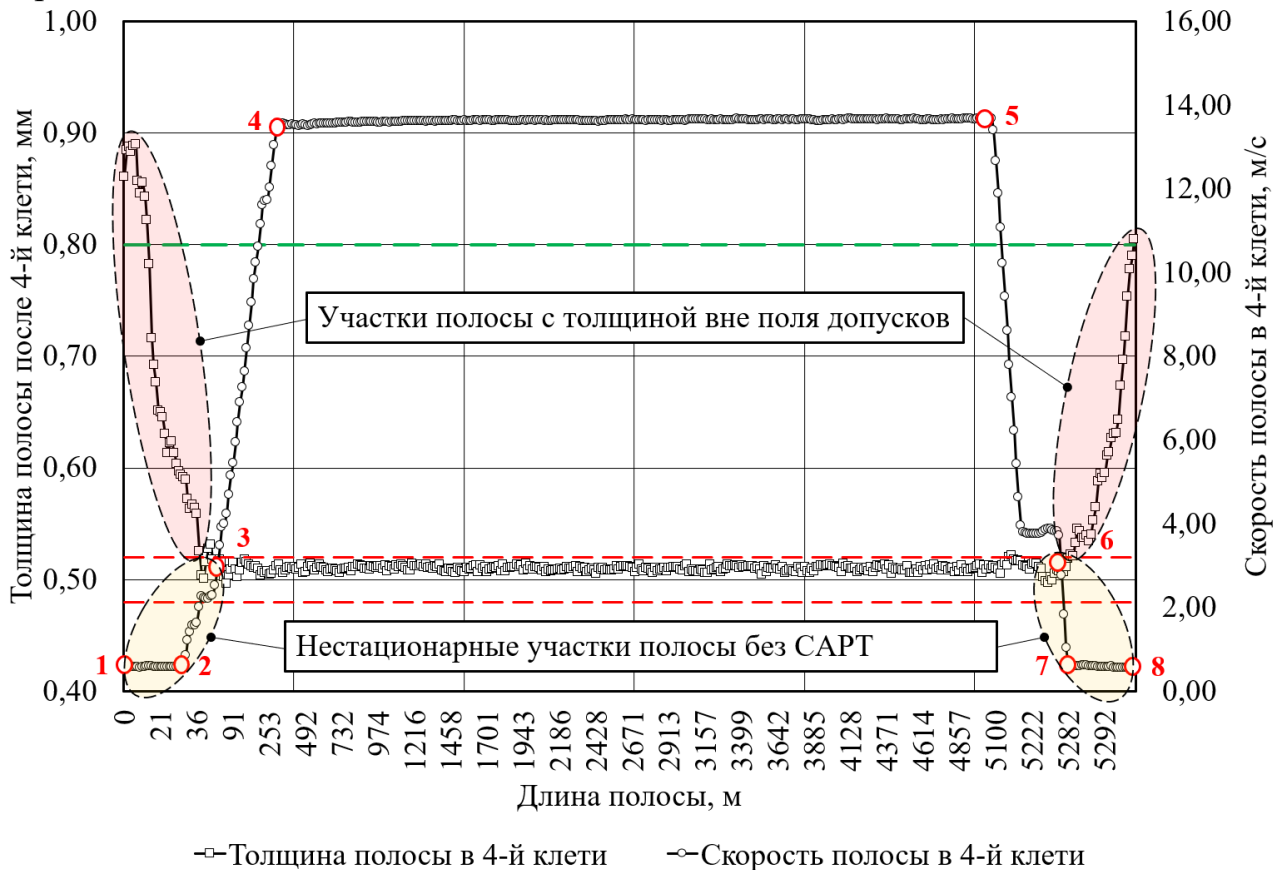


Рис.1. Толщина полосы за 4-й клетью и скорость при прокатке ЭИС 2 группы легирования на стане 1400, где «—» - допуск по требованиям заказчиков ( $\pm 0,02$  мм);

«—» - допуск по внутренним требованиям ПАО «НЛМК» ( $+0,30$  мм)

Стадии прокатки полос: 1-2 – заправка полосы; 2-3 - разгон до момента включения САРТ;

3-4 - разгон от момента включения САРТ до достижения рабочей скорости;

4-5 - прокатка на рабочей скорости (установившийся процесс); 5-6 торможение от рабочей скорости до момента отключения САРТ; 6-7 - торможение от момента выключения САРТ до выпуска полосы; 7-8 – выпуск полосы

Подтверждено, что по длине полос имеются участки с толщиной вне поля допусков по продольной разнотолщинности. Данные участки соответствуют нестационарным стадиям процесса прокатки: заправка, разгон до момента включения САРТ, торможение с момента отключения САРТ до скорости выпуска полосы и выпуск полосы.

Суммарная длина переднего и заднего концевых участков полос вне поля допусков по толщине (п. 3, 4 табл.1) составляет 30-50 м в зависимости от сортаментной подгруппы.

Для большинства исследуемых полос ЭИС 2-4 групп легирования и ЭАС концевые участки по толщине выходят за пределы, приведенные в п. 5, 6 таблицы 1. Статистические оценки длин некондиционных участков полос всех исследуемых сортаментных групп металла представлены в таблице 2.

Таблица 2. Статистические оценки толщины и длины участков полос с толщиной вне поля допусков

Тип стали	$h_1, \text{мм}$		$h_2, \text{мм}$		$l_1, \text{м}$		$l_2, \text{м}$		$l_{\Sigma}, \text{м}$		L, м	$\Delta_1, \%$	$\Delta_2, \%$	$\Delta_{\Sigma}, \%$
	$\frac{\text{Ср.}}{R}$	СКО	$\frac{\text{Ср.}}{R}$	СКО	$\frac{\text{Ср.}}{R}$	СКО	$\frac{\text{Ср.}}{R}$	СКО	$\frac{\text{Ср.}}{R}$	СКО				
ЭИС 2-й группы легирования	$\frac{0,65}{0,37}$	0,13	$\frac{0,60}{0,30}$	0,09	$\frac{18,6}{39,3}$	16,91	$\frac{12,1}{35,9}$	13,58	$\frac{31,6}{66,1}$	22,66	4998-5225	0,37-0,36	0,24-0,23	0,63-0,60
ЭИС 3-й группы легирования	$\frac{0,65}{0,43}$	0,15	$\frac{0,63}{0,34}$	0,11	$\frac{22,2}{45,6}$	21,49	$\frac{18,7}{49,8}$	16,40	$\frac{42,9}{87,4}$	27,31	4656-5009	0,48-0,44	0,40-0,37	0,92-0,86
ЭИС 4-й группы легирования	$\frac{0,67}{0,38}$	0,16	$\frac{0,65}{0,30}$	0,12	$\frac{24,5}{55,0}$	18,13	$\frac{21,1}{53,7}$	17,94	$\frac{47,95}{96,2}$	26,72	4606-5082	0,53-0,48	0,46-0,42	1,04-0,94
ЭАС	$\frac{0,83}{0,43}$	0,11	$\frac{0,74}{0,22}$	0,08	$\frac{21,1}{40,8}$	14,96	$\frac{18,3}{41,7}$	19,34	$\frac{39,4}{76,2}$	25,63	3372-3715	0,63-0,57	0,54-0,49	1,17-1,06

Примечание:  
 $h_1, h_2$  - толщина полосы на участке  $l_1$  и  $l_2$  соответственно;  
 $l_1$  - длина переднего концевого участка полосы с толщиной вне поля допусков (п.3, п.4 табл.1 для ЭИС и ЭАС соответственно), прокатываемого при заправке и разгоне на стане 1400;  
 $l_2$  - длина заднего концевого участка полосы с толщиной вне поля допусков (п.3, п.4 табл.1 для ЭИС и ЭАС соответственно), прокатываемого при торможении и выпуске на стане 1400;  
 $l_{\Sigma}$  - суммарная длина переднего и заднего концевых участков полос вне поля допуска, полученных при прокатке на нестационарных стадиях процесса;  
Ср. - среднее значение; R – размах (разница между минимальным и максимальным значениями); СКО – среднее квадратичное отклонение;  
L - длина полосы;  $\Delta_1, \Delta_2$  - доля переднего и заднего концевых участков полос вне поля допуска соответственно;  $\Delta_{\Sigma}$  - суммарная доля концевых участков полос (переднего и заднего) вне поля допуска.

### Исследование влияния режимов холодной прокатки и толщины горячекатаного проката на толщину холоднокатаных полос

Выполнен анализ изменения толщины по длине полос на входе и выходе из 1-й и выходе из 4-й клетки стана 1400. Проведена проверка наличия взаимосвязи продольного профиля горячекатаного (входного) проката с толщиной холоднокатаных полос после прокатки в 1-й и 4-й клетях непрерывного стана.

Результаты анализа показали наличие статистически значимой связи между толщинами горячекатаного проката и полос ЭИС 2-й группы легирования на выходе из 1-й клетки стана 1400 на обоих концевых участках. Значения коэффициентов корреляции 0,88 и 0,84 соответственно.

Наблюдается схожий характер изменения толщин горячекатаного проката и полосы после 4-й клетки стана 1400 на стадиях заправка-разгон и торможение-выпуск. Значения коэффициентов корреляции 0,85 и 0,69 соответственно.

Аналогичные результаты получены для всех исследуемых групп полос ЭИС и ЭАС.

Проведены исследования влияния основных параметров прокатки в 1-й и 4-й клетях непрерывного стана (усилие в клетях, удельное натяжение полосы, скорость полосы) на характер изменения толщины по длине холоднокатаных полос в нестационарных стадиях процесса (при разгоне и торможении). Результаты корреляционного анализа подтвердили наличие статистически значимой связи толщины с основными параметрами холодной прокатки в нестационарных стадиях процесса (при разгоне и торможении). Значение коэффициентов корреляции (по модулю) варьируется от 0,41 до 0,89 для всего исследуемого сортамента.

При обработке металла в 1 и 4 клетях стана 1400 на стадии разгон наблюдается обратная зависимость изменения толщины полосы от параметров прокатки (снижается толщина – увеличивается параметр). При торможении аналогичная зависимость толщины от усилия в клетях, удельного натяжения и скорости прокатки при более высоких значениях коэффициента корреляции.

Таким образом, установлены основные взаимосвязи толщины полосы с параметрами холодной прокатки (усилие в клетях, удельное натяжение полосы, скорость полосы) в различных стадиях процесса.

Для разработки эффективных способов стабилизации толщины по длине полос необходимо определить наличие и величину временной задержки по влиянию вышеуказанных технологических факторов холодной прокатки на толщину полосы. Для оценки величины задержки  $\tau$  реализации процесса формирования толщины  $h_i(x)$  смещали по длине полосы относительно реализаций процесса изменений технологических величин  $T_j(x)$  на величину  $\xi$ , близкую к  $\tau \cdot v$ . Оценку нормированной взаимно-корреляционной функции рассчитывали по формуле:

$$r_{ij}^{\xi} = \frac{\sum_{x=1}^X [T_j(x) - \bar{T}_j] \cdot [h_i(x+\xi) - \bar{h}_i]}{\sqrt{\sum_{x=1}^X [T_j(x) - \bar{T}_j]^2 \cdot \sum_{x=1}^X [h_i(x+\xi) - \bar{h}_i]^2}}, \quad (1)$$

где  $x$  - координата по длине полосы;  $i = 1, 4$  – номер клетки;  $j = 1, 2, \dots, n$  – номер технологического фактора;  $\bar{T}_j = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X T_j(x)$ ;  $\bar{h}_i = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X h_i(x+\xi)$ .

В качестве статистически обоснованной оценки для величины  $\tau$  принимали такое значение  $\tau_0 = \xi_0/v$ , при котором абсолютная величина оценки  $\tilde{r}_{ij}^\xi$  максимальна.

Результаты расчетов показали, что нормированные взаимно-корреляционные функции изменения технологических факторов (усилие и скорость прокатки, натяжение в межклетьевом промежутке) и толщины имеют максимальное значение при  $\tau_0 = 0,5-3,5с$ , то есть влияние их изменения на толщину проявляется через 0,5-3,5с или 0,14-21 м и 0,25-49 м полосы в 1-й и 4-й клетях соответственно в зависимости от скорости прокатки.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена разработке математических моделей формирования толщины полос ЭИС и ЭАС при прокатке на четырехклетевом стане.

Общий порядок построения математической модели заключается в выборе целей ее использования, постановке задач для достижения этих целей, в изучении объекта (процесса, системы) моделирования, в содержательном и формализованном математическом описании объекта.

Основная цель построения математической модели формирования продольного профиля холоднокатаных полос выбрана исходя из целей самой работы – снижения длины концевых участков с толщиной, выходящей за поле допусков. Это управление процессом в нестационарных стадиях (разгон и торможение) за счет расчета и коррекции значений параметров холодной прокатки, в том числе, регулирующих воздействий с учетом основных возмущений, сопровождающих процесс прокатки.

При постановке и решении задач математического моделирования, как правило, используют три группы методов: аналитические, эмпирические и комбинированные в зависимости от того, с помощью каких закономерностей описываются объекты (процессы, системы): однозначно определенных (детерминированных) или находящихся в условиях неопределенности (при наличии случайных, несистемных воздействий и различных возмущений). В третьей группе сочетаются элементы первых двух. В данной работе применяли первые две группы методов для построения математических моделей.

Аналитический метод построения модели базируется на известных подходах и формулах теории прокатки одного из основных разделов теории обработки металлов давлением. В частности, использована методика Стоуна.

Результаты проверки адекватности моделей формирования продольного профиля исследуемых полос ЭИС и ЭАС, построенных аналитическим методом для стадий разгона и торможения, показали низкую степень совпадения рассчитанной и измеренной толщины проката после 4-й клетки. Относительные погрешности расчета превышают 20%.

Для построения моделей эмпирическим методом выбран один из наиболее известных и распространенных – метод регрессивного анализа (МРА), который с помощью метода наименьших квадратов (МНК) позволяет по данным измерений определить статистические оценки для неизвестных коэффициентов ( $\alpha$ ) и оценку остаточной дисперсии ошибки ( $S_{\text{ост}}$ ) для математической модели.

Получаемые оценки всегда отличаются от истинных значений, поэтому предусмотрено вычисление доверительных интервалов для оценок и коэффициентов. Критерием выбора структуры и параметров является минимум остаточной дисперсии.

С учетом функциональной структуры и возможностей системы регулирования толщины на стане 1400 и различия в свойствах стали и условиях прокатки, исследуемых четырех групп металла построены шестнадцать видов частных линейных уравнений регрессии для каждой сортаментной подгруппы и четыре общих уравнения на основе данных по всем подгруппам, определены коэффициенты регрессии при каждом члене уравнения для первой и четвертой клеток каждой группы типоразмеров полос:

$$h_1 = \alpha_{01}^i + \alpha_{11}^i \sigma_{1-2} + \alpha_{21}^i V_1 + \alpha_{31}^i P_1; \quad (2)$$

$$h_4 = \alpha_{04}^i + \alpha_{14}^i \sigma_{3-4} + \alpha_{24}^i V_4 + \alpha_{34}^i P_4, \quad (3)$$

где  $h_1, h_4$  – толщина полосы за первой и четвертой клетью, мм;  $\sigma_{1-2}, \sigma_{3-4}$  – удельное натяжение в первом и третьем межклетьевом промежутке, МПа;  $V_1, V_4$  – скорость прокатки в первой и четвертой клетки, м/с;  $P_1, P_4$  – усилие прокатки в первой и четвертой клетки, Н;  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – оценки коэффициентов регрессии с размерностью, соответственно: мм,  $\frac{\text{мм}}{\text{МПа}}$ ,  $\frac{\text{мм}\cdot\text{с}}{\text{м}}$ ,  $\frac{\text{мм}}{\text{Н}}$ ;  $i$  – индекс при коэффициентах – номер исследуемой группы типоразмеров.

При формировании базы данных измерений (матрицы исходных данных) функции отклика и факторов, предназначенной для построения линейной многофакторной модели в виде уравнения множественной регрессии, учитывали величины временных задержек ( $\tau$ ) по влиянию на изменение функции отклика – толщины полос регулируемых воздействий: усилия

прокатки  $\tau_{P_1}, \tau_{P_4}$ , натяжения полосы  $\tau_{\sigma_{1-2}}$ ,  $\tau_{\sigma_{3-4}}$  и возмущения (скорости прокатки) в первой и последней клетях стана 1400  $\tau_{V_1}, \tau_{V_4}$ .

Результаты МРА показали, что отличие оценок адекватности построенных линейных и нелинейных математических моделей незначительно. Например, оценки адекватности линейных и нелинейных математических моделей продольного профиля полос, построенных на основе массива, сформированного с учетом временной задержки, составляют:  $F = 2,60$ ,  $S^2_{\text{ост}} = 0,00024$ ,  $R = 0,94$  и  $F = 3,29$ ,  $S^2_{\text{ост}} = 0,00017$ ,  $R = 0,95$  соответственно.

Учитывая, что наиболее удобной с точки зрения практической реализации является линейная структура математической модели, для оценки влияния параметров прокатки на изменение толщины холоднокатаной полосы по ее длине, прогноза, контроля и управления разнотолщинностью целесообразно использовать регрессионные зависимости (2) и (3), построенные на основе массива данных, сформированного с учетом временной задержки влияния технологических факторов на толщину.

Ниже, для примера приведены модели (4) – (5) зависимости толщины полосы в 1-й и 4-й клетях от основных параметров прокатки для ЭИС 2-й группы легирования для участка разгона. Аналогичные уравнения регрессии построены для стадий разгона и торможения в 1-й и 4-й клетях для каждой исследуемой подгруппы.

$$h_1 = 3,0512 - 0,007146 \cdot \sigma_{1-2} - 0,00277 \cdot V_1 - 0,02786 \cdot P_1, \quad (4.31)$$

$$S^2_{\text{ост}} = 0,001827, F = 8,02 > F^T = 2,60 R_{\text{мн}} = 0,92 \text{ (кол-во наблюдений } n > 1000),$$

$$h_4 = 0,9272 - 0,000750 \cdot \sigma_{3-4} - 0,003818 \cdot V_4 - 0,027877 \cdot P_4, \quad (4.32)$$

$$S^2_{\text{ост}} = 0,00024, F = 3,32 > F^T = 2,60 R_{\text{мн}} = 0,94 \text{ (кол-во наблюдений } n > 1000),$$

где  $h_1, h_4$  – толщина полосы за первой и четвертой клетью, мм;

$\sigma_{1-2}, \sigma_{3-4}$  – удельное натяжение в первом и третьем межклетьевом промежутке, МПа;

$V_1, V_4$  – скорость прокатки в первой и четвертой клетки, м/с;

$P_1, P_4$  – усилие прокатки в первой и четвертой клетки, Н;

$S^2_{\text{ост}}$  – остаточная дисперсия;

$F$  – критерий Фишера;  $F^T$  – табличное значение критерия Фишера;

$R_{\text{мн}}$  – коэффициент множественной корреляции.

Проверка точности регрессионных моделей, построенных для каждой группы типоразмеров полос (частных), проведена для всех групп в совокупности, с помощью сравнения рассчитанных значений функции отклика с их измеренными значениями, полученными при анализе дополнительных массивов данных, не включенных в матрицу исходных данных, используемую при построении моделей.

Результаты проверки частных регрессионных моделей формирования продольного профиля полос, построенных эмпирическим методом, подтвердили их адекватность. Относительные погрешности расчета толщин в 1-й и 4-й клетях стана 1400 ЦДС на стадиях разгона и торможения не превышают 10%. Относительная погрешность расчета с использованием общих моделей выше, чем у частных. Результаты сравнения погрешностей представлены в таблице 3.

Таблица 3. Относительные погрешности вычислений толщины полос на стадии разгона и торможения по частным ( $\delta_{\text{ч}}$ ) и общим ( $\delta_{\text{общ}}$ ) уравнениям регрессии (средняя/маж)

Марка проката	Разгон 1 клеть		Разгон 4 клеть		Торможение 1 клеть		Торможение 4 клеть	
	$\delta_{\text{ч}}, \%$	$\delta_{\text{общ}}, \%$	$\delta_{\text{ч}}, \%$	$\delta_{\text{общ}}, \%$	$\delta_{\text{ч}}, \%$	$\delta_{\text{общ}}, \%$	$\delta_{\text{ч}}, \%$	$\delta_{\text{общ}}, \%$
0202	4,03/9,76	4,39/ <b>11,51</b>	4,45/9,03	5,67/ <b>15,93</b>	3,14/7,64	6,76/ <b>16,02</b>	1,98/8,33	2,90/ <b>19,35</b>
0302	2,05/6,02	4,34/9,75	2,70/6,86	6,80/ <b>16,60</b>	1,91/4,75	1,93/6,52	1,85/8,19	4,40/9,05
0402	4,00/7,78	6,12/ <b>10,01</b>	2,83/8,12	4,75/ <b>13,58</b>	5,99/7,99	8,00/ <b>10,48</b>	3,03/7,25	5,69/ <b>11,86</b>
ЭЗА	1,37/4,86	1,64/5,28	1,68/5,54	<b>16,92/22,30</b>	2,13/4,70	2,28/ <b>6,07</b>	6,52/9,19	<b>19,72/23,95</b>

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приведен алгоритмический подход для расчёта режимов, обеспечивающих стабилизацию толщины полосы на концевых участках.

Алгоритмический подход к снижению длины и толщины концевых участков полосы на нестационарных стадиях процесса (заправка-разгон, торможение-выпуск) включает разработку алгоритма регулирования толщины и расчёт с его помощью управляющих параметров прокатки для каждой стадии, моделирование процесса методом конечных элементов в среде QForm и последующую верификацию разработанных режимов с использованием числовой модели.

В основу алгоритма регулирования толщины полосы в нестационарных стадиях процесса прокатки (при разгоне и торможении стана 1400) положены регрессионные уравнения формирования продольного профиля полос, построенные эмпирическим методом. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2.

При разработке алгоритма учтен установленный экспериментально факт существования временной задержки по влиянию регулирующих воздействий на

изменение толщины полос вследствие колебания условий деформации в очаге при ускорении и замедлении (разгоне и торможении) стана.

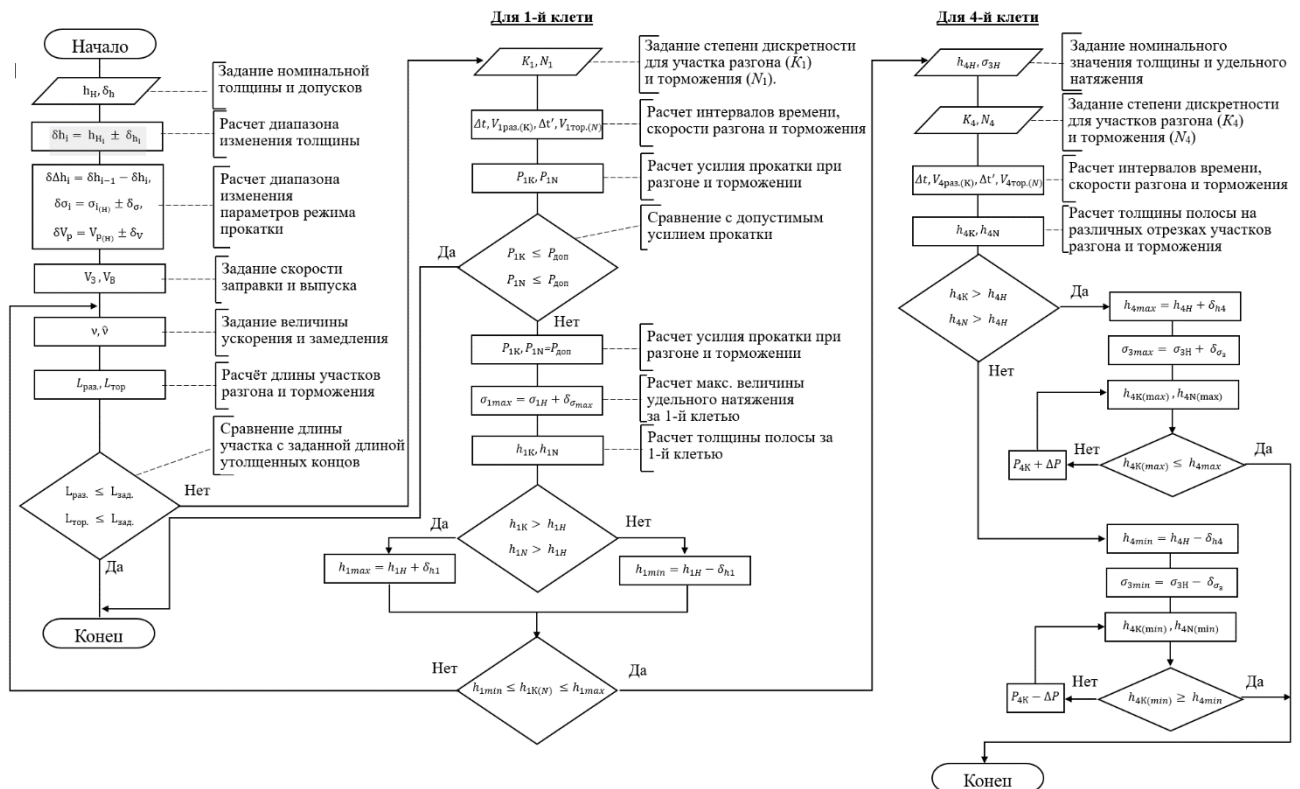


Рис. 2. Блок-схема алгоритма регулирования толщины полос при разгоне и торможении непрерывного четырехклетьевого стана 1400 ЦДС

С помощью алгоритма и регрессионных моделей разработаны режимы холодной прокатки переднего и заднего концевых участков полос электротехнических марок сталей, которые позволяют стабилизировать толщину полосы в нестационарных стадиях процесса.

Ниже представлены разработанные режимы настройки клеток непрерывного стана 1400 при заправке и выпуске полосы.

Таблица 4. Режимы настройки клеток стана 1400 на стадии заправки и выпуска полосы

№ группы типоразмеров полос	Толщина полосы на выходе из клетки после заправки, мм					Удельное натяжение между клетями, МПа				
	$H_0$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	Р-1	$\sigma_{1-2}$	$\sigma_{2-3}$	$\sigma_{3-4}$	4-М
ЭИС 2 гр	2,50	1,57	1,00	0,65	0,52	35	170	180	220	75
ЭИС 3 гр	2,20	1,50	1,00	0,67	0,52	35	190	210	240	85
ЭИС 4 гр	2,00	1,46	0,97	0,67	0,52	45	190	195	235	85
ЭАС	2,50	1,65	1,16	0,87	0,72	45	165	165	175	65

Примечание:

$H_0$  – толщина горячекатаного проката, мм;

$h_1, h_2, h_3, h_4$  – толщина полосы после каждой клетки, мм;

$\sigma_{1-2}, \sigma_{2-3}, \sigma_{3-4}$  – удельное натяжение в межклетевых промежутках, МПа; Р – разматыватель, М – моталка.

Заправку полосы в стан осуществлять при положении гидронажимных устройств (ГНУ), которое соответствует величине межвалковых зазоров, превышающей номинальную толщину полосы на выходе из каждой клетки. После захвата полосы каждой последующей клетью, производить корректировку заднего натяжения до заданного максимального уровня на рабочей скорости прокатки и корректировку межвалкового зазора предыдущей клетки до заданного значения, обеспечивающего получение верхних допустимых границ изменения толщин (измеренных за 1-й и 4-й и рассчитанных за 2-й и 3-й клетями). После захвата полосы моталкой начинать разгон стана, когда все клетки уже настроены на распределение толщин по верхней границе допустимого диапазона изменения (см. табл. 4).

При выпуске, когда задний конец полосы уходит с разматывателя, последовательно, начиная с первой клетки, как только пропадает заднее натяжение, уменьшать степень обжатия, устанавливая уставки ГНУ, обеспечивающие на выходе каждой последующей клетки толщину полосы на верхней границе допустимого диапазона (то есть максимально допустимую). При этом, переднее натяжение устанавливать на максимально допустимую величину по режимам табл. 4.

Для оценки возможности практического применения разработанных режимов холодной прокатки концевых участков полос построили компьютерную модель процесса холодной прокатки на четырехклетевом стане 1400 ЦДС ПАО «НЛМК» в среде QForm.

Компьютерное моделирование провели в условиях трёхмерной деформации. Предварительно в SolidWorks создали модели рабочих валков и заготовки. Созданные модели позиционировали в сборки, сохранили в формате .step и загрузили в QForm. Для определения сопротивления деформации полос ЭИС использовали адаптированные к условиям работы стана 1400 ЦДС реологические зависимости, полученные на основе большого объёма экспериментальных данных, представленных в работе А.П. Долматова.

Моделирование холодной прокатки на стадии заправки и выпуска

проводили с имитацией вышеуказанных приемов и настройкой клетей согласно данных табл. 4 при скорости 0,5-1 м/с.

В качестве примера на рис. 3 представлено изменение усилия прокатки и толщины полосы при приложении ступенчато заднего и переднего натяжения при заправке и выпуске при обработке ЭИС 2 гр., 2,5→0,5×1025 мм на четырехклетевом стане.

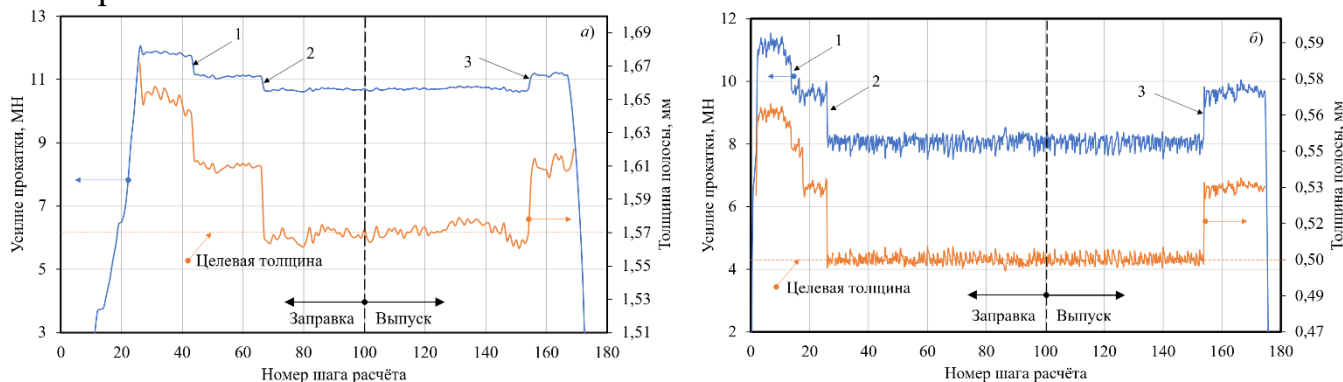


Рис. 3. Изменение усилия прокатки и толщины полосы при приложении ступенчато заднего и переднего натяжения при прокатке полос ЭИС 2 гр., 2,5→0,5×1025 мм: а) – 1 клеть, б) – 4 клеть; 1 – включение заднего натяжения, 2 – включение переднего натяжения, 3 – выключение заднего натяжения.

Как видно из рис. 3 при ступенчатом приложении заднего и переднего натяжения происходит снижение усилия прокатки в среднем на 1-2 МН и толщины полосы до величины, близкой к целевой. Данное влияние наблюдается как при заправке, так и выпуске полосы. Полученные результаты не противоречат результатам теоретических и экспериментальных исследований по влиянию условий прокатки внешних частей и концевых участков полос из стали и цветных металлов на деформационные и силовые параметры и толщину при тонколистовой прокатке,

Моделирование усилия прокатки и толщины полосы в среде QForm выполнено также на стадии разгона и торможения в 1-й и 4-й клетях стана 1400 для ЭИС 2 группы легирования по схеме прокатки 2,5→0,5 мм. На рис. 4 для примера приведено изменение усилия прокатки для 4-й клетки на стадии разгона (а) и торможения (б) с помощью компьютерной и регрессионной моделей.

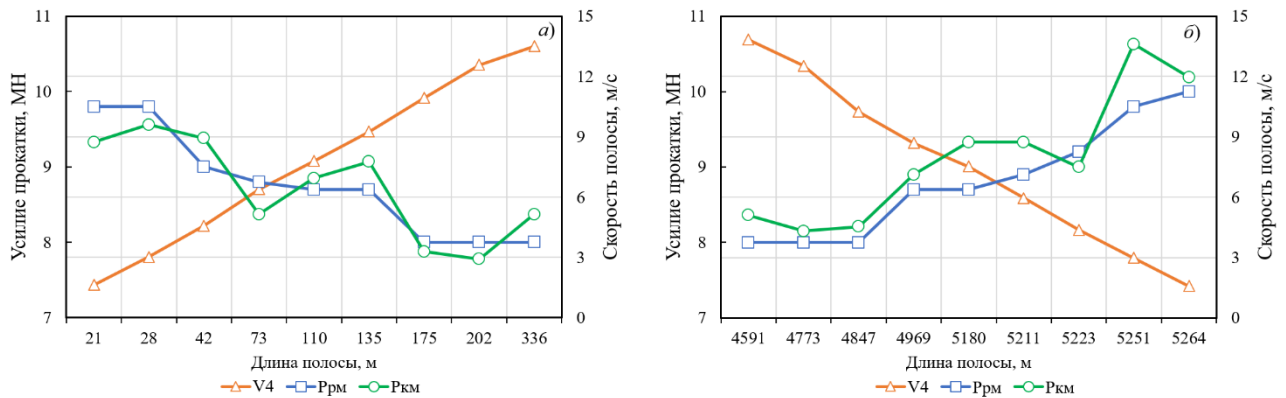


Рис. 4. Изменение усилия прокатки для 4-й клетки на стадии разгона (а) и торможения (б), рассчитанное по компьютерной (км) и регрессионной моделям (рм)

Результаты моделирования в среде QForm на стадиях разгона и торможения демонстрируют высокую степень согласованности с результатами расчета по регрессионным моделям. Относительное отклонение расчетных значений усилий прокатки и толщины полос после 1-й и 4-й клеток стана 1400 ЦДС не превышают 5%. Аналогичные результаты получены для всех исследуемых типоразмеров полос.

Результаты компьютерного моделирования в среде QForm подтвердили возможность практического применения на нестационарных стадиях процесса (заправка-разгон, торможение-выпуск) режимов холодной прокатки, полученных с использованием разработанного алгоритма. Использование данных режимов позволяет минимизировать отклонения толщины полосы от номинальных значений на концевых участках без ущерба для инструмента (рабочих валков) и качества полосы.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ проведена практическая проверка разработанных режимов холодной прокатки переднего и заднего концевых участков полос.

На стане 1400 обработано 1 648 т проката ЭИС 2 – 4 групп легирования толщиной 0,50 мм и 675 т ЭАС – толщиной 0,70 мм. Результаты проверки подтвердили их эффективность.

При прокатке ЭИС 2-4 групп легирования и ЭАС по разработанным режимам толщина на концевых участках полностью соответствует внутренним требованиям ПАО «НЛМК» по предельным отклонениям на концевых участках полос (+0,3 мм).

Толщина концевых участков вне поля допусков ( $\pm 0,02$  мм) при прокатке ЭИС 2-4 групп легирования снизилась: по среднему значению 0,60-0,67 мм до 0,53-0,59 мм; по размаху с 0,30-0,43 мм до 0,10-0,16 мм и СКО с 0,09-0,16 мм до

0,037-0,044 мм.

Суммарная длина некондиционных участков при прокатке ЭИС 2-4 групп легирования снизилась: по среднему значению с 31,6-47,95 м до 12,29-15,95 м; размаху с 66,1-96,2 м до 10,0-17,0 м; СКО с 22,66-26,72 м до 4,03-4,96 м.

Толщина концевых участков вне поля допусков ( $\pm 0,02$  мм) при прокатке ЭАС снизилась: по среднему значению с 0,74-0,83 мм до 0,69-0,73 мм; размаху с 0,22-0,43 мм до 0,08-0,09 мм; СКО с 0,08-0,11 мм до 0,031-0,035 мм.

Суммарная длина некондиционных участков при прокатке ЭАС снизилась: по среднему значению с 39,4 м до 9,44 м, размаху с 76,2 м до 12,3 м; СКО с 25,63 м до 2,81 м.

Холодная прокатка полос по разработанным режимам позволяет снизить суммарную среднюю длину переднего и заднего концевых участков полос вне поля допусков с 0,90 % до 0,28 % в зависимости от сортаментной подгруппы.

Статистические оценки толщины и длины участков полос, прокатанных с применением разработанных режимов, представлены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты экспериментальной проверки разработанных режимов холодной прокатки концевых участков полос на стане 1400

Тип стали	$h_1$ , мм		$h_2$ , мм		$l_1$ , м		$l_2$ , м		$l_{\Sigma}$ , м		L, м	$\Delta_1$ , %	$\Delta_2$ , %	$\Delta_{\Sigma}$ , %
	$\frac{Cp.}{R}$	СКО	$\frac{Cp.}{R}$	СКО	$\frac{Cp.}{R}$	СКО	$\frac{Cp.}{R}$	СКО	$\frac{Cp.}{R}$	СКО				
ЭИС 2-й группы легирования	$\frac{0,59}{0,11}$	0,037	$\frac{0,53}{0,10}$	0,041	$\frac{9,0}{12,0}$	3,41	$\frac{5,00}{10,0}$	2,3	$\frac{13,82}{13,0}$	4,03	4998 - 5225	0,18-0,17	0,10-0,09	0,28-0,26
ЭИС 3-й группы легирования	$\frac{0,56}{0,12}$	0,047	$\frac{0,56}{0,16}$	0,043	$\frac{8,70}{9,00}$	2,54	$\frac{7,06}{9,00}$	2,67	$\frac{15,95}{17,0}$	4,04	4656-5009	0,19-0,17	0,15-0,14	0,34-0,32
ЭИС 4-й группы легирования	$\frac{0,55}{0,13}$	0,044	$\frac{0,54}{0,11}$	0,042	$\frac{7,60}{9,00}$	4,03	$\frac{5,26}{9,00}$	2,50	$\frac{12,29}{10,0}$	4,96	4606-5082	0,16-0,15	0,11-0,10	0,27-0,24
ЭАС	$\frac{0,73}{0,08}$	0,031	$\frac{0,69}{0,09}$	0,035	$\frac{5,86}{9,70}$	2,53	$\frac{4,01}{7,10}$	1,63	$\frac{9,44}{12,3}$	2,81	3372-3715	0,17-0,16	0,12-0,11	0,28-0,25

Примечание:  
 $h_1, h_2$  - толщина полосы на участке  $l_1$  и  $l_2$  соответственно;  
 $l_1$  - длина переднего концевой участка полосы с толщиной вне поля допусков (п.3, п.4 табл.1 для ЭИС и ЭАС соответственно), прокатываемого при заправке и разгоне на стане 1400;  
 $l_2$  - длина заднего концевой участка полосы с толщиной вне поля допусков (п.3, п.4 табл.1 для ЭИС и ЭАС соответственно), прокатываемого при торможении и выпуске на стане 1400;  
 $l_{\Sigma}$  - суммарная длина переднего и заднего концевых участков полос вне поля допуска, полученных при прокатке на нестационарных стадиях процесса;  
Cp. - среднее значение; R - размах (разница между минимальным и максимальным значениями); СКО - среднее квадратичное отклонение;  
L - длина полосы;  $\Delta_1, \Delta_2$  - доля переднего и заднего концевых участков полос вне поля допуска соответственно;  $\Delta_{\Sigma}$  - суммарная доля концевых участков полос (переднего и заднего) вне поля допуска.

В качестве примера на рис. 5, 6 представлено изменение толщины полосы за 4-й клетью, отклонения усилия в 4-й клетки от номинального значения, отклонения удельных натяжений в 3-м межклетьевом промежутке от номинального значения, скорости в 4-й клетки при прокатке партий ЭИС 2-й группы легирования толщиной 0,5 мм с применением разработанного режима прокатки для участков заправки-разгона и торможения-выпуска полосы и без применения.

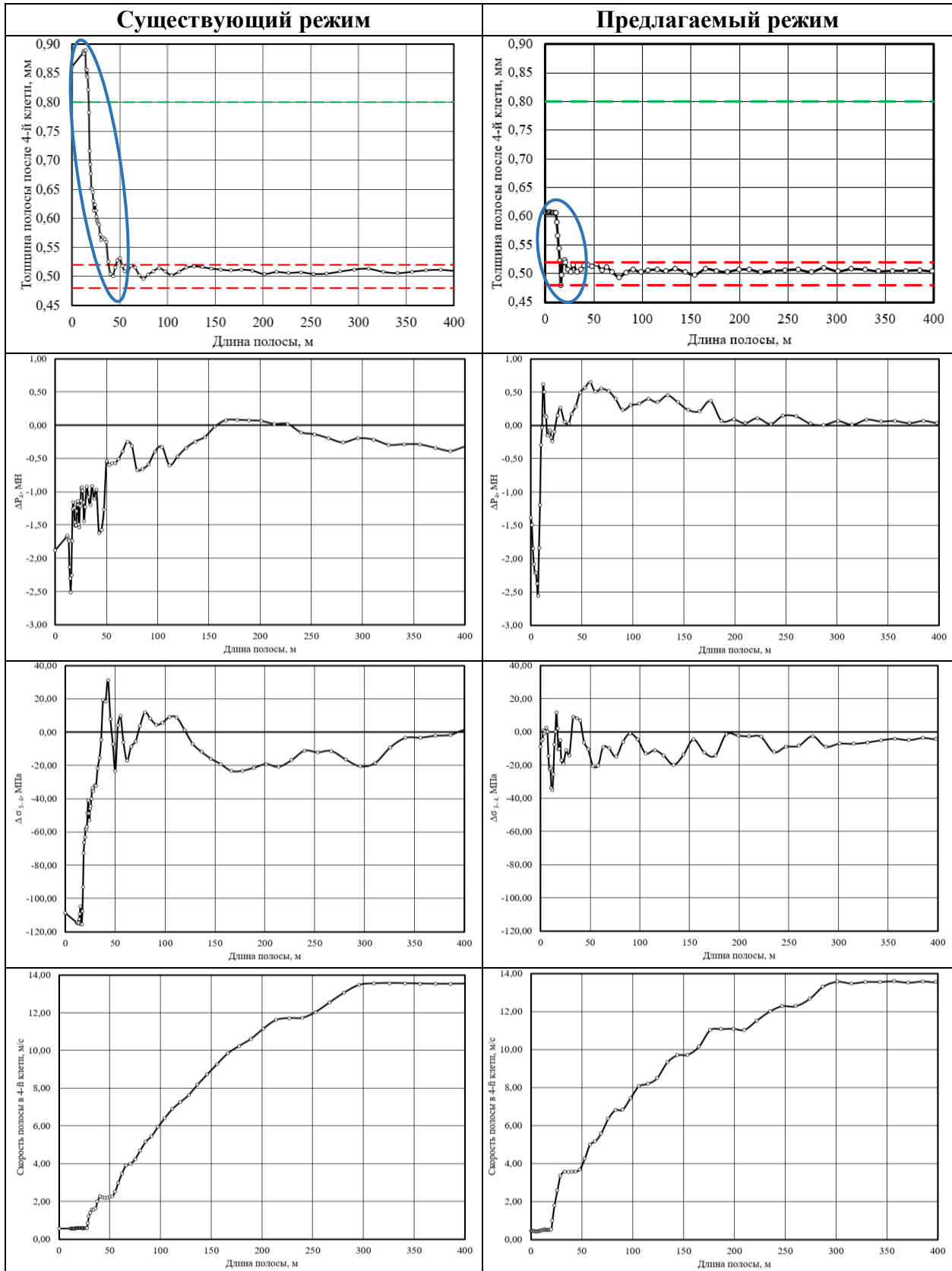


Рис. 5. Изменение толщины полосы за 4-й клетью ( $h_4$ ), отклонения усилия в 4-й клетке от номинального значения ( $\Delta P_4$ ), отклонения удельных натяжений в 3-м межклетьевом промежутке от номинального значения ( $\Delta \sigma_{3,4}$ ), скорости в 4-й клетке ( $V_4$ ) для ЭИС 2-й группы легирования ( $0,5 \times 1025$  мм) по существующему и по разработанному режимам (**участок заправки-разгона**): « — — — » допуск по внутренним требованиям ПАО «НЛМК» (+0,30 мм); « - - - » допуск по требованиям заказчиков ( $\pm 0,02$  мм)

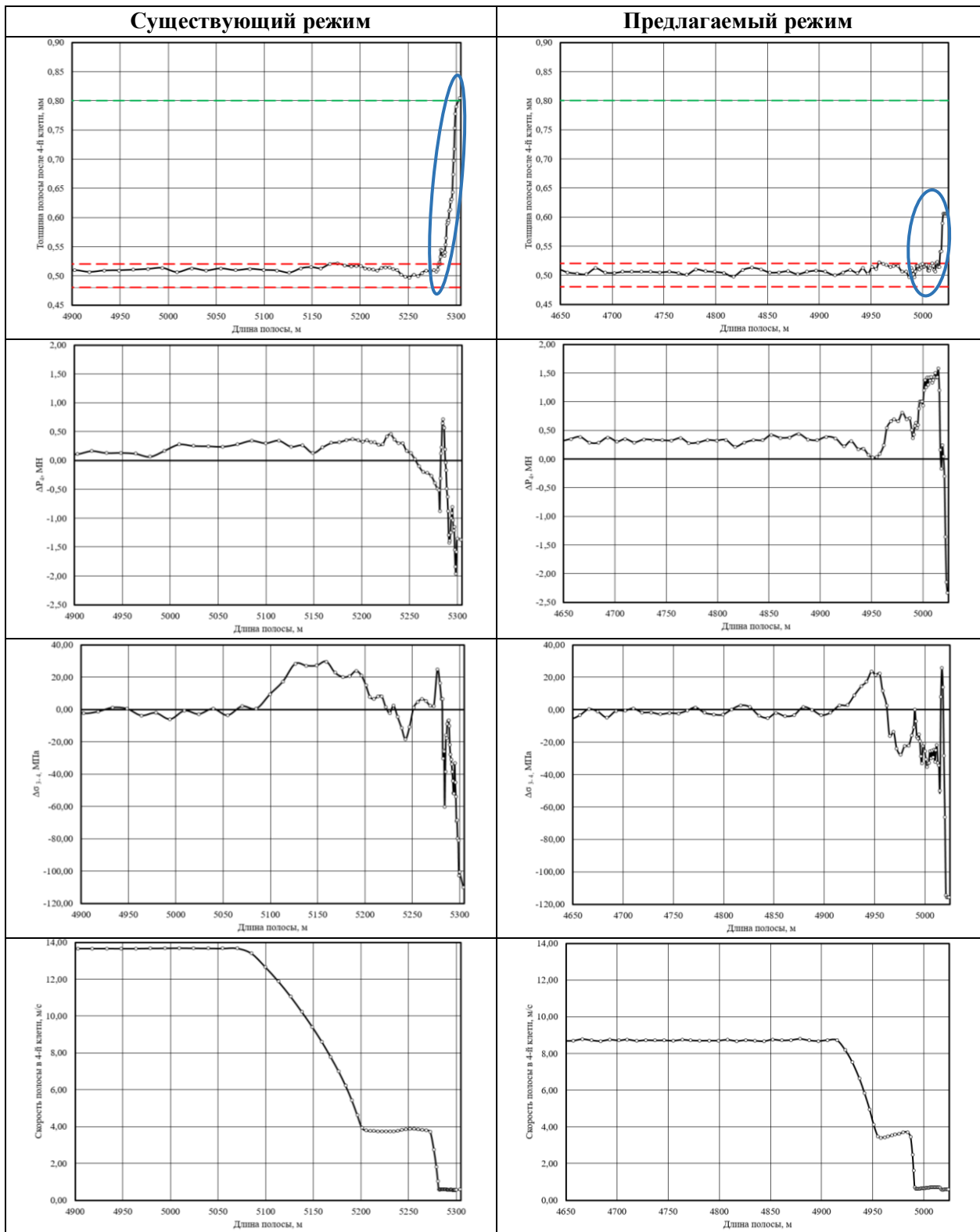


Рис. 6. Изменение толщины полосы за 4-й клетью ( $h_4$ ), отклонения усилия в 4-й клетии от номинального значения ( $\Delta P_4$ ), отклонения удельных натяжений в 3-м межклетьевом промежутке от номинального значения ( $\Delta \sigma_{3-4}$ ), скорости в 4-й клетии ( $V_4$ ) для ЭИС 2-й группы легирования ( $0,5 \times 1025 \text{ мм}$ ) по существующему и по разработанному режимам (участок торможения-выпуска): «— — —» допуск по внутренним требованиям ПАО «НЛМК» (+0,30 мм); «- - -» допуск по требованиям заказчиков ( $\pm 0,02 \text{ мм}$ )

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа научно-технической литературы определены ключевые технологические факторы. Показано, что наибольшим образом, на формирование продольной разнотолщинности (утолщений) холоднокатаных полос в нестационарных стадиях процесса прокатки оказывают влияние усилие, удельное натяжение и скорость прокатки.

2. Проведено исследование изменения толщины и параметров прокатки на четырехклетевом стане 1400 по длине полос ЭИС 2-4 группы легирования и ЭАС. Выявлено, что по длине полосы имеются участки с толщиной вне поля допусков по разнотолщинности. Данные участки соответствуют нестационарным стадиям процесса прокатки: заправка, разгон до момента включения САРТ, торможение с момента отключения САРТ до скорости выпуска полосы, выпуск полосы. Толщина концевых участков вне поля допусков ( $\pm 0,02$  мм) при прокатке ЭИС 2-4 групп легирования и ЭАС составляет: по среднему значению 0,60-0,67 мм и 0,74-0,83 мм; по размаху 0,30-0,43 мм и 0,22-0,43 мм; СКО 0,09-0,16 мм и 0,08-0,11 мм соответственно. Суммарная длина некондиционных участков при прокатке ЭИС 2-4 групп легирования и ЭАС: по среднему значению 31,6-47,95 м и 39,4 м; размаху 66,1-96,2 м и 76,2 м; СКО 22,66-26,72 м и 25,63 м соответственно.

3. Результаты корреляционного анализа показали наличие статистически значимой связи между основными параметрами прокатки и толщиной на выходе из 1-й и 4-й клетей стана 1400 в нестационарных стадиях процесса: на стадии разгона и торможения наблюдается обратная зависимость изменения толщины полос от параметров прокатки (усилие, удельного натяжения и скорости).

Установлен диапазон изменения временной задержки (0,5 - 3,5 с) влияния натяжения, усилия и скорости прокатки на толщину полосы после 1-й и 4-й клетей стана 1400.

4. Разработаны математические модели формирования продольного профиля холоднокатаных полос в 1-й и 4-й клетях стана 1400 с использованием аналитического и эмпирического методов.

Математические модели, построенные с использованием аналитического метода, оказываются недостаточно надёжными на нестационарных участках прокатки: относительные погрешности расчёта составляют свыше 20 %, что свидетельствует о нецелесообразности дальнейшего их использования для решения задач регулирования продольного профиля полосы.

Верификация моделей, основанных на эмпирических зависимостях, показала их высокую точность: относительные погрешности расчёта толщины полосы в среднем не превышают 10 %. Эти модели могут быть успешно применены для целей управления продольным профилем полосы.

5. Разработан алгоритмический подход к регулированию толщины полос электротехнических сталей на непрерывном стане 1400 ЦДС в нестационарных стадиях процесса холодной прокатки. Предложенный подход включает систему вычислительных процедур, правил принятия решений и последовательность операций по корректировке технологических параметров прокатки, направленных на снижение продольной разнотолщинности на концевых участках полос. На основе этого алгоритмического подхода проведены расчёты параметров режима прокатки, позволяющие стабилизировать толщину полосы в переходных режимах.

Разработаны режимы по корректировке распределения обжатий и изменения натяжения на концевых участках, основанные на результатах расчетов по эмпирическим моделям и их верификации с помощью имитационного моделирования в среде QForm.

6. В промышленных условиях проведена апробация режимов холодной прокатки, обеспечивающих сокращение суммарной средней доли переднего и заднего концевых участков полосы, выходящих за пределы допустимых отклонений по толщине. В результате реализации предложенных режимов данный показатель снижен с 0,90 % (45 м) до 0,28 % (15 м) в зависимости от сортаментной подгруппы.

7. Разработанные режимы холодной прокатки утолщенных концевых участков до толщин близких к номинальным учтены в программном модуле системы управления станом 1400 ЦДС при заправке и выпуске полосы, что позволяет сократить длину концевых участков полос с толщиной вне допусков и, таким образом, исключить из технологического маршрута обрезку переднего и заднего участков полос на агрегатах подготовки холоднокатаных рулонов (АПХКР) для полос ЭАС. Достигнуто снижение расходного коэффициента на 3,5 кг/т для ЭИС полос и на 1,2 кг/т для ЭАС.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В РАБОТАХ:

1. Божков А.И., Дегтев С.С., Ковалев Д.А., Шульгин Р.И., Черномырдин В.И. Автоматизированная система анализа и расчета параметров холодной прокатки полос. // Черные металлы. 2023. №4 С. 47 – 53.

2. Дегтев С.С., Божков А.И., Филиппьев С.Н., Черномырдин В.И., Морозов А.В., Оськин А.Г., Юсупов В.С., Чеглов А.Е. Стабилизация толщины полосы в нестационарных стадиях процесса холодной прокатки на многоклетьевом стане // Сталь. 2024. № 3. С. 9 – 20.

3. Дегтев С.С., Божков А.И., Филиппьев С.Н., Черномырдин В.И., Морозов А.В., Оськин А.Г., Чеглов А.Е. Построение математических моделей формирования профиля продольного сечения концевых участков холоднокатаных полос в нестационарных стадиях прокатки на многоклетьевом стане // Сталь. 2024. № 7. С. 22 – 29.

4. Дегтев С.С., Божков А.И., Филиппьев С.Н., Черномырдин В.И., Морозов А.В., Оськин А.Г., Чеглов А.Е. Разработка алгоритма регулирования толщины полосы в нестационарных стадиях процесса холодной прокатки на многоклетьевом станем // Сталь. 2024. № 8. С. 21 – 25.

5. Дегтев С.С., Божков А.И., Филиппьев С.Н., Черномырдин В.И., Морозов А.В., Оськин А.Г., Чеглов А.Е. Стабилизация толщины полосы в нестационарных стадиях холодной прокатки на многоклетьевом стане с целью снижения длины концевых участков полос с толщиной вне поля допусков// Сталь. 2025. № 1. С. 17-27.

6. Дегтев С.С., Божков, А.И., Филиппьев С.Н., Черномырдин В.И., Морозов А.В., Оськин А.Г. Снижение длины концевых участков холоднокатаных полос с толщиной вне поля допуска при прокатке на многоклетьевом стане // Труды XIV Конгресса прокатчиков (Том II). – Череповец. 2024. С. 140-150.

7. Дегтев С.С., Божков, А.И., Филиппьев С.Н., Черномырдин В.И., Морозов А.В., Оськин А.Г. Исследование и разработка технологических режимов холодной прокатки электротехнических сталей, обеспечивающих стабилизацию толщины по длине полос на заданном уровне// Сборник трудов конференции «Неделя металлов в Москве» – «Металл-Экспо», 2024. С. 280-287.