

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



«Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»

ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2  
Тел.: +7 (495) 777-93-01; факс: +7 (495) 777-93-00  
e-mail: chermet@chermet.net  
www.chermet.net

Заместитель генерального директора  
по научной деятельности  
ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет  
им. И.П. Бардина», д.т.н.



А.А. Павлов  
2026 г.

06» 04 2026 год №  
на № от

**ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертационную работу  
Черномырдина Василия Игорьевича на тему: «Исследование и разработка  
технологических режимов для стабилизации толщины холоднокатаных полос на концевых  
участках при прокатке электротехнических сталей»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности: 2.6.4. – «Обработка металлов давлением»

**Структура и объём диссертационной работы**

На отзыв представлена диссертация, состоящая из введения, 5 глав, общих выводов, библиографического списка из 87 наименований и одного приложения с описанием практического внедрения полученных результатов. Работа изложена на 146 страницах машинописного текста, включая 57 рисунков и 21 таблицы. На отзыв также представлен автореферат на 26 страницах.

**Актуальность работы**

Стандарты ГОСТ 21427.2-83, ГОСТ 33212-2014 и EN 10106-2015 регламентируют допустимые отклонения по толщине:  $\pm 0,04$  мм (нормальная точность) и  $\pm 0,03$  мм (повышенная точность). Заказчики для электротехнических сталей устанавливают более жесткое требование: продольная разнотолщинность не более  $\pm 0,02$  мм при номинальной толщине 0,50 мм. На практике именно концевые участки полос выходят за допуски на длинах до 60–100 м, а их обрезка приводит к увеличению расходного коэффициента. Это обуславливает актуальность работы, направленной на разработку режимов прокатки для

регулирования толщины на нестационарных стадиях процесса.

### **Научная новизна**

1. Выявлены закономерности формирования повышенной продольной разнотолщинности (утолщений свыше +0,02 мм) на концевых участках полос электротехнических сталей; показано, что в нестационарных режимах (заправка – разгон, торможение – выпуск) без работы САРТ формируются утолщенные участки полос длиной 18–40 м при заправке – разгоне и 12–50 м при торможении – выпуске.

2. Для электротехнических сталей установлена обратная зависимость толщины от обжатия, удельного натяжения и скорости с учетом временных задержек управляющих воздействий.

3. Предложен алгоритмический подход управления толщиной концевых участков, включающий прогноз толщины после 1-й и 4-й клетей с учетом задержек, расчет корректирующих воздействий и их верификацию в QForm.

### **Практическая значимость**

1. Построены регрессионные уравнения для управления толщиной полос ЭИС и ЭАС с учетом временных задержек влияния усилия, удельного натяжения и скорости, что обеспечивает корректный выбор уставок в переходных режимах.

2. Рассчитаны режимы холодной прокатки для переходных стадий процесса холодной прокатки, позволяющие снизить продольную разнотолщинность до  $\pm 0,02$  мм и суммарную длину концевых участков с 0,90% ( $\approx 45$  м) до 0,28% ( $\approx 15$  м) от длины рулона для ЭИС 2–4 и ЭАС.

3. Исключена операция подготовки рулонов на специализированном агрегате для ЭТС, что снижает расходный коэффициент на 3,5 кг/т (ЭИС) и 1,2 кг/т (ЭАС).

### **Степень достоверности**

Достоверность результатов обеспечена верификацией разработанных режимов с помощью имитационного моделирования в среде QForm и подтверждена промышленными испытаниями на стане 1400 ПАО «НЛМК». Режимы внедрены в программный модуль системы управления стана 1400 ЦДС и применяются в производстве.

### **Апробация и публикации**

По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК. Основные результаты доложены на XIII и XIV Международных конгрессах прокатчиков (Москва, 2023; Череповец, 2024) и на 23-й НТК «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения» (Москва, 2024). Автореферат

и публикации полно отражают содержание работы.

### **Содержание работы**

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна, практическая значимость, степень достоверности и разработанности темы.

**В первой главе** выполнен обзор научно-технической литературы по формированию толщины холоднокатаных полос в нестационарных режимах прокатки. Показано влияние усилия в клети, удельного натяжения и скорости на толщину, выделены подпроцессы заправки, разгона, торможения и выпуска. Отмечены временные задержки между изменением условий деформации и реакцией регулирующих воздействий. Обоснован вывод об отсутствии научно обоснованных методов, минимизирующих длину концевых участков электротехнических сталей вне допусков; определены ключевые факторы и их рабочие диапазоны.

**Во второй главе** изложены методика и результаты исследований продольного распределения толщины полос ЭИС 2–4 групп легирования и ЭАС на непрерывном четырехклетевом стане 1400 ЦДС по крупной выборке (ЭИС – 16 483 т; ЭАС – 6 756 т). Описаны средства измерений и системы регулирования стана, алгоритм формирования массивов данных по нестационарным стадиям (заправка, разгон до включения САРТ, торможение после отключения САРТ, выпуск), процедуры отсева грубых погрешностей и статистической проверки. Установлены участки выхода за допуски на концах полос (суммарно 30–50 м) и статистически значимые связи толщины холоднокатаного проката с толщиной подката и параметрами прокатки; выявлена временная задержка влияния управляющих факторов 0,5–3,5 с (0,14–49 м по длине).

**Третья глава** посвящена построению математических моделей формирования продольного профиля толщины для полос ЭИС и ЭАС на четырехклетевом стане для снижения длины концевых участков вне поля допусков в переходных режимах (разгон, торможение). Обоснован выбор цели моделирования – расчет и коррекция уставок усилия, натяжения и скорости с учетом возмущений и динамических эффектов. Рассмотрены два класса методов: аналитический (по классическим соотношениям теории прокатки, в т.ч. по методике Стоуна) и эмпирический (регрессионный анализ с оценкой параметров методом наименьших квадратов). Показано, что аналитические модели для стадий разгона/торможения дают недостаточную точность (относительные погрешности расчета толщины после 4-й клети свыше 20%), что обусловлено их ограниченной способностью учитывать переходные процессы и задержки. В рамках эмпирического подхода, с явным

учетом временных задержек влияния управляющих факторов (усилия, натяжения, скорости) на толщину, сформированы 16 частных линейных уравнений регрессии для подгрупп сортамента и 4 обобщенные модели для совокупности данных (для 1-й и 4-й клеток). Выбор структуры и параметров осуществлялся по минимуму остаточной дисперсии с расчетом доверительных интервалов коэффициентов; приведены типовые метрики адекватности, что оправдывает использование линейной структуры в прикладных целях. Валидация на независимых массивах показала, что частные модели обеспечивают средние/максимальные погрешности расчета толщины в 1-й и 4-й клетях на разгон/торможение не выше ~10% и заметно превосходят общие модели по точности. Полученные регрессионные зависимости рекомендованы для прогноза, мониторинга и практического управления толщиной в нестационарных стадиях.

**В четвертой главе** представлен алгоритмический подход к расчету режимов, обеспечивающих стабилизацию толщины на концевых участках в нестационарных стадиях (заправка – разгон, торможение – выпуск). Алгоритм опирается на эмпирические регрессионные модели продольного профиля, построенные с учетом временных задержек влияния управляющих воздействий (усилие, натяжение, скорость) и реализован в виде блок-схемы. На основе алгоритма сформированы режимы настройки клеток стана 1400 для заправки и выпуска, включая целевые толщины по клетям и уровни межклетевых натяжений для различных групп ЭИС/ЭАС. Для практической оценки применимости выполнено 3D-моделирование в QForm. Показана согласованность результатов расчета с помощью моделирования в QForm и регрессионных моделей на разгонно-тормозных участках не хуже 5% по усилию и толщине для 1-й и 4-й клеток. Сделан вывод о технологической реализуемости и эффективности разработанных режимов без ущерба для валков и качества полос.

**В пятой главе** выполнена промышленная проверка разработанных режимов на стане 1400. Подтверждено соответствие толщины на концевых участках внутренним требованиям ПАО «НЛМК». Для ЭИС 2–4 групп легирования толщина концевых участков вне поля допуска  $\pm 0,02$  мм снижена с 0,60–0,67 до 0,53–0,59 мм, при этом суммарная длина некондиционных участков уменьшена в среднем с 31,6–47,95 до 12,29–15,95 м. Для ЭАС толщина вне поля допуска  $\pm 0,02$  мм снижена с 0,74–0,83 до 0,69–0,73 мм и суммарная длина некондиционных участков также снижена с 39,4 до 9,44 м. Средняя суммарная доля концевых участков вне допусков снижена с 0,90% до 0,28% по сортаментным подгруппам.

**В заключении** представлены основные выводы по результатам проделанной работы.

## **Соответствие автореферата содержанию диссертации**

В автореферате изложена основная концепция, ход работы и общие выводы, показан вклад автора в проведённое исследование, степень новизны и практическая значимость результатов исследований. Содержание автореферата отражает основные положения диссертации.

### **Замечания:**

1. Не отмечено влияние нормализующего отжига на свойства подката и косвенно на процесс формирования толщины.

2. Не рассматриваются возможные «ложные корреляции». Многие параметры (усилие, натяжение, скорость) могут изменяться одновременно, и их влияние может пересекаться. Требуется пояснить данный вопрос.

3. Несмотря на то, что исследуются несколько групп (ЭИС и ЭАС), не всегда можно чётко определить, где наблюдаются общие закономерности, а где специфические особенности для данных марок сталей. Например, чем отличаются зависимости толщины от параметров прокатки для этих сталей? Влияют ли различия в свойствах (анизотропия, требования к магнитным свойствам) на формирование толщины?

4. В работе отсутствует акцент на особенностях прокатки именно электротехнических сталей. Можно ли применять данный алгоритмический подход для расчета параметров холодной прокатки углеродистых марок стали?

5. В работе не отражены особенности прокатки динамной стали для каждой из исследуемых групп легирования.

Отмеченные замечания имеют уточняющий характер и не снижают научной и практической значимости полученных результатов.

### **Заключение**

Диссертационная работа В.И. Черномырдина «Исследование и разработка технологических режимов для стабилизации толщины холоднокатаных полос на концевых участках при прокатке электротехнических сталей» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решены актуальные задачи повышения точности и стабильности толщины холоднокатаных полос; результаты подтверждены моделированием, экспериментами и промышленной апробацией.

Диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Черномырдин Василий

Игорьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.4 – «Обработка металлов давлением».

Диссертация, автореферат В.И. Черномырдина и отзыв обсуждены и приняты на заседании объединенного научно-технического совета НЦВКС, НЦТС, НЦМТ, НЦТПП ведущей организации ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», протокол № 1 от 31 марта 2026 г.

Лица, подписавшие отзыв, выражают согласие на включение своих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

Отзыв составили:

Председатель объединенного научно-технического совета НЦВКС, НЦТС, НЦМТ, НЦТПП,  
Директор Научного центра металлургических технологий ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», д.т.н., проф.



 Н.А. Козырев

Секретарь объединенного научно-технического совета НЦВКС, НЦТС, НЦМТ, НЦТПП,  
Старший научный сотрудник  
Научного центра качественных сталей  
ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», к.т.н.

 Н.О. Ливанова

Подписи

Н.А. Козырева и Н.О. Ливановой заверяю:

  
Главный секретарь  
ГНЦ «ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», к.т.н.  
 Г.П. Москвина

Козырев Николай Анатольевич, специальность 2.6.2 «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов».

Ливанова Надежда Олеговна, специальность 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Данные об организации:

Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» (ГНЦ «ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина») 105005, г. Москва, ул. Радио, д.23/9, стр. 2., тел.: +7 (495)777-93-01, адрес электронной почты: [chermet@chermet.net](mailto:chermet@chermet.net)