Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи

**ПУЗАНОВ Михаил Павлович**

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена на кафедре «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор, **Логинов Юрий Николаевич**

**Официальные оппоненты:** **Лехов Олег Степанович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии;

**Баранов Георгий Леонидович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры металлургических и роторных машин;

**Веретенникова Ирина Андреевна**, кандидат технических наук, ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов.

Защита состоится «13» декабря 2019 г. в 16:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.04.08 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=324

Автореферат разослан «___» ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Селиванова Ольга Владимировна

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования**. Электротехническая анизотропная сталь (ЭАС) или трансформаторная сталь представляет собой кремнистую, холоднокатаную сталь, которая обладает уникальными магнитными свойствами вдоль направления прокатки, что обусловлено наличием в ней «ребровой» текстуры вторичной рекристаллизации {110}<001> (текстуры Госса). Данный материал главным образом используется в производстве магнитопроводов и магнитоактивных частей разнообразных электротехнических устройств, поэтому качество данного материала во многом определяет эффективность функционирования энергетической отрасли в целом. Постоянное ужесточение требований потребителей трансформаторной стали к её качеству и усиление конкуренции на мировом рынке электротехнических сталей предопределяет необходимость выполнения отечественными производителями исследовательских работ по анализу существующего производственного процесса и рационализации режимов обработки.

В связи с вышесказанным исследования напряжённо-деформированного состояния процесса листовой прокатки трансформаторной стали следует **считать актуальными**.

Работа выполнена в рамках исследований, включённых в следующие научные программы:

- «Апробация идей и модернизация процессов обработки материалов давлением, в том числе аддитивных технологий, с целью повышения эффективности производства, качества и эксплуатационной надежности металлургической продукции ответственного назначения» в рамках базовой части государственного задания высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности № 11.9538.2017/БЧ от 01.02.2017 г.
- Проект «Оптимизация режимов обработки при производстве электротехнической анизотропной стали по нитридно-медному варианту технологии с целью улучшения её плоскостности» в рамках плана работ ЦЗЛ ООО «ВИЗ-Сталь» на 2015-2017 гг., утверждённого исполнительным директором предприятия.

**Степень разработанности темы.** В настоящее время в области обработки металлов давлением наиболее обоснованно и полно выполнено решение краевых задач пластической деформации изотропных материалов. Менее изученными являются процессы деформации анизотропных материалов, к которым относятся многие магнитомягкие материалы, в том числе прокат из трансформаторной стали.

В настоящей работе выполнено решение краевой задачи механики обработки металлов давлением для процесса холодной прокатки трансформаторной стали. Исследование выполнено для материала, обладающего анизотропией механических свойств. На основе полученных данных выполнены расчеты напряжённо-деформированного состояния и

энергосиловых параметров процесса холодной листовой прокатки трансформаторной стали для условий реального производства, уточнены связи режимов обработки с физико-механическими свойствами готовой продукции.

**Целью** работы является исследование напряжённо-деформированного состояния процесса холодной прокатки электротехнической анизотропной стали и его влияния на энергосиловые параметры и геометрические характеристики листового проката.

Для достижения данной цели сформулированы **следующие задачи**:

- Исследовать механические свойства электротехнической анизотропной стали.
- Осуществить постановку и решение краевой задачи, описывающей кинематику и напряжённо-деформированное состояние очага деформации для процесса тонколистовой холодной прокатки трансформаторной стали в изотропном и анизотропном состоянии.
- На основании полученных данных разработать математическую модель расчёта энергосиловых параметров тонколистовой холодной прокатки трансформаторной стали, адаптированную для условий промышленной прокатки.
- Выполнить анализ действующих промышленных процессов обработки проката из трансформаторной стали и разработать технологические мероприятия по совершенствованию технологии производства.

**Научная новизна работы** состоит в разработке методики оценки сопротивления деформации анизотропного материала и получении новых данных о реологических свойствах электротехнической анизотропной стали.

**Теоретическая значимость работы** состоит в решении краевой задачи холодной прокатки анизотропного материала, получении данных о напряжённо-деформированном состоянии и кинематике очага деформации.

**Практическая значимость работы** состоит в выявлении связей между режимами обработки трансформаторной стали и её эксплуатационными свойствами, а также в разработке технологических мероприятий по совершенствованию технологии производства в условиях цеха холодной прокатки (ЦХП) ООО «ВИЗ-Сталь» (группа компаний НЛМК).

**Методология исследования** построена на основных концепциях механики обработки металлов давлением, в том числе на применении теорий пластичности изотропного материала (уравнение Мизеса) и анизотропного материала (уравнение Хилла) при использовании следующих методов: испытания механических свойств металлических материалов, конечно-элементного моделирования, планирования вычислительных и промышленных экспериментов, статистической обработки опытных данных.

**Методы исследования** включают:

- Оценку деформационного и скоростного упрочнения анизотропной электротехнической стали для реального процесса холодной прокатки.

- Определение анизотропии механических свойств трансформаторной стали промышленного производства при испытаниях на микротвердость образцов из тонкого холоднокатаного листа в различных направлениях относительно системы координат процесса прокатки.
- Решение краевых задач холодной прокатки трансформаторной стали методом конечных элементов в программном модуле Deform 3D с целью определения кинематики и напряжённо-деформированного состояния очага деформации.
- Совершенствование действующей технологии производства трансформаторной стали с использованием методов планирования экспериментов и статистической обработки опытных данных.

**Положения, выносимые на защиту:**

- Коэффициенты уравнения пластичности Хилла для анизотропного материала, полученные для трансформаторной стали.
- Параметры нейтрального сечения очага деформации для процесса тонколистовой холодной прокатки трансформаторной стали в зависимости от факторов трения на контактной поверхности и натяжения полосы.
- Особенности напряжённо-деформированного состояния очага деформации при прокатке электротехнической стали с учётом анизотропии её механических свойств.
- Математическая модель энергосиловых параметров холодной прокатки трансформаторной стали на основе уточненных сведений о механических свойствах обрабатываемого материала и адаптации для существующих промышленных условий.
- Результаты мероприятий по совершенствованию технологии производства трансформаторной стали.

**Личный вклад** диссертанта состоит в формировании цели, задач и направлений исследований; разработке методики, планировании, подготовке и непосредственном проведении лабораторных и промышленных опытов; обработке, анализе и обобщении полученных данных; подготовке научных статей, тезисов докладов российских и международных конференций.

**Степень достоверности результатов работы** подтверждается статистической обработкой полученных данных, сравнением с известными аналогами из технической литературы и данными реальных производственных процессов.

**Апробация результатов работы** выполнена путем докладов итогов исследований на конференциях и публикацией в рецензируемых изданиях, в том числе, зарубежных и из перечня ВАК.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XVI Международная научно-техническая Уральская школа – семинар металловедов – молодых ученых УрФУ, г. Екатеринбург, 2015 г.; V Международная интерактивная научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии» УрФУ, г. Екатеринбург, 2015 г.; XXXI Международная конференция «Дни на

безразрушителния контрол 2016» Институт по механика – БАН, г. Созополь, Болгария, 2016 г.; II Международная научно-практическая конференция «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства» МГТУ им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, 2016 г.; XXII Международная научно-практическая конференция «Трубы – 2016» ОАО «РосНИТИ», г. Челябинск, 2016 г.; XVII Международная научно-техническая Уральская школа – семинар металловедов – молодых ученых УрФУ, г. Екатеринбург, 2016 г.; X Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург, 2016 г.; XI Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург, 2017 г.; XVIII Международная научно-техническая Уральская школа – семинар металловедов – молодых ученых УрФУ, г. Екатеринбург, 2017 г.; III Международная научно-практическая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice» МГТУ им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, 2018 г.; IV Международная конференция «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ» ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург, 2018 г.; XIX Международная научно-техническая Уральская школа – семинар металловедов – молодых ученых УрФУ, г. Екатеринбург, 2018 г.

**Публикации**. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 20-ти печатных трудах, 9 из них опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Пять статей вошло в международную базу Scopus, две в международную базу Web of Science.

**Структура и объем работы**. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, включает 52 рисунка, 8 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 144 наименований и двух приложений.

Четвертая глава диссертационной работы выполнена в ООО «ВИЗ-Сталь» (группа компаний НЛМК). Автор выражает благодарность начальнику ЦЗЛ ООО «ВИЗ-Сталь» к.х.н. Л. С. Карениной, специалистам Прокатной группы ЦЗЛ Г. В. Быкову и А. Г. Урицкому, специалисту по прокатному производству ЦХП Н. В. Михайлову за помощь в организации и проведении опытно-промышленных исследований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы её цели и задачи, показана теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** представлен обзор литературных данных, посвящённых изучению связи между физико-механическими свойствами и параметрами деформации трансформаторной стали при холодной прокатке. Кроме того, рассмотрены способы производства трансформаторной стали и

технологические особенности операции холодной прокатки, выявлены направления для оптимизации производственного процесса.

**Вторая глава** посвящена изучению напряжённо-деформированного состояния при холодной прокатке трансформаторной стали в изотропном состоянии. Методом конечных элементов выполнено исследование кинематики течения металла в очаге деформации при холодной тонколистовой прокатке трансформаторной стали с разными коэффициентами контактного трения и величиной приложенного к полосе натяжения. Проанализирована связь между расчетными данными напряжённо-деформированного состояния и процессами формирования мезоструктуры и текстуры в материале при деформации.

Исследование напряжённо-деформированного состояния холодной прокатки трансформаторной стали в изотропном состоянии выполнено для условий отечественного нитридно-медного варианта технологии, в котором холодная прокатка на конечную толщину выполняется после промежуточного отжига. Постановка и решение задачи прокатки произведено в программном комплексе Deform-3D.

Моделирование холодной прокатки с различными условиями контактного трения осуществлено в пяти вариантах. Коэффициент трения задавался законом Амонтона – Кулона. В ходе моделирования получено распределение касательного напряжения в очаге деформации и определена форма нейтрального сечения (рисунок 1).

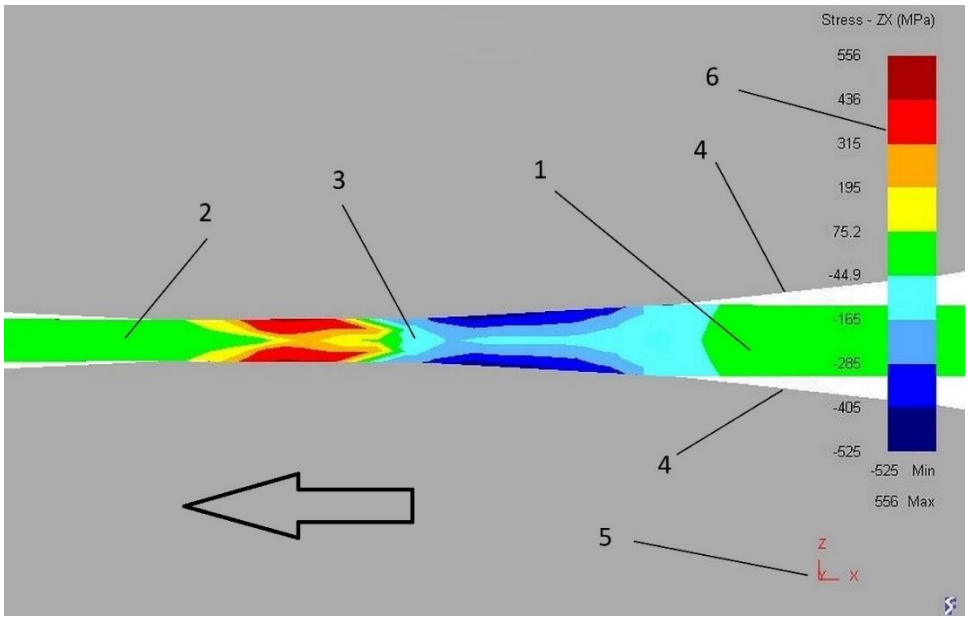



Рисунок 1 – Поле напряжений $\sigma_{ZX}$ в продольном сечении полосы: 1 – заготовка; 2 – полоса; 3 – очаг деформации; 4 – поверхность валков; 5 – система координат; 6 – цветовой ключ; стрелка – направление прокатки

Установлено, что для всех значений коэффициента трения протяженность зоны отставания увеличивается от центрального слоя к поверхности, при этом нейтральное сечение в очаге деформации не является

плоским, а выгнуто в сторону входа полосы в валки. Степень изгиба нейтрального сечения $S$ оценена соотношением

$$S = \frac{\Delta}{0{,}5(h_0+h_1)} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

где $\Delta$ – величина изгиба нейтрального сечения, $h_0$ и $h_1$ – соответственно толщина полосы до и после прохода прокатки.

На рисунке 2 представлен график зависимости формы нейтрального сечения $S$ от величины коэффициента трения $\mu$, полученный по данным моделирования.

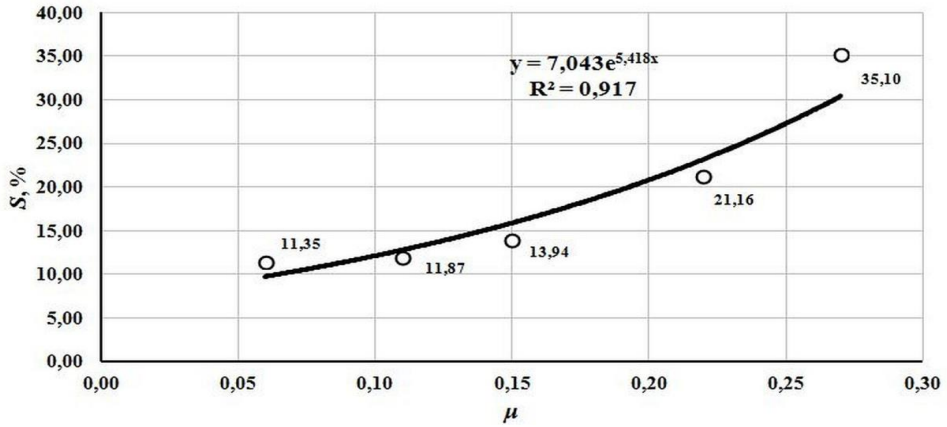



Рисунок 2 – Зависимость формы нейтрального сечения от условий трения

Проведен сравнительный анализ зависимости расчетного давления от формы нейтрального сечения (рисунок 3).

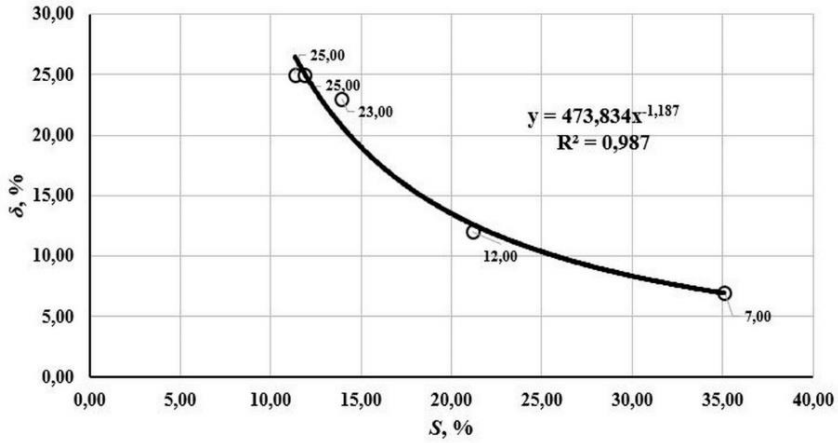



Рисунок 3 – Влияние формы нейтрального сечения $S$ на параметр $\delta$

Влияние формы нейтрального сечения на давление прокатки оценивали путем сравнительного анализа данных, полученных в результате моделирования и численного расчета по методу А. И. Целикова с использованием гипотезы плоских сечений. Параметр $\delta$ на рисунке 3 показывает относительную разницу между значением усилия прокатки в модели и значением, вычисленным по А. И. Целикову. Установлено, что

влияние фактора формы нейтрального сечения на величину давления прокатки увеличивается с уменьшением коэффициента трения, использование гипотезы плоских сечений при расчете давления прокатки даёт заниженный результат.

Следующим исследуемым фактором стало соотношение переднего и заднего натяжений полосы при одинаковом коэффициенте трения. Для передней и задней торцевой поверхности заготовки в модели были заданы граничные условия в напряжениях, имитирующих действие переднего ($T_1$) и заднего ($T_0$) натяжений полосы, создаваемого моталками. Анализ результатов моделирования показал, что для промышленного режима прокатки существует значительный резерв по увеличению заднего натяжения, что позволит снизить энергосиловые параметры деформации и, как следствие, затраты энергии на передел.

Далее в работе проведены металлографические исследования образцов трансформаторной стали промышленного производства, полученных из пластин, подвергнутых холодной прокатке на лабораторном стане кварто. Пластины прокатаны за один проход, часть образцов обработана с использованием смазки, другая часть образцов деформирована в сухих валках. В определённый момент прокатки (после захвата пластины валками и выхода на стабильный режим) клеть стана резко реверсировалась, в результате получены пластины недоката с визуально видимым очагом деформации.

Для исследования связи между данными напряжённо-деформированного состояния и процессами формирования мезоструктуры и текстуры в материале при деформации проанализирована величина (рисунок 4) и направление действия (рисунок 5) максимальных касательных напряжений $\tau_{max}$. Для случая прокатки со смазкой принята величина коэффициента трения $\mu$ = 0,11, для прокатки в сухих валках $\mu$ = 0,22.

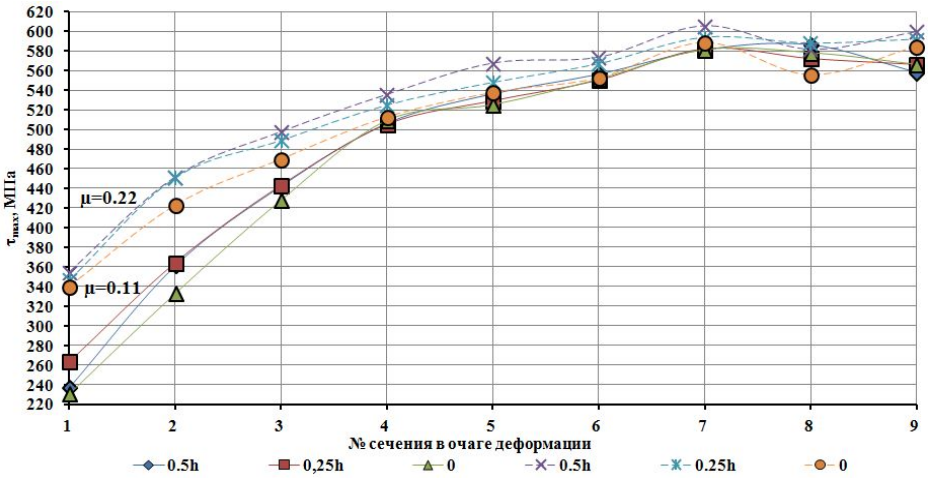



Рисунок 4 – Изменение величины напряжения $\tau_{max}$ в очаге деформации

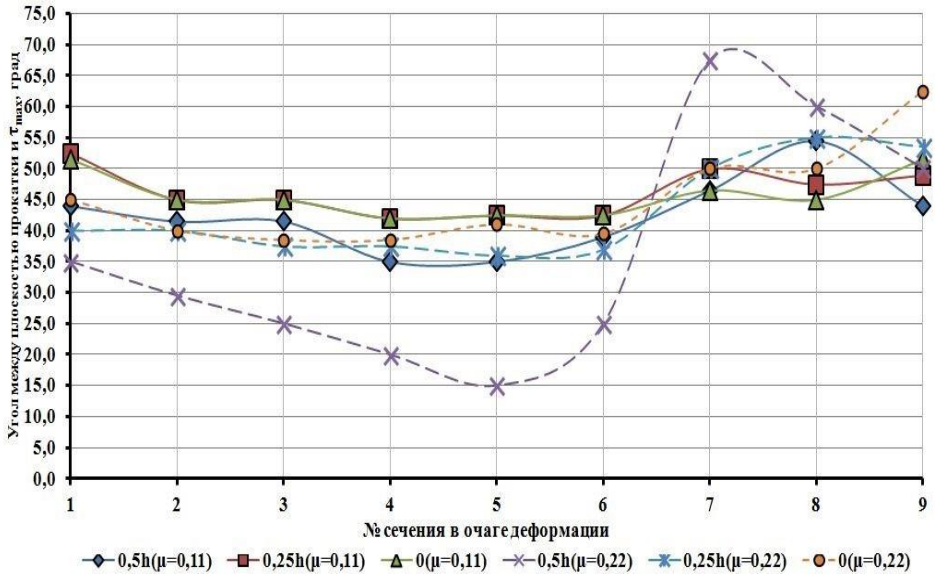
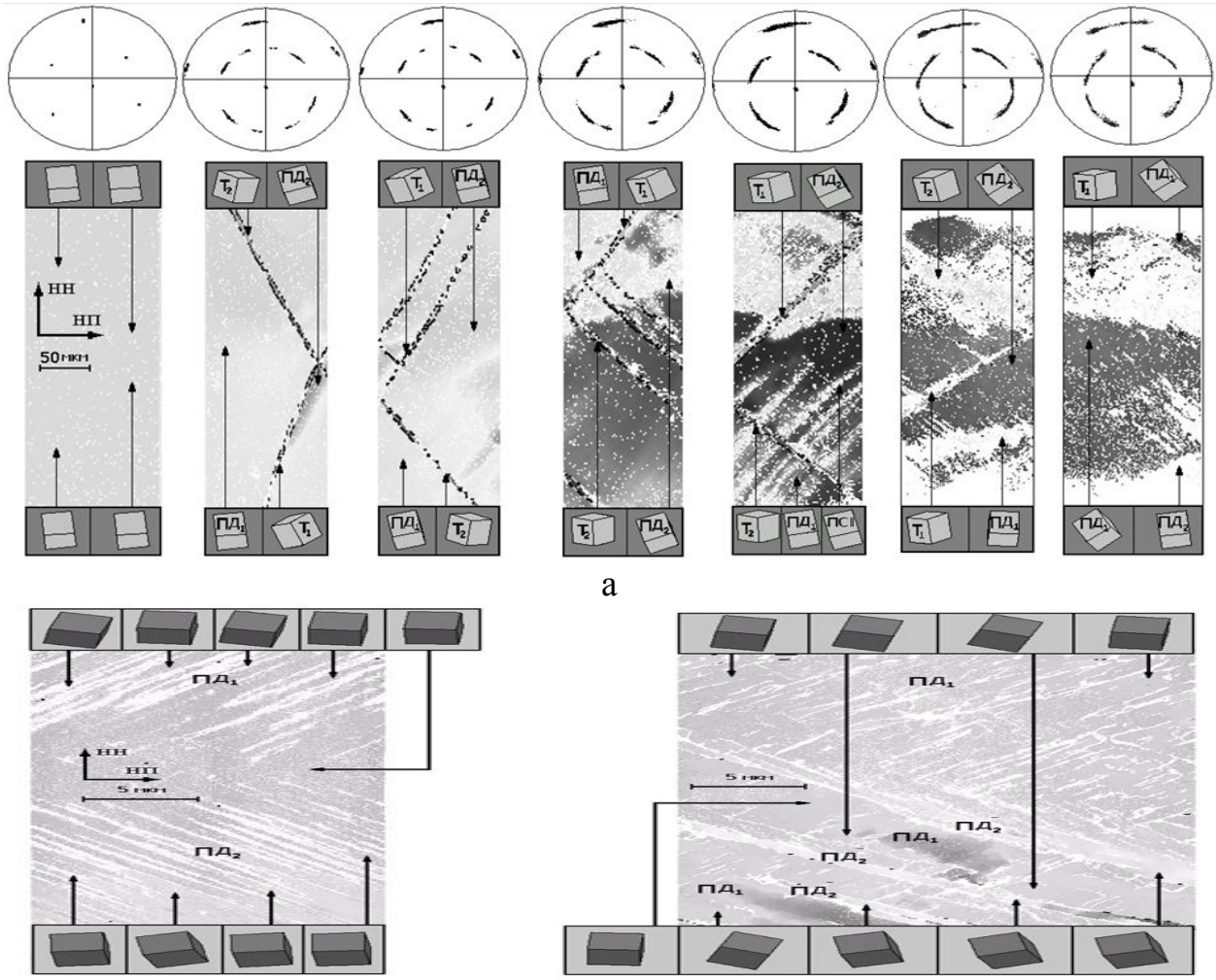



Рисунок 5 – Изменение направления напряжения $\tau_{\max}$ в очаге деформации

Обнаружено, что для прокатки с высоким коэффициентом трения характерно общее увеличение величины касательных напряжений $\tau_{\max}$ для соответствующих поперечных сечений очага деформации по сравнению с низким коэффициентом трения. Данная разница наиболее выражена в области входа в очаг деформации. Кроме того, различия в коэффициенте трения приводят к изменениям направления $\tau_{\max}$ по длине и глубине очага деформации, особенно в поверхностных $(0{,}5h)$ слоях полосы. Значительное изменение направления $\tau_{\max}$ в поверхностном слое очага деформации при повышенном трении можно объяснить сменой направления действия контактных напряжений при переходе из кинематической зоны отставания в зону опережения.

Далее были проанализированы результаты ориентационного анализа (EBSD) образцов металла (рисунок 6). Исследования выполнены на электронном микроскопе Carl Zeiss Auriga CrossBeam с приставкой Oxford Instruments HKL Nordlys F (EBSD). Принята система координат, оси которой связаны с направлением холодной прокатки (НП), нормалью к ее плоскости (НН) и перпендикулярным им направлением (ПН), которое совпадает с осью валков.




а

б

Рисунок 6 – Результаты ориентационного анализа (EBSD) очага деформации при прокатке образца со смазкой (а) и без (б)

Установлено, что процесс переориентации изначальной ориентировки образцов (110)[001] для обоих случаев прокатки может быть описан поворотом кристаллической решетки в полосе деформации вокруг кристаллографического направления, близкого к ПН. Повышение степени деформации при прокатке способствует дальнейшей переориентации кристаллической решетки в основном объеме деформационных полос и её приближению к двум симметричным ориентировкам {111}<112>. Отмечено, что для случая низкого коэффициента трения в области входа в очаг деформации, углы между плоскостью прокатки и напряжениями $\tau_{max}$ близки к величине 55°. Это может объяснять появление в структуре при данном напряжённом состоянии двойников деформации, так как действующие плоскости двойникования (112) и $(11\bar{2})$ в монокристалле (110)<001> имеют угол с плоскостью прокатки 54,7°.

В **третьей главе** проведено исследование механических свойств трансформаторной стали. Описана зависимость сопротивления деформации от скоростного упрочнения и установлены коэффициенты анизотропии модели пластичности Хилла при холодной деформации трансформаторной стали.

Произведено моделирование напряжённо-деформированного состояния при холодной прокатке трансформаторной стали с учётом анизотропии свойств.

Проанализированы имеющиеся сведения о механических свойствах трансформаторной стали при растяжении с различными скоростями деформации при комнатной температуре. Была аппроксимирована зависимость сопротивления деформации материала при растяжении $\sigma_s$ от степени деформации $\varepsilon$ и от скорости деформации $\xi$ функцией, предложенной А. Надаи:

$$\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon) + (12{,}5\varepsilon + 5{,}5)\ln(\xi). \quad (2)$$

В формуле (2) $\sigma_s(\varepsilon)$ – сопротивление деформации при статической деформации, $\xi$ – скорость деформации, определяемая формулой Тринкса. Соотношение (2) достаточно точно описывает экспериментально найденную зависимость $\sigma_s$ от $\xi$ для малых скоростей деформаций трансформаторной стали. С физической точки зрения выбор выражения (2) можно объяснить влиянием нагрева металла вследствие диссипации механической мощности при холодной прокатке, что подтверждается литературными данными и данными реального промышленного процесса.

На следующем этапе работы исследована анизотропия механических свойств холоднокатаной трансформаторной стали. Для оценки анизотропии листового проката было выбрано уравнение пластичности Хилла

$$F(\sigma_{YY} - \sigma_{ZZ})^2 + G(\sigma_{ZZ} - \sigma_{XX})^2 + H(\sigma_{XX} - \sigma_{YY})^2 + 2L\sigma_{YZ}^2 + 2M\sigma_{ZX}^2 + 2N\sigma_{XY}^2 = 1, \quad (3)$$

где $F$, $G$, $H$, $L$, $M$, $N$ – коэффициенты анизотропии, $\sigma_{ij}$ $(i, j = X, Y, Z)$ – компоненты девиатора напряжений.

Для определения коэффициентов анизотропии трансформаторной стали был использован материал промышленного производства. Полоса исследуемой стали была прокатана в холодном состоянии с суммарным относительным обжатием 72 %. Далее, из холоднокатаного листа были подготовлены плоские образцы с различной ориентацией относительно системы координат процесса прокатки, после чего произведены испытания на микротвёрдость с использованием установки Shimadzu HMV-G21DT.

По итогам статистической обработки результатов испытаний была получена зависимость среднего значения твёрдости холоднокатаной трансформаторной стали *HV* от направления измерения. Связь между пределом текучести материала при растяжении $\sigma_т$ и числом единиц твёрдости *HV* установлена по известным соотношениям механики сплошных сред.

Обнаружено, что в ходе холодной прокатки трансформаторная сталь становится анизотропной. Наибольшему упрочнению материал подвергается в направлении прокатки, наибольшая относительная разница механических свойств обнаружена между направлением прокатки и диагональным

направлением, её величина составляет 7 %. На рисунке 7 показаны полученные результаты.

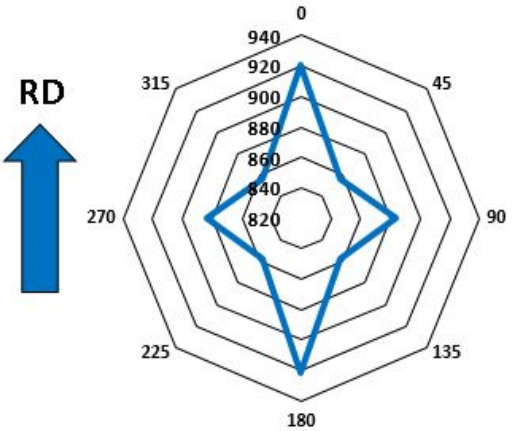



Рисунок 7 – Анизотропия предела текучести (МПа) в листе холоднокатаной трансформаторной стали толщиной 0,7 мм, RD – направление прокатки

На основании полученных результатов было получено уравнение пластичности Хилла для трансформаторной стали

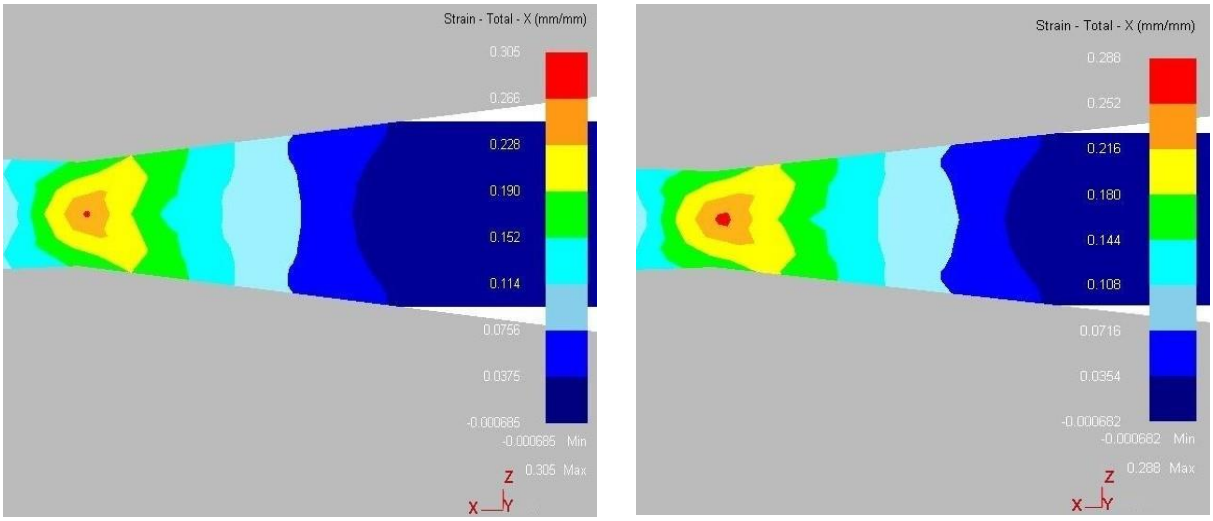
$$0{,}66(\sigma_{YY}-\sigma_{ZZ})^2+0{,}56(\sigma_{ZZ}-\sigma_{XX})^2+0{,}62(\sigma_{XX}-\sigma_{YY})^2+3\sigma_{YZ}^2+3\sigma_{ZX}^2+3\sigma_{XY}^2=1. \quad (4)$$

С применением уравнения пластичности Хилла в программном пакете Deform-3D была решена тестовая задача по осадке цилиндрической заготовки из трансформаторной стали в холодном состоянии. Выполнение моделирования данного простого процесса обработки давлением осуществлено для оценки адекватности работы программы при решении задач пластической деформации анизотропной среды. Анализ напряжённо-деформированного состояния процесса осадки цилиндрической заготовки при использовании условия текучести Хилла для анизотропного материала показал адекватность используемых методов и методик моделирования.

На основании полученных новых данных об анизотропии трансформаторной стали методом конечных элементов выполнено решение краевой задачи прокатки анизотропной полосы. Целесообразность решения задачи связана с разработкой и освоением технологии производства высокопроницаемой трансформаторной стали, для которой холодная прокатка осуществляется с применением больших суммарных обжатий (более 85 %) без промежуточных отжигов.

Для оценки влияния непосредственно анизотропии деформируемой среды на напряжённо-деформированное состояние в очаге деформации задача холодной прокатки решалась в упрощенном виде, исключая факторы натяжения и деформационного разогрева полосы. Параметры процесса прокатки в моделировании приняты в соответствии с условиями промышленного производства данной стали. В качестве контрольной решалась задача прокатки изотропной полосы при тех же граничных условиях.

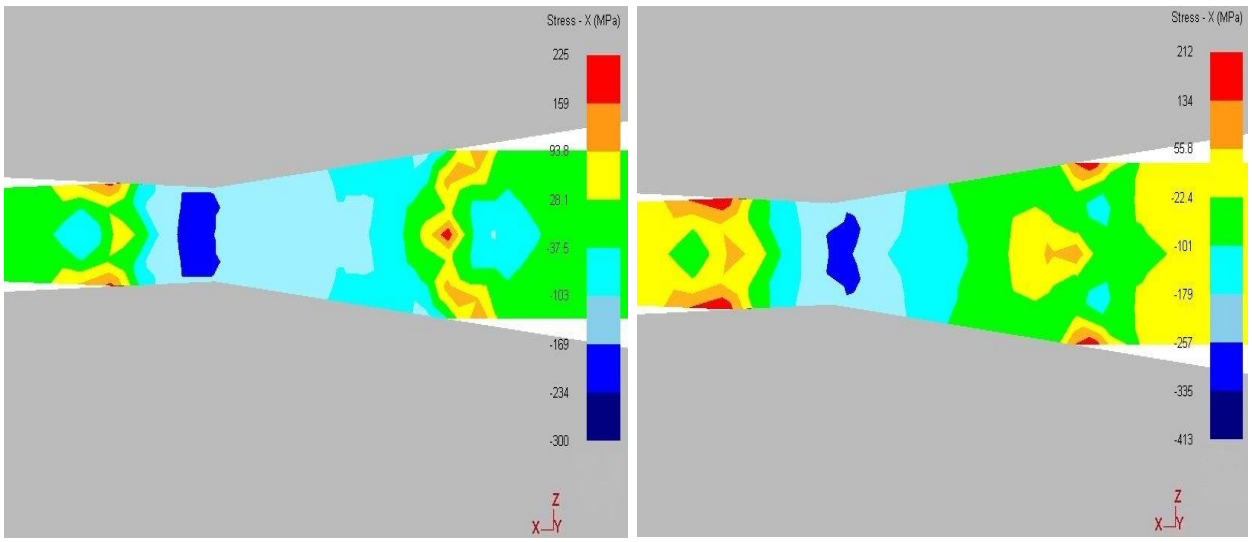
По результатам моделирования были выявлены отличия в напряжённо-деформированном состоянии металла в очаге деформации для случаев прокатки изотропного и анизотропного материала. Так, величина накопленной степени деформации при прокатке составила $\varepsilon_i$ = 0,344 для изотропной полосы и $\varepsilon_a$ = 0,303 для анизотропной. Наиболее существенное различие в течении металла выявлено в направлении прокатки. Для случая прокатки изотропного металла удлинение оказалось выше ($\varepsilon_{XX}$ = 0,305), чем при прокатке анизотропной полосы ($\varepsilon_{XX}$ = 0,288) на 6 %, как показано на рисунке 8. Осуществлена проверка на выполнение условия несжимаемости. Выявлено, что для случая прокатки анизотропного материала меньшее удлинение связано с большим уширением металла: $\varepsilon_{YY}$ = 0,014 против $\varepsilon_{YY}$ = 0,011 для изотропной среды.




а б

Рисунок 8 – Распределение величины $\varepsilon_{XX}$ в очаге деформации при прокатке изотропной (а) и анизотропной (б) полосы

Анализ компонентов тензора напряжений показал, что продольные напряжения $\sigma_{XX}$ (рисунок 9) для прокатки анизотропной полосы оказались выше ($\sigma_{XX}$ = -413 МПа), чем для изотропной полосы ($\sigma_{XX}$ = -300 МПа), т.е. разница составила около 40 %.




а б

Рисунок 9 – Распределение величины $\sigma_{XX}$ в очаге деформации при прокатке изотропной (а) и анизотропной (б) полосы

Для направления, нормального к плоскости прокатки, различие выражено слабее. Для изотропной полосы получено $\varepsilon_{ZZ}$ = -0,316 и $\sigma_{ZZ}$ = -913 МПа, для анизотропной полосы соответственно $\varepsilon_{ZZ}$ = -0,302 и $\sigma_{ZZ}$ = -779 МПа, отличие в напряжениях составляет 15 %, напряжение меньше оказались для прокатки анизотропной полосы. Качественно это соответствует измерениям твердости: в нормальном направлении (ось Z) твердость ниже, чем в направлении прокатки (ось X). Отмечено, что изменение одного из напряжений, например, $\sigma_{XX}$, в соответствии с условием текучести Мизеса или Хилла должно вызвать изменение других напряжений, чтобы равенство в этих условиях, выполнялось. В данном случае таким напряжением является $\sigma_{ZZ}$.

Расчетное значение усилия прокатки анизотропной полосы составило 110 кН, изотропной полосы – 118 кН, т.е. разница оказалась не столь значительной, как разница в распределении напряжений. Само снижение усилия прокатки анизотропной полосы вполне соответствует более низким напряжениям $\sigma_{ZZ}$, которые отвечают за формирование контактных давлений.

В целом, различие в напряжённо-деформированном состоянии можно объяснить характером анизотропии материала. Отмечено, что наиболее сильное упрочнение трансформаторной стали при холодной прокатке имеет место в нормальном направлении и в направлении прокатки, причем в последнем случае упрочнение самое высокое. Логично, что течение металла в аналогичных направлениях будет менее свободным, а величина напряжений, требуемых для развития деформации, более высокой.

В **четвёртой главе** представлены результаты оптимизации технологии холодной прокатки трансформаторной стали. Проведено исследование формирования плоскостности проката в промышленных условиях. Разработана модель холодной прокатки, адаптированная к промышленным условиям. Предложен и внедрён в производство новый режим холодной прокатки, обеспечивающий улучшение плоскостности трансформаторной стали.

В ходе анализа производства трансформаторной стали в ЦХП ООО «ВИЗ-Сталь» (группа компаний НЛМК) установлено, что актуальной проблемой является дефект деформации кромки полосы. Деформация кромки трансформаторной стали происходит на переделе выпрямляющего отжига в процессе правки полосы растяжением. Деформация реализуется на одном или нескольких участках полосы вблизи кромок и визуально на поверхности полосы проявляется в виде параллельных желобов с неровными краями, тянущихся вдоль направления прокатки. В процессе накопления и анализа технологических параметров обработки металла на агрегатах выпрямляющего отжига было замечено, что процессу деформации кромок способствует неудовлетворительная плоскостность обрабатываемых полос, приводящая к сильному натяжению одной или обеих кромок при провисании центральных участков полосы («коробоватый» или «асимметричный» профиль), как показано на рисунке 10.

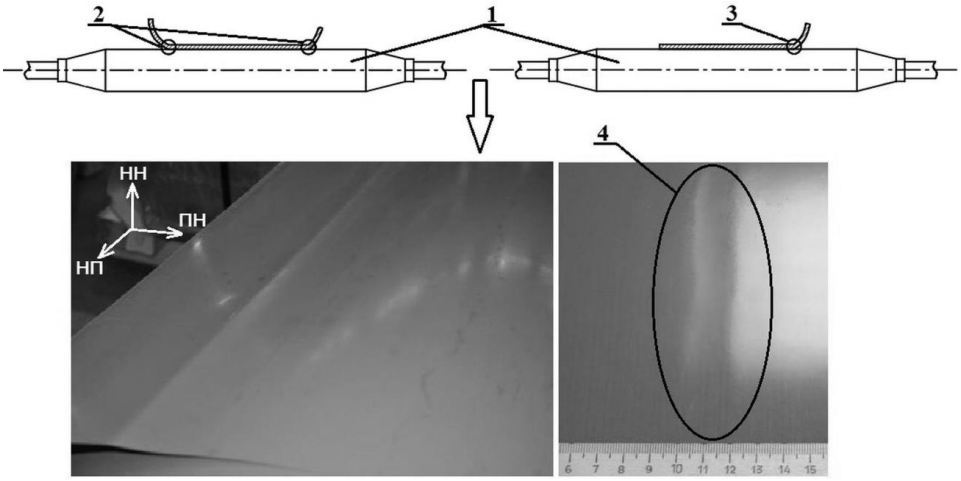



Рисунок 10 – Механизм деформации кромки полосы: 1 – печные ролики агрегата выпрямляющего отжига, 2 – деформация кромки на полосе с «коробоватым» профилем, 3 – деформация кромки на полосе с «асимметричным профилем», 4 – проявление деформации кромки на поверхности полосы

Статистическими методами исследовано влияние степени отклонения от плоскостности полос после холодной прокатки. Результаты обработки данных эксперимента показали, что образованию дефекта способствует более мощный фактор, задействованный на другом переделе цеха.

Далее, было произведено измерение термических деформаций полосы при рулонном высокотемпературном отжиге в колпаковых печах методом координатной сетки. Выявлено, что в результате высокотемпературного отжига на всех участках полосы имеют место термические деформации укорочения в направлении прокатки. Распределение термических деформаций по ширине полосы происходит неравномерно. В зависимости от вида распределения степени продольной деформации по ширине полосы (симметрично или асимметрично), полоса приобретает «коробоватый» или «асимметричный» поперечный профиль. Установлено, что в ходе

высокотемпературного отжига происходит существенное ухудшение плоскостности холоднокатаных полос.

Для исследования причин термических деформаций произведено измерение температурных полей рулонов. Измерение выполнено в течение всего цикла отжига в нескольких точках при помощи термопар (рисунок 11).

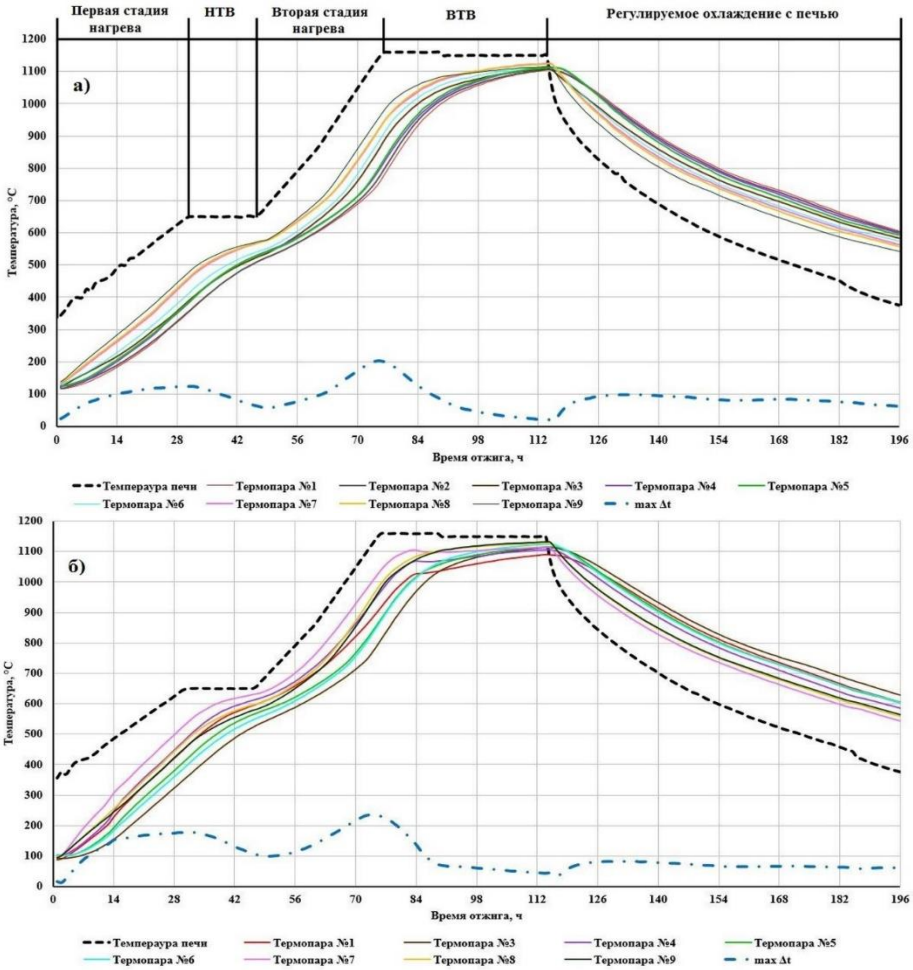



Рисунок 11 – Результаты измерения температурного поля рулонов при отжиге: а – верхний рулон в стопе; б – нижний рулон в стопе

Было обнаружено, что температурное поле по сечению рулона неравномерно, максимальный перепад температур наблюдается в момент окончания нагрева и может достигать 230 °С. При охлаждении садки величина перепада температур по сечению рулона остаётся практически неизменной и не превышает 81 °С. Анализ обнаруженных температурных градиентов показал связь с термическими деформациями полосы.

Для оптимизации режимов холодной прокатки трансформаторной стали и улучшения её плоскостности разработана математическая модель, адаптированная для промышленных условий производства. Определение энергосиловых параметров деформации в математической модели произведено на основании уравнения А.И. Целикова для расчёта среднего контактного напряжения. Величина сопротивления деформации задавалась на основании полученной ранее формулы деформационного и скоростного упрочнения трансформаторной стали. Величина коэффициента трения в

модели задавалась уравнением, учитывающим влияние факторов скорости прокатки и применяемых при прокатке смазочно-охлаждающих жидкостей. Уравнение для определения коэффициента трения получено путём аппроксимации промышленных данных.

Практическое опробование математической модели осуществлено для условий прокатки трансформаторной стали на реверсивном одноклетьевом стане кварто 1200 в ЦХП ООО «ВИЗ-Сталь» (группа компаний НЛМК). Для проверки достоверности модели использованы опытные данные реального процесса прокатки, полученные из системы мониторинга основных технологических параметров стана (рисунок 12).

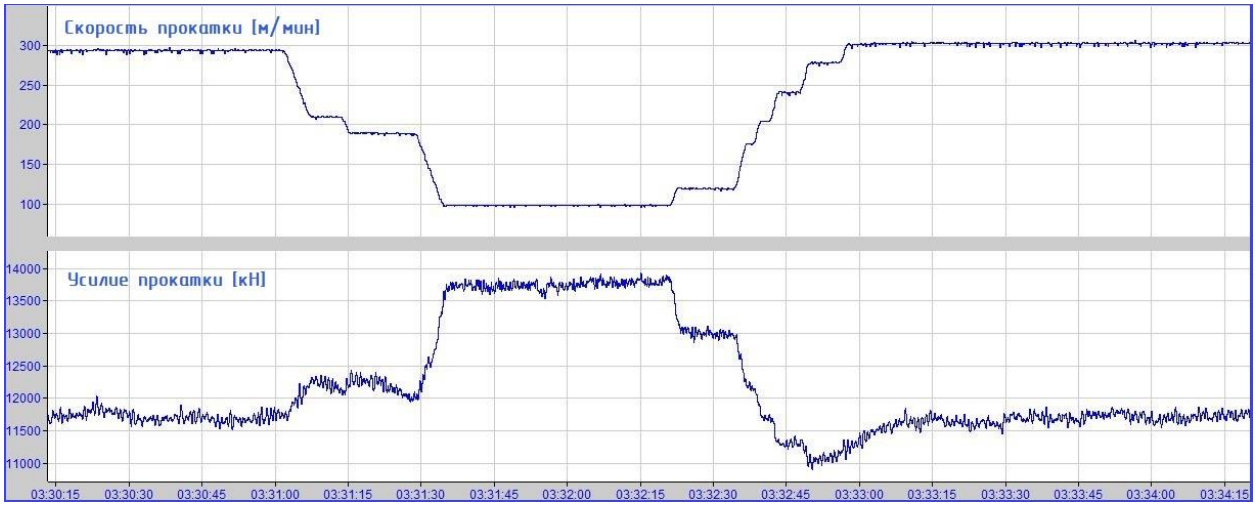



Рисунок 12 – Отображение параметров усилия и скорости прокатки в мониторинговой системе стана 1200

Промышленные данные исследованы методом корреляционно-регрессионного анализа. Результаты статистического анализа продемонстрировали адекватность и высокую точность разработанной математической модели. Величина ошибки при расчёте энергосиловых параметров прокатки по предложенной модели в среднем составила 2,6 %.

Разработанная математическая модель была реализована на ЭВМ и использована для оптимизации действующих режимов холодной прокатки трансформаторной стали. С целью обеспечения более равномерного распределения термических деформаций по ширине холоднокатаной полосы в ходе последующего высокотемпературного отжига на станах холодной прокатки была проведена опытная кампания с изменением технологических режимов работы систем регулирования плоскостности полосы. В опытной кампании прокатки за счёт использования полученной математической модели были оптимизированы профилировки валков, изменены настройки систем изгиба и осевой сдвижки рабочих валков. При изменённых настройках стана реализована прокатка полос с распределением коэффициента вытяжки по ширине полосы по параболическому закону, величина коэффициента вытяжки уменьшалась от кромок полосы к центру. На холоднокатаной полосе, прокатанной в опытном режиме, наблюдалось отклонение от плоскостности в виде волнистости по кромкам (рисунок 13).

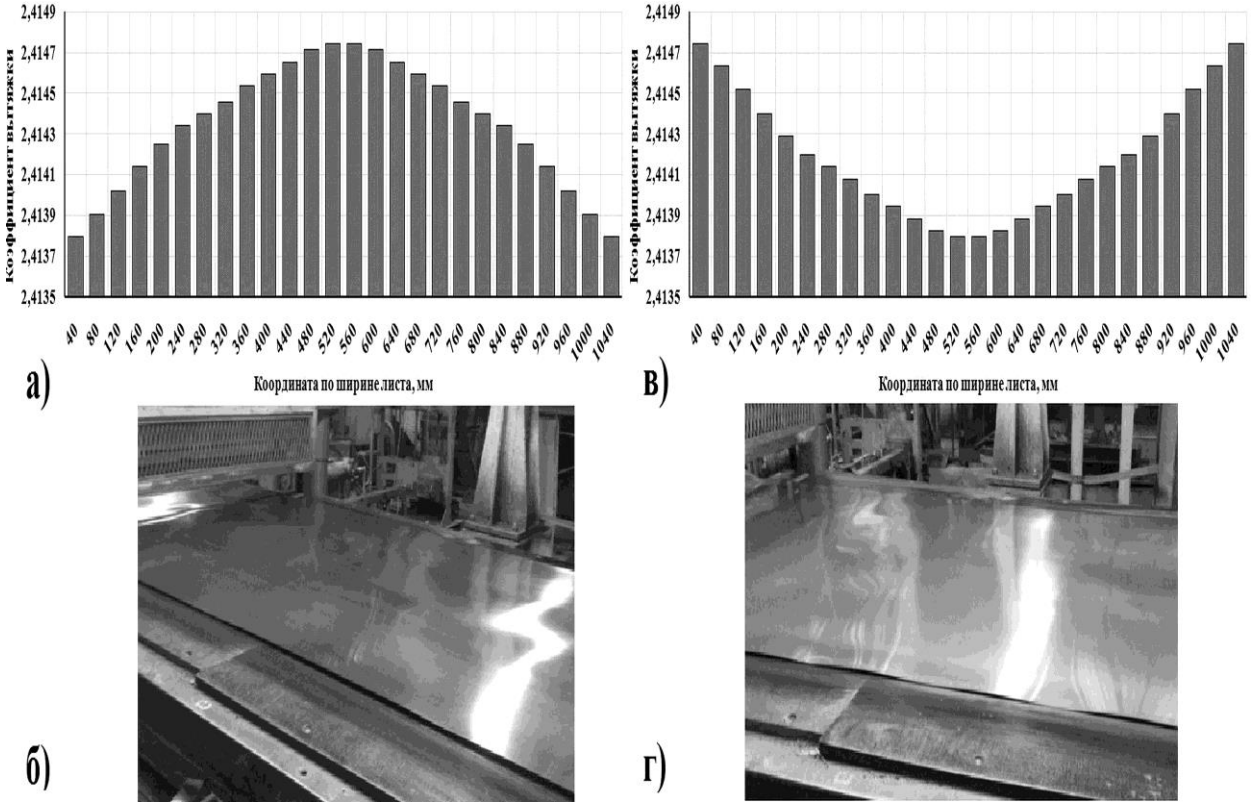



Рисунок 13 – Плоскостность холоднокатаных полос 0,30 мм: а, б – соответственно эпюра коэффициента вытяжки и плоскостность полосы при стандартном режиме прокатки; в, г – соответственно эпюра коэффициента вытяжки и плоскостность полосы при экспериментальном режиме прокатки

По результатам промышленного эксперимента было отмечено, что на всём массиве металла, прокатанного в опытном режиме, деформация кромок в печи агрегата выпрямляющего отжига не произошла. На металле сравнения деформация кромки произошла на 12 рулонах, из-за чего в несоответствующую продукцию было переведено 1525 кг готовой стали (3,2 % от всей массы металла сравнения). Негативного влияния опытного режима прокатки на качественные параметры трансформаторной стали в ходе эксперимента не выявлено. Разработанный режим прокатки принят к использованию в действующем производстве ООО «ВИЗ-Сталь» (группа компаний НЛМК).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По итогам выполненного исследования можно заключить, что поставленные цели и задачи выполнены в полном объеме.

1. Решение краевой задачи холодной прокатки трансформаторной стали в изотропном состоянии показало, что параметры трения и натяжения полосы оказывают существенное влияние на кинематику очага деформации. Выявлено, что нейтральное сечение в очаге деформации при холодной прокатке трансформаторной стали не является плоским, с ростом коэффициента трения происходит увеличение изгиба нейтрального сечения в сторону входа полосы в валки по экспоненциальному закону.

2. Использование гипотезы плоских сечений при расчёте энергосиловых параметров прокатки трансформаторной стали даёт заниженный результат. При учёте отклонения формы нейтральной поверхности от плоского сечения величина расчетного давления прокатки трансформаторной стали превышает аналогичный параметр, вычисленный теоретически с применением гипотезы плоских сечений в среднем на 24 %.

3. Физическое и численное исследование очага деформации показало, что параметры напряженно-деформированного состояния значимо влияют на формирование мезоструктуры и развитие текстуры трансформаторной стали при холодной прокатке.

4. В результате исследования механических свойств трансформаторной стали было выявлено, что скоростное упрочнение существенно влияет на сопротивление деформации данного материала при холодной деформации. Получена формула, аппроксимирующая деформационное и скоростное упрочнение трансформаторной стали при холодной деформации.

5. Экспериментально установлена разница в значениях твердости образцов трансформаторной стали, измеренных в различных направлениях относительно плоскости холоднокатаного листа. Установлено, что материал является анизотропным, наибольшая относительная разница механических свойств в плоскости листа составила 7 %.

6. На основании экспериментальных данных для трансформаторной стали сделана оценка параметров упрочнения в условии текучести Хилла.

7. Решение краевой задачи холодной прокатки трансформаторной стали в анизотропном состоянии показало, что учет анизотропии приводит к увеличению продольных напряжений на 40 % по отношению к прокатке изотропной среды. Выявлено, что при прокатке анизотропной стали коэффициент вытяжки оказывается несколько ниже, чем при прокатке изотропной полосы.

8. В условиях действующего производства ООО «ВИЗ-Сталь» (группа компаний НЛМК) исследовано изменение параметров плоскостности тонколистовой трансформаторной стали во время операций холодной прокатки и термической обработки.

9. Установлено, что ухудшение плоскостности проката из трансформаторной стали в значительной степени обусловлено термическими деформациями полосы, которые реализуются в металле во время отжига рулонов в колпаковых печах, выполнена количественная оценка этих деформаций.

10. Показано, что причиной формирования термических деформаций при отжиге трансформаторной стали является наличие значительных градиентов в температурном поле рулона. Предложен и экспериментально опробован способ измерения температурных градиентов рулона при отжиге в колпаковых печах.

11. Разработана математическая модель холодной прокатки трансформаторной стали на основе уточненных сведений о механических свойствах обрабатываемого материала. Модель адаптирована для условий прокатки на действующем реверсивном стане и обеспечивает высокую

точность при определении энергосиловых параметров. Модель использована для оптимизации действующего режима холодной прокатки.

12. Предложен новый, оптимизированный режим холодной прокатки трансформаторной стали, обеспечивающий получение полос с уменьшением величины коэффициента вытяжки полосы от кромок к центру по параболическому закону. Новый режим позволяет частично скомпенсировать термические деформации при высокотемпературном отжиге и значительно улучшить плоскостность готовой продукции. Разработанный режим прокатки принят к использованию в действующем производстве ООО «ВИЗ-Сталь» (группа компаний НЛМК).

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

*Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:*

1. Puzanov M.P. Influence of properties anisotropy on stress-deformed state at rolling stripes from electrical steel / Y.N. Loginov, **M.P. Puzanov** // Chernye Metally. – 2018. – Iss. 10. – P. 22-27; 0,50 п.л./ 0,25 п.л. *(Scopus*).

2. Puzanov M.P. Finite element modeling of the upsetting of an anisotropic cylindrical workpiece / Yu.N. Loginov, **M.P. Puzanov** // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1915. – P. 040033-1–040033-5; 0,63 п.л. / 0,32 п.л. *( Web of Science и Scopus*).

3. Puzanov M.P. Reducing the edge deformation of thin electrical steel sheet / Yu.N. Loginov, **M.P. Puzanov**, A.G. Uritskii // Steel in Translation. – 2017. – Vol. 47. – Iss. 4. – P. 267–273; 0,88 п.л. / 0,29 п.л. *(Scopus*).

4. Puzanov M.P. Formation of internal structure in the rolling of a bcc (110)[001] single crystal / A.A. Redikul’tsev, A.G. Uritskii, **M.P. Puzanov**, A.S. Belyaevskikh // Steel in Translation. – 2017. – Vol. 47. – Iss. 3. – P. 165–171; 0,88 п.л. / 0,22 п.л. *(Scopus*).

5. Puzanov M.P. Evaluating the flow stress of electrical steel under cold rolling in terms of the strain-rate hardening effect / V.D. Solovei, Yu.N. Loginov **M.P. Puzanov** // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785. – P. 040075-1–040075-4; 0,50 п.л. / 0,17 п.л. (*Web of Science и Scopus*).

6. Пузанов М.П. Силовой и скоростной режимы холодной прокатки трансформаторной стали / Ю.Н. Логинов, **М.П. Пузанов**, В.Д. Соловей // Сталь. – 2017. – № 8. – С. 30-33 (0,50 п.л. / 0,17 п.л.).

7. Пузанов М.П. Моделирование процесса осадки цилиндрической заготовки при использовании условия текучести Хилла / Ю.Н. Логинов, **М.П. Пузанов** // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2017. – № 9. – С. 11-16 (0,75 п.л./ 0,38 п.л.).

8. Пузанов М.П. Влияние формы нейтрального сечения в очаге деформации на расчетное давление при холодной прокатке / Ю.Н. Логинов, **М.П. Пузанов** // Сталь. – 2016. – № 11. – С. 36-40 (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).

9. Пузанов М.П. Влияние диаметра прокатных валков на магнитные свойства электротехнической анизотропной стали / **М.П. Пузанов**, В.А. Шилов, А.М. Михайленко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57. – № 9. – С. 63-64 (0,33 п.л. / 0,11 п.л.).

*Публикации в других изданиях:*

10. Пузанов М. П. Вывод уравнения пластичности Хилла для тонколистовой электротехнической стали / **М.П. Пузанов** // Сборник научных трудов XIX Международной научно-технической уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ. – 2018. – С. 318-321 (0,2 п.л.).

11. Пузанов М.П. Исследование кинематики очага деформации при холодной прокатке кремнистой стали с различным натяжением / Д.Д. Хаматов, Ю.Н. Логинов, **М.П. Пузанов** // Сборник научных трудов IV Международной конференции «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ». – Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН. – 2018. – С. 445-447 (0,13 п.л. / 0,04 п.л.).

12. Пузанов М.П. Влияние натяжения полосы на положение нейтрального сечения при холодной прокатке кремнистой стали / **М.П. Пузанов**, Ю.Н. Логинов, Д.Д. Хаматов // Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции «Magnitogorsk Rolling Practice». – Магнитогорск: МГТУ. – 2018. – С. 20-21 (0,15 п.л. / 0,05 п.л.).

13. Пузанов М.П. Параметры нейтрального сечения при холодной листовой прокатке кремнистой стали / **М.П. Пузанов**, Ю.Н. Логинов // Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции «Magnitogorsk Rolling Practice». – Магнитогорск: МГТУ. – 2018. – С. 110-112 (0,07 п.л. / 0,04 п.л.).

14. Пузанов М.П. Моделирование процесса осадки анизотропной цилиндрической заготовки методом конечных элементов / Ю.Н. Логинов, **М.П. Пузанов** // Сборник научных трудов XI Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург: УрО РАН ИМАШ. – 2017. – С. 5 (0,10 п.л. / 0,05 п.л.).

15. Пузанов М.П. Исследование анизотропии механических свойств в холоднокатаном состоянии / **М.П. Пузанов**, С.И. Степанов // Сборник научных трудов XVIII Международной научно-технической уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ. – 2017. – С. 562-566 (0,63 п.л. / 0,32 п.л.).

16. Пузанов М.П. Оценка сопротивления деформации электротехнической стали при холодной прокатке с учетом скоростного упрочнения / Ю.Н. Логинов, В.Д. Соловей, **М.П. Пузанов** // Сборник научных трудов X Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург: УрО РАН ИМАШ. – 2016. – С. 15 (0,10 п.л. / 0,03 п.л.).

17. Пузанов М.П. Исследование влияния коэффициента контактного трения при холодной прокатке на форму нейтрального сечения / **М.П. Пузанов**, Ю.Н. Логинов // Труды XXII Международной научно-практической конференции «Трубы – 2016»: сборник докладов в 2 ч. – Ч. 2. – Челябинск: ОАО «РосНИТИ». – 2016. – С. 202-205 (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).

18. Пузанов М.П. Динамический механический анализ применительно к оценке упругих свойств трансформаторной стали / С.И. Степанов, **М.П. Пузанов**, Е.Н. Попова // Сборник научных трудов XVII Международной научно-технической уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ. – 2016. – С. 181-184 (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).

19. Пузанов М.П. Напряжённое состояние полосы при листовой прокатке трансформаторной стали / **М.П. Пузанов** // Сборник научных трудов XVI Международной научно-технической уральской школы-семинара металловедов-молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ. – 2015. – С. 205-207 (0,38 п.л.).

20. Пузанов М.П. Влияние величины разности вытяжек по ширине полосы при прокатке электротехнической анизотропной стали на образование дефекта геометрии «продольный надав» / **М.П. Пузанов**, Г.В. Быков, В.А. Шилов // Сборник научных трудов Международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 277-280 (0,50 п.л. / 0,17 п.л.).

Подписано в печать 06.11.2019. Формат 60x84 1/16
Бумага 80 г/м2. Цифровая печать.
Тираж 100 экз. Заказ №_____
Отпечатано в ……