

*На правах рукописи*



**САФРОНОВ Андрей Александрович**

**СНИЖЕНИЕ ОБРЫВНОСТИ ПОЛОС ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ  
АНИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ**

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Липецк 2024

Работа выполнена на кафедре «Обработка металлов давлением» в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» **БЕЛЬСКИЙ Сергей Михайлович**

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» ФГАОУ ВО Московский политехнический университет **ШАТАЛОВ Роман Львович**

Официальный оппонент:

кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научно-исследовательской деятельности, АО «Выксунский металлургический завод» **МУНТИН Александр Вадимович**

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»**

Защита диссертации состоится 26 марта 2024 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.323.01 на базе ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» и на сайте [www.stu.lipetsk.ru](http://www.stu.lipetsk.ru).

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью организации, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30, Диссертационный совет 24.2.323.01. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: d212.108.03@stu.lipetsk.ru.

Автореферат разослан «25» января 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.323.01,

д-р техн. наук, доцент

И.А. Седых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время прокатное производство в целом и холодная прокатка тонких и широких стальных полос в частности находится в зоне повышенного внимания с точки зрения повышения качества готовой продукции, снижения энергетических и материальных затрат. В связи с этим вопросы повышения стабильности процессов тонколистовой прокатки стальных полос, уменьшения потерь производства, а также расходов металла и валков становятся все более актуальными.

Особенно актуальными являются вопросы снижения обрывности полос электротехнических анизотропных сталей (ЭАС или, как их еще называют, трансформаторных) при холодной прокатке, т.к. эти стали содержат высокий процент кремния, а, следовательно, малопластичные и труднодеформируемые. Для ЭАС такие негативные технологические события, как обрывы, являются основной причиной потерь производства и повышенных расходов как металла, так и инструмента (прокатных валков).

**Цель работы и задачи исследования.** Целью представленной диссертационной работы является разработка научно обоснованных практических рекомендаций по снижению обрывности полос ЭАС при первой холодной прокатке.

Для достижения цели диссертационной работы поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ обрывности полос электротехнической анизотропной стали (ЭАС) марки ЭЗА при первой холодной прокатке;
2. Исследование фактического распределения механических свойств и температурного поля горячекатаного подката электротехнической анизотропной стали марки ЭЗА по длине и ширине;
3. Построение термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита для высококремнистой стали нитридно-медного варианта производства;

4. Разработка математической модели в виде бинарно-логистической регрессионной взаимосвязи вероятности обрыва холоднокатаных полос ЭАС с параметрами неплоскостности и профиля поперечного сечения горячекатаного подката;

5. Разработка практических рекомендаций по снижению обрывности ЭАС при первой холодной прокатке.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Выявлен характер зависимости обрывности полос электротехнической анизотропной стали (ЭАС) при первой холодной прокатке от механических свойств, геометрических параметров профиля поперечного сечения и микроструктуры горячекатаного подката; определены длины трех характерных участков ее резкого изменения: 1) 0-24% длины полосы от начала рулона; 2) 25-84% длины рулона; 3) 85-100% длины рулона.

2. Построена термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита в ЭАС нитридно-медного варианта производства для определения параметров начала выделения карбидов в прикромочных областях горячекатаного подката ЭАС.

3. Разработана математическая модель в виде бинарно-логистической регрессионной взаимосвязи вероятности обрыва холоднокатаных полос ЭАС с параметрами неплоскостности и профиля поперечного сечения горячекатаного подката:

- симметричной и асимметричной составляющей неплоскостности;
- выпуклости профиля поперечного сечения;
- смещения выпуклости профиля поперечного сечения;
- клиновидности профиля поперечного сечения;
- прикромочной клиновидности со стороны привода и обслуживания.

4. С использованием разработанной математической модели установлены допустимые диапазоны изменения величин геометрических параметров

горячекатаного подката ЭАС, превышение которых приводит к обрывности полос при первой холодной прокатке.

5. Установлено, что увеличение заданной выпуклости профиля поперечного сечения горячекатаного подката ЭАС способствует расширению допустимых диапазонов изменения его других геометрических параметров.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Разработанная бинарно-логистическая регрессия предназначена для использования технологами ЦДС ПАО «НЛМК» с целью снижения обрывности холоднокатаных стальных полос электротехнических марок стали.

2. Разработанная термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита может быть использована для оптимизации температурно-скоростных условий фазовых превращений в ЭАС и улучшения ее магнитных свойств.

3. Разработанные требования к параметрам профиля поперечного сечения горячекатаных полос применяются технологами ЦДС ПАО «НЛМК» при первой холодной прокатке полос ЭАС для снижения обрывности.

4. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы на таких металлургических предприятиях как ООО «ВИЗ-Сталь», ПАО «Северсталь», ПАО «ММК», производящих тонколистовой стальной прокат.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Методика и результаты проведенных исследований влияния параметров профиля поперечного сечения подката ЭАС на обрывность при первой холодной прокатке.

2. Методика и результаты анализа влияния неоднородности механических свойств, микроструктуры и фазового состава по длине горячекатаного подката на обрывность полос ЭАС при первой холодной прокатке.

3. Разработанная математическая модель вероятности обрыва холоднокатаных полос ЭАС при первой холодной прокатке от параметров профиля горячекатаного подката (бинарно-логистическая регрессия).

**Степень достоверности** результатов работы подтверждена сходимостью расчетных и фактических показателей технологических процессов горячей и

холодной прокатки полос ЭАС в условиях реального производства. В теоретических исследованиях использованы основополагающие принципы теории обработки металлов давлением, металловедения, а также апробированные методики математической обработки экспериментальных данных. В исследованиях использовались современное, поверенное оборудование и лицензионное программное обеспечение.

**Апробация.** Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов: Металлургия XXI столетия глазами молодых (г. Донецк, 26-27 мая 2020 г.);

2. IX Международной конференции физического и численного моделирования обработки материалов (г. Москва, 10-14 октября 2019 г.);

3. XXVI областной научно-технической конференции «Повышение эффективности металлургического производства» (г. Липецк, 29 марта 2018 г.);

4. XV всероссийская научно-практическая конференция студентов и аспирантов (г. Старый Оскол, 25-26 апреля 2018 г.);

5. VII Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (г. Суздаль, 1-5 октября 2018 г.).

**Личный вклад автора.** Выдвижение основных гипотез и их обоснование; разработка математических моделей и алгоритмов расчета; планирование и реализация экспериментальных исследований, анализ и обработка данных. Написание научных публикаций по теме диссертации, выступления с докладами на международных и российских конференциях.

**Публикации.** Опубликовано 10 работ. Из них 2 статьи в журнале, рекомендованном ВАК РФ, 4 статьи в журналах Scopus и/или Web of Science и 4 статьи в других изданиях.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, 2 приложений. Список литературы содержит 114 наименований. Работа изложена на 105 страницах, содержит 57 рисунков и 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** приведен литературный обзор на тему обрывности стальных полос при холодной прокатке. Приводится определение устойчивости процесса прокатки с точки зрения обрывности, анализ результатов современных исследований причин обрывности полос. В частности, рассмотрены причины образования трещин на кромках полос, при прокатке которых произошел обрыв. Установлено, что на обрывность полос могут оказывать влияние микроструктура подката, дефекты выплавки и горячей прокатки, неудовлетворительные механические характеристики подката, неудовлетворительный профиль поперечного сечения горячекатаных полос, а также условия холодной прокатки (коэффициент трения, удельные натяжения и т.п.). Приводится анализ некоторых методов снижения обрывности холоднокатаных полос. Отмечено, что основным методом снижения обрывности, практикуемым технологами, является адаптация процесса холодной прокатки под получаемый горячекатаный подкат за счет определенного распределения удельных натяжений между клетями станов холодной прокатки, градиентной шероховатости по длине бочки вала для снижения растягивающих напряжений на кромках, определенных профилировок валков и т.д. Также применяется схема обжатия металла в вертикальных валках станов горячей прокатки, которая позволяет минимизировать образование дефектов «рванина» и «прокатная плена». Дополнительно проведен анализ методов предупреждения обрывов. На данный момент основным методом предупреждения обрывов остаются системы контроля качества поверхности полосы, определяющие поверхностно видимые дефекты и передающие информацию на дальнейшие переделы. На основании полученных результатов сформулированы цель и задачи исследования. При постановке задач исследования

учтен факт отсутствия в открытом доступе результатов исследований влияния микроструктуры металла кромок полосы на обрывность; также отсутствуют в открытом доступе результаты исследований влияния распределения параметров профиля поперечного сечения по длине горячекатаного подката на обрывность холоднокатаных полос.

**Во второй главе** обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведены результаты определения длин участков горячекатаной полосы, наиболее подверженных обрывности на основании данных систем автоматической фиксации обрывов. Рисунок 1 показывает, что наибольшее количество обрывов происходит на головных участках полос. Доля обрывов составляет 6-7% на первых 5% длины полосы и плавно падает практически до 0% к 24% длины полосы. В центральной части полосы (от 25% до 84% длины) обрывы практически не наблюдаются. На хвостовом участке полосы, начиная с 85%, наблюдается рост доли обрывов примерно с 0% до 2,5%. В дальнейшем анализ влияния параметров профиля поперечного сечения горячекатаного подката на обрывность ЭАС при первой холодной прокатке ведется с учетом неравномерного распределения обрывов по длине.

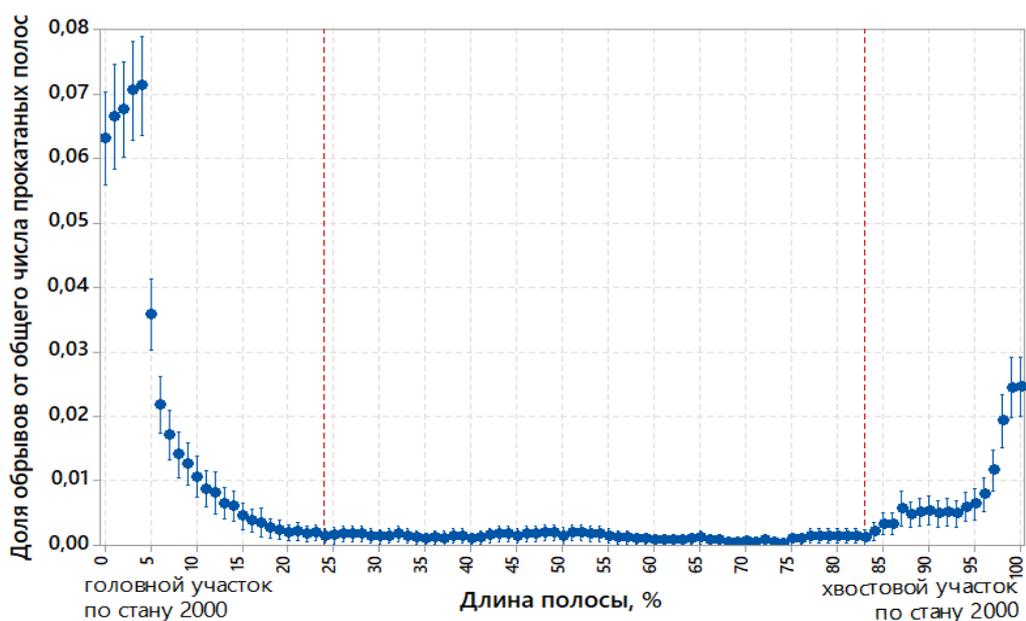


Рисунок 1 – Доля обрывов по длине горячекатаной полосы

В третьей главе приводятся результаты лабораторных исследований прочностных и пластических свойств ЭАС после горячей прокатки на стане 2000 ЦГП ПАО «НЛМК» по длине полосы для трех участков: начало, середина и конец рулона. Определяли следующие характеристики в соответствии с ГОСТ 11701: предел текучести ( $\sigma_T$ ), временное сопротивление ( $\sigma_B$ ) и относительное удлинение после разрыва ( $\delta$ ). В качестве опытных образцов использовали карточки металла текущего производства размерами 250×30 мм. Схема разделки проб указана на рисунке 2. Всего испытано 45 образцов, отобранных от трех горячекатаных рулонов разных плавок.



Рисунок 2 – Схема разделки проб ЭАС для испытаний на разрыв: нр – начало рулона; ср – середина рулона; кр – конец рулона; л – левая кромка; с – середина; п – правая кромка

По полученному распределению механических характеристик ЭАС в зависимости от места отбора по ширине и длине рулона можно отметить неравномерное распределение предела текучести и временного сопротивления по ширине полосы в пределах 5% между пробами (рисунок 3). Также было установлено, что относительное удлинение переднего концевой участка полосы на 4-6% ниже остального участка полосы. Для анализа причин неоднородности механических и прочностных характеристик по длине и ширине холоднокатаных полос был проведен анализ температурных условий прокатки ЭАС на НШСГП 2000 ЦГП (рисунки 3а,б,в,г). Для этого использовали величины температуры, измеренные установленными в линии НШСГП 2000 пирометрами LAND M2,

которые предназначены для измерения температуры конца прокатки и смотки ПОЛОСЫ В ПОТОКЕ.

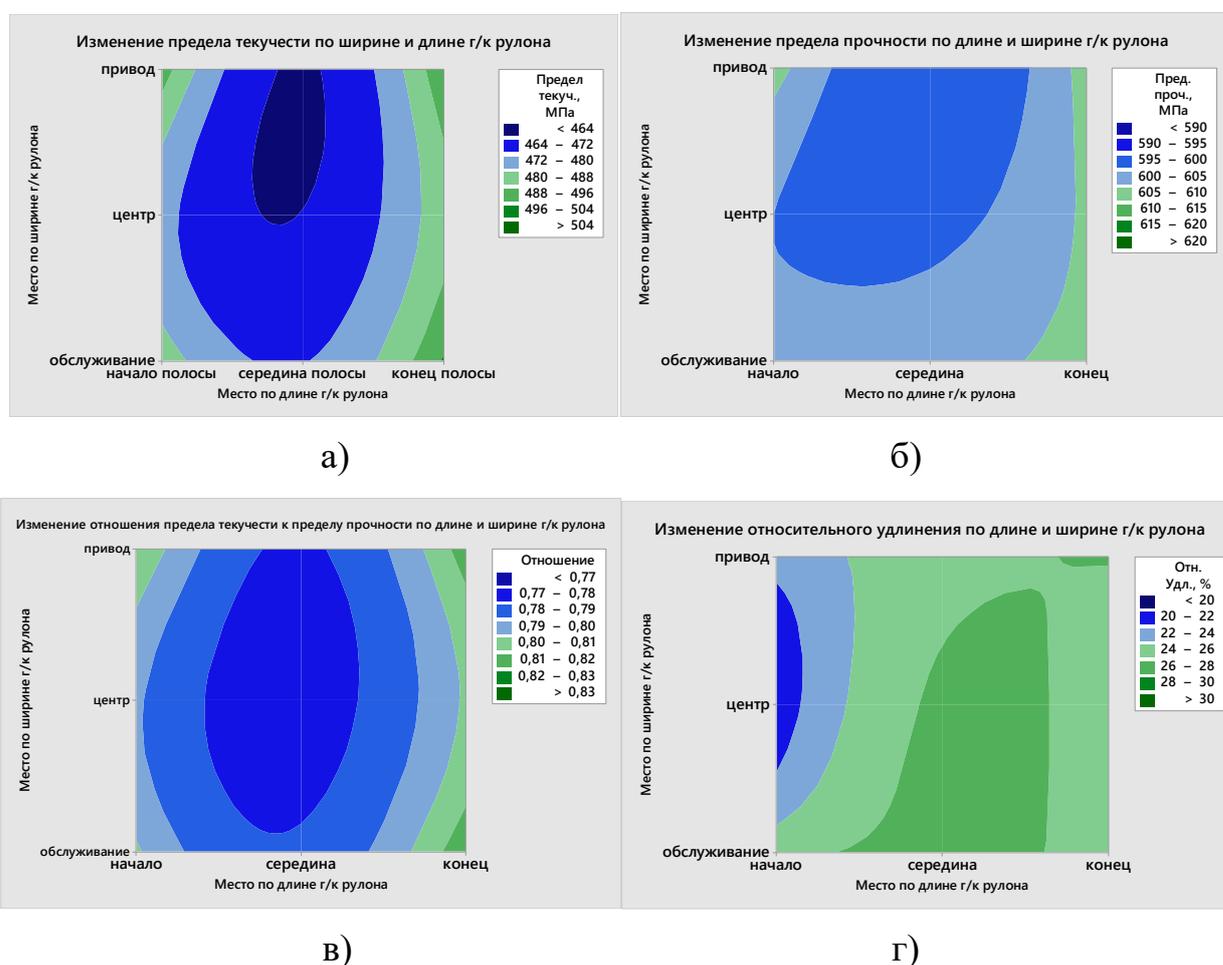


Рисунок 3 – Изменение предела текучести (а), временного сопротивления (б), их соотношения (в) и относительного удлинения (г) в зависимости от места отбора образцов горячекатаного рулона

Дополнительно провели исследование температурного профиля полос по ширине с помощью данных инфракрасной системы измерения температурного профиля SIPRO (рисунок 4). По результатам анализа установлено, что передний концевой участок длиной ~50 м выше температуры в середине полосы более чем на 50°C. В конце полосы (длина ~20 м) наблюдается обратная зависимость – температура полосы меньше более чем на 30°C. Также отмечена краевая неоднородность температуры конца прокатки по ширине. При соответствии

температуры одной кромки температуре середины полосы, вторая кромка имеет температуру ниже середины полосы более, чем на  $100^{\circ}\text{C}$ . На это могут влиять: отсутствие натяжения полосы до захвата моталками, повышенная неплоскостность правой кромки и неравномерное по длине душирование (ускорение полосы начинается после захвата полосы моталкой). В совокупности это может приводить как к разному структурному состоянию металла по длине и ширине полос, так и к выделению вторых фаз (карбидов) в теле или по границам зерен.

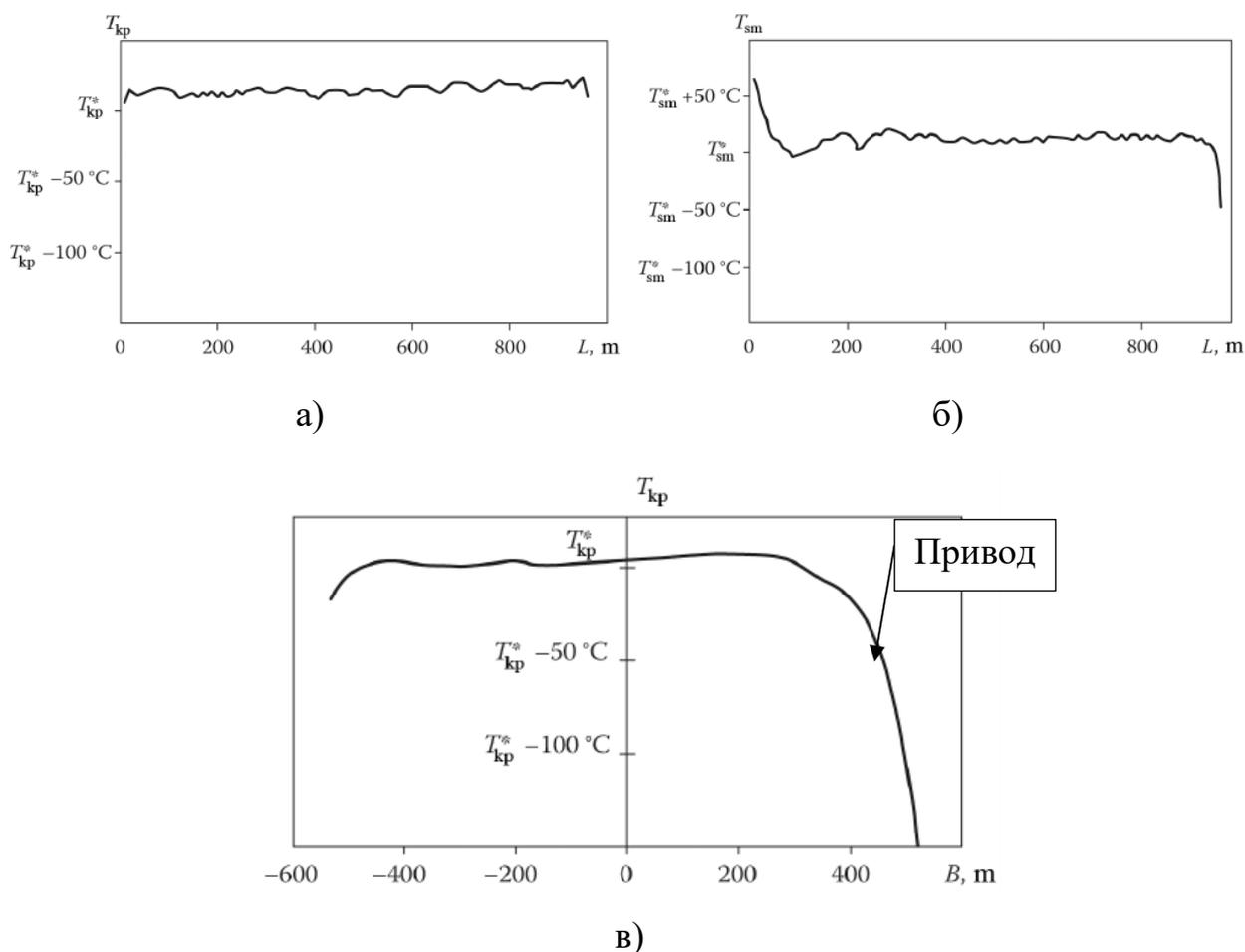


Рисунок 4 – Температура конца прокатки (а), температура смотки (б) по длине полосы и температурный профиль конца прокатки по ширине полосы (в)

Для определения последствий различия в температуре смотки по длине рулона на микроструктурные превращения в ЭАС отобрали рулоны, имеющие максимальную и минимальную температурную неоднородность. Фактическая неоднородность температур рулонов по длине изменялась в пределах  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ . В

качестве объектов исследования выбрали средний размер зерна феррита и углеродсодержащую фазу (УСФ), которые определяли по ГОСТ 5639-82. Данные исследований сведены в таблицу 1. Результаты исследований показали, что:

1) в кромочных зонах размер приповерхностного зерна ниже более чем в 2 раза, по сравнению с образцами в середине по ширине полос, а для кромочного образца полосы №1, отобранного от начала рулона, характерно отсутствие рекристаллизованной зоны (поверхностная зона представлена нерекристаллизованными зернами с единичными равноосными);

2) углеродсодержащая фаза, расположенная строчками по границам ферритных зерен, представлена перлитом различной степени дисперсности, а также смесью перлита и неравновесной структуры типа бейнит-мартенсит;

3) во всех образцах, отобранных от середины по ширине полосы, преобладает перлитная составляющая;

4) интенсивное выделение карбидов в виде тонких игл наблюдается преимущественно в образцах, отобранных от начальных и концевых участков полос; в образцах, отобранных от середины (по длине) полосы, игольчатых карбидов не обнаружено;

5) для полосы №1 в конце рулона характерно отсутствие карбидов в середине по ширине, что может быть вызвано различными условиями охлаждения (скорость охлаждения ниже, чем для полосы №2, на что указывает отсутствие выделений неравновесной структуры).

Согласно полученным данным именно отсутствие карбидных выделений отличает центральную часть полосы (по длине) от концевых участков, в которых обрывность в разы выше. Влияние выделившихся карбидов на обрывность выражается в скоплении дислокаций, вследствие чего на поверхности начнут образовываться множественные микротрещины, что и приводит к обрыву.

Таблица 1 – Результаты исследований образцов ЭАС по длине и ширине горячекатаных рулонов с отклонением от температуры смотки

№ полосы	Положение по ширине	Положение по длине		
		Начало	Середина	Конец
Отклонение температуры смотки от целевой				
Полоса 1	-	+50 °С	0 °С	-30 °С
Полоса 2	-	+20 °С	0 °С	-15 °С
Размер поверхностного зерна феррита				
Полоса 1	Середина	36,9	35,25	40,9
	Кромка	0	11,3	20,4
Полоса 2	Середина	37,35	39,75	38,9
	Кромка	20,1	12,05	18,35
Углеродсодержащая фаза <sup>1)</sup>				
Полоса 1	Середина	К + П + Н	П	П
	Кромка	Уч-ки К + П + ед. уч-ки Н	П + Н	К + П
Полоса 2	Середина	К + П + Н	П + ед. уч-ки Н	К + П + ед. уч-ки Н
	Кромка	К + П + Н	П + Н	К + П + Н

Примечание: <sup>1)</sup> – К – игольчатые карбиды; П – перлит; Н – неравновесная структура (бейнит-мартенсит).

Для определения фазовых превращений в стали вследствие различной скорости охлаждения были проведены испытания на Дилатометре фирмы DIL 805/AD. Для исследования изготовили образцы квадратного сечения размерами 15x5x5 мм. Исследования проводили в вакууме. Нагрев образцов проводили до температуры 1150°С в течение 225 секунд и выдержку при этой температуре в течение 300 с. Охлаждение со скоростью 10°С/с осуществляли до температуры 920 °С с небольшой выдержкой перед ускоренным охлаждением в течение 10 с.

Охлаждение осуществляли со скоростью: 0,5, 1, 3, 5, 10, 20, 28, 50 °C/с. Схема испытаний на dilatометре изображена на рисунке 5.

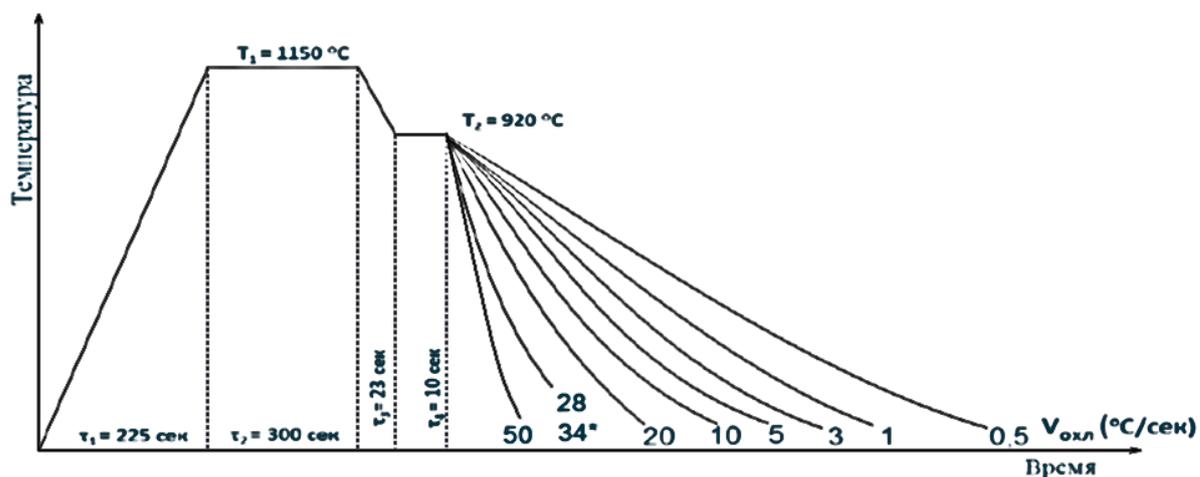


Рисунок 5 – Схема испытания образцов ЭАС на dilatометре

Влияние деформации на микроструктуру при различных скоростях деформации исследовали на комплексе Gleeble 3800 (Польша, Ченстоховский политехнический университет), который позволяет выполнять испытания на сжатие. Образцы для испытаний на установке Gleeble 3800 имели прямоугольное сечение размерами 20x15x10 мм.

По результатам исследований была построена термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита для ЭАС (рисунок 6). Выделенные области на диаграмме отражают процесс фазовых превращений. Полученная диаграмма показывает, что:

1) при охлаждении ЭАС на воздухе ( $\sim 20 \pm 2^\circ\text{C}/\text{с}$ ) до температур  $640^\circ\text{C}$  происходят фазовые превращения ЭАС без выделения вторых фаз, однако дальнейшее снижение температуры с такой скоростью до температур смотки (в области  $550\text{-}600^\circ\text{C}$ ) приводит к образованию высокой плотности вторых фаз даже с учетом дальнейшего охлаждения в рулоне;

2) с учетом ламинарного охлаждения, при котором скорость охлаждения увеличивается выше  $25^\circ\text{C}/\text{с}$ , температура начала выделения вторых фаз в виде карбидов выше установленной для ЭАС температуры смотки (в области  $550\text{-}$

600°C), отсутствуют выделения карбидов, а так как дальнейшее остывание происходит в рулоне, то исключается возможность их образования.

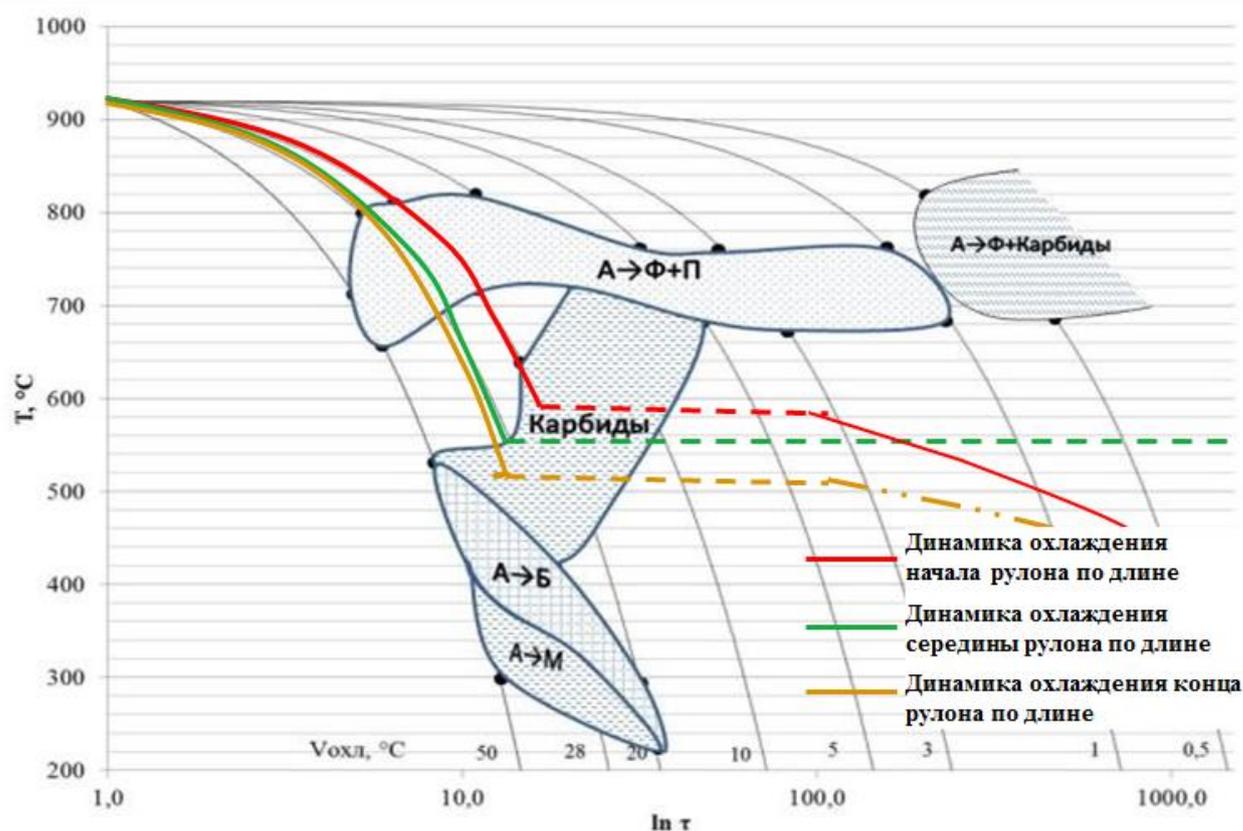


Рисунок 6 – Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита в трансформаторной стали

Полученные данные согласуются с результатами исследования механических и прочностных свойств по длине рулонов: относительное удлинение переднего конца ниже в среднем на 5% вследствие выделения вторых фаз.

**В четвертой главе** проведено исследование параметров профиля поперечного сечения полос электротехнической анизотропной стали, влияющих на обрывность при холодной прокатке на стане 1400 ЦДС. Для выявления возможных закономерностей повышенной обрывности трансформаторной стали на стане 1400 ЦДС провели статистический анализ влияния параметров профиля поперечного сечения горячекатаной полосы на обрывность с помощью программного обеспечения MiniTab. Для этого разделили всю длину полосы на 3 зоны: головной

участок (с 0% до 24%), центральный участок (с 25% до 84%) и хвостовой участок (с 85% до 100%). Провели сравнительный анализ параметров профиля поперечного сечения в зонах по длине горячекатаной полосы при ее делении по признаку обрыва (рисунок 7). Был выявлен сдвиг средних значений вниз по параметрам плоскостности (ASYM и SYM) на головном участке полос с обрывом относительно полос без обрывов; также было выявлено, что на всех участках полос с обрывом относительно полос без обрывов коэффициент детерминации меньше, а прикромочная клиновидность с обеих сторон во всех зонах выше. Для каждого отдельного параметра проведена проверка «нулевой» гипотезы об отсутствии отличий параметров внутри каждой выделенной зоны. Результат оценивали по медианным значениям и по размаху выборки, т.к. распределение данных отличается от нормального. Для всех параметров полосы оказалась справедлива альтернативная гипотеза об отличии параметров между собой, т.к.  $p\text{-value} < 0,05$ .

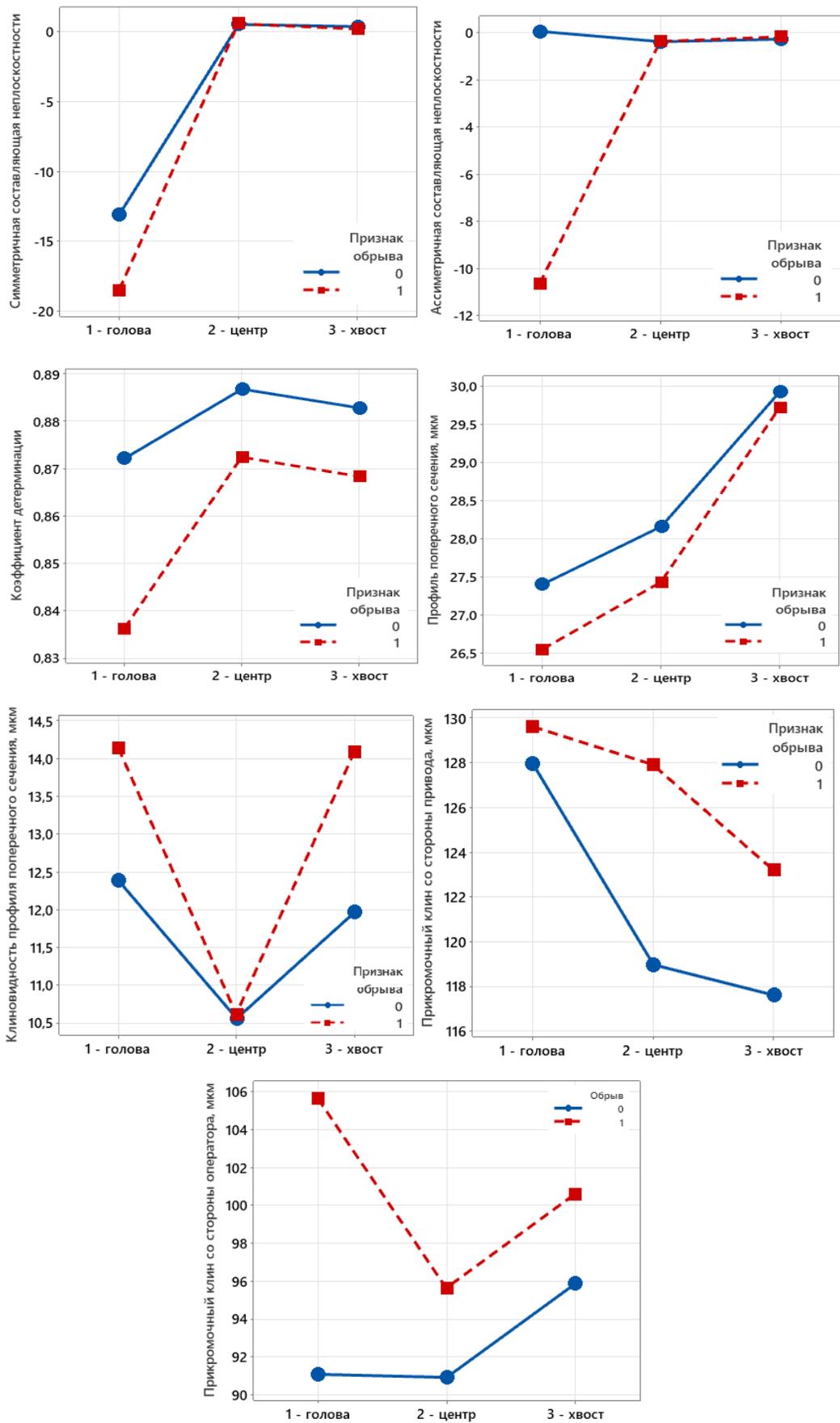


Рисунок 7 – Сравнительный анализ параметров горячекатаной полосы по зонам для рулонов с обрывом и без.

С учетом того, что на переднем концевом участке полосы число обрывов самое большое, для него была построена математическая модель вероятности обрыва ( $P$ ) ЭАС при первой холодной прокатке в зависимости от параметров профиля поперечного сечения горячекатаной полосы (формула 1). Модель основана на бинарно-логистической регрессионной зависимости (рисунок 8), описываемой по формуле 2, и позволяет прогнозировать 80% обрывов, что для данного рода моделей является высоким показателем. Все факторы в модели имеют статистическую значимость. Полученную модель рекомендовано использовать для прогнозирования вероятности обрыва полос ЭАС марки ЭЗА при прокатке на стане 1400 ЦДС (таблица 2).

$$\begin{aligned}
 Y = & a_0 + a_1 F_a + a_2 F_s + a_3 C + a_4 D + a_5 W_{co}^{rs} + a_6 W_{cd}^{rs} + a_7 W + a_8 R_{sq} + \\
 & a_9 F_a^2 + a_{10} F_s^2 + a_{11} C^2 + a_{12} D^2 + a_{13} W^2 + a_{14} CD + a_{15} CW_{cd}^{rs} + a_{16} CR_{sq} + \\
 & a_{17} DR_{sq} + a_{18} W_{cd}^{rs} R_{sq} + a_{19} F_s^3 + a_{20} C^2 W_{cd}^{rs} + a_{21} CW_{cd}^{rs} R_{sq}
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $F_a$  и  $F_s$  – ассиметричная и симметричная составляющая плоскостности соответственно, I-Unit (1 I-Unit = 10 мкм/м = 10<sup>-5</sup>);  $C$  – выпуклость профиля, мкм;  $D$  – смещение выпуклости, мкм;  $W$  – клиновидность профиля, мкм;  $W_{co}^{rs}$  и  $W_{cd}^{rs}$  – прикромочная клиновидность со стороны обслуживания и со стороны привода соответственно, мкм;  $R_{sq}$  – коэффициент детерминации профиля.

$$P = \frac{e^Y}{1+e^Y} \quad (2)$$

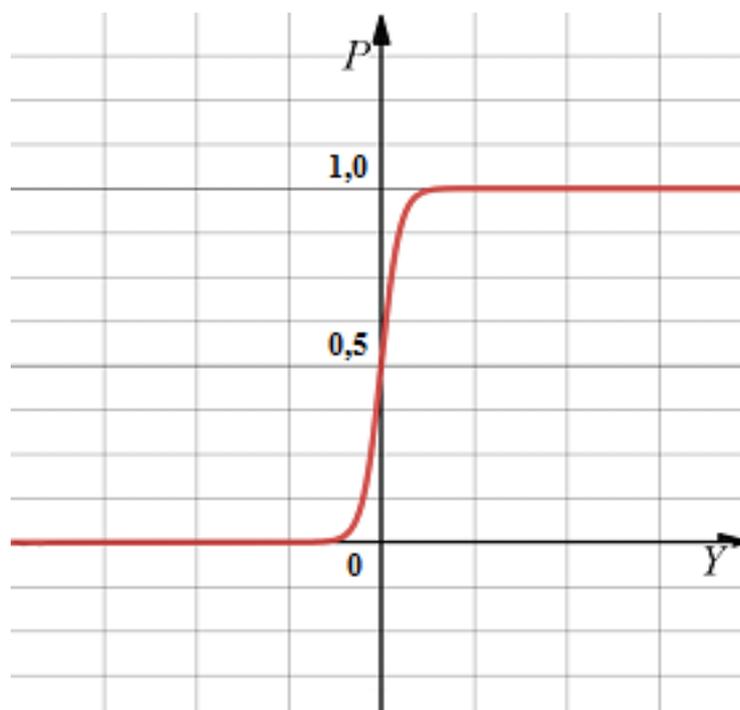


Рисунок 8 – Общий вид кривой распределения вероятности обрыва полосы от параметров профиля поперечного сечения

Таблица 2 – Коэффициенты регрессионной модели вероятности обрыва переднего конца полосы для стали марки ЭЗА

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение
a0	16.9976	a8	-62.5510	a16	0.9836
a1	-0.0378	a9	0.0031	a17	0.3030
a2	-0.0523	a10	0.0032	a18	0.5489
a3	0.82395	a11	-0.0290	a19	0.000031
a4	-0.1936	a12	0.0005	a20	0.000085
a5	0.0407	a13	-0.0034	a21	-0.0154
a6	-0.3742	a14	-0.0016	-	-
a7	0.2104	a15	0.0078	-	-

По результатам анализа были определены оптимальные параметры, способствующие минимизации обрывности переднего концевой участка полосы (таблица 3). Графическое представление оптимальных диапазонов приведено на рисунке 9.

Таблица 3 – Оптимальные диапазоны параметров профиля полосы, способствующие минимизации обрывов на стане 1400 ЦДС

Параметр	Нижняя граница	Оптимум	Верхняя граница
ASYM	-20	0	25
SYM	-20	0	25
R2	0,92	0,94	-
Выпуклость профиля	35	40	45
Смещение выпуклости	-80	-15	10
Клиновидность	-7	0	7
ПК СО	-	80	125
ПК СП	-	80	125

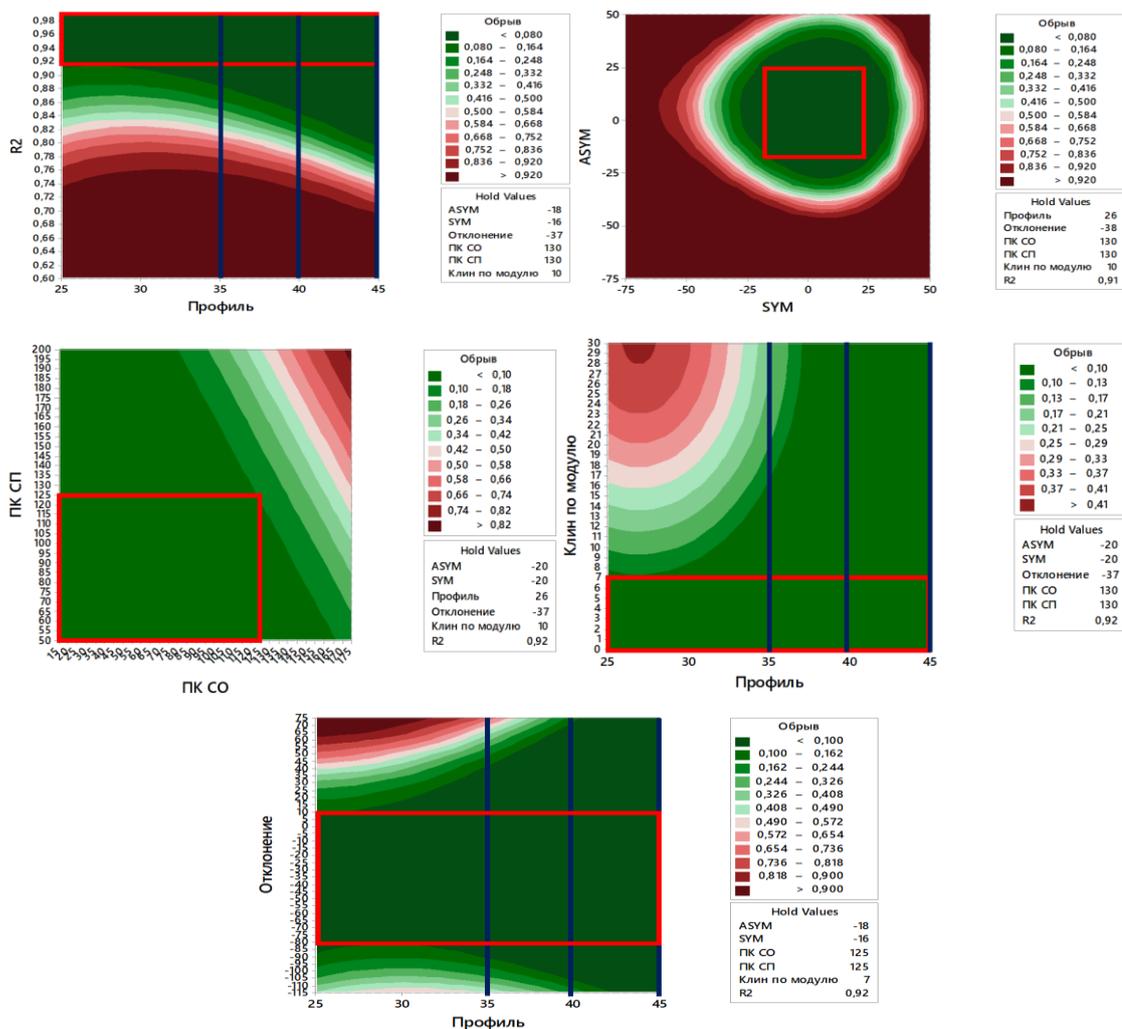


Рисунок 9 – Оптимальный диапазон параметров переднего концевой участка горячекатаной полосы для снижения обрывности.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ обрывности полос ЭАС при первой холодной прокатке горячекатаного подката на стане 1400 ЦДС ПАО «НЛМК». Методом статистического анализа установлено, что частота обрывов по длине участков горячекатаного подката ЭАС значительно отличается; определены длины трех характерных участков ее резкого изменения: 1) 0-24% длины полосы от начала рулона; 2) 25-84% длины рулона; 3) 85-100% длины рулона. На переднем и заднем концевых участках обрывность полос ЭАС при ее прокатке на стане 1400 ЦДС более чем в 5 раз выше по сравнению со средней частью прокатываемых полос.

2. Проведено исследование распределения механических характеристик по длине горячекатаного подката ЭАС. На переднем концевом участке значительно ниже относительное удлинение  $\delta_4$  (в среднем относительное удлинение составляет 20-22% для переднего конца полосы против 24-28% для хвостового конца полосы).

3. Проведено исследование структурных превращений в ЭАС с помощью лабораторных комплексов Gleeble 3800 и Дилатометр DIL 805A/D. Построена термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита. Отмечено, что в области температур 600-640°C при скорости охлаждения  $20 \pm 2^\circ\text{C}/\text{сек}$  в металле происходят превращения, связанные с выделением вторых фаз. При повышении скорости охлаждения до  $28-30^\circ\text{C}/\text{сек}$  начало превращения смещается в область температур 500-550°C. Вторые фазы (карбиды), выделившиеся в головных и хвостовых участках прокатываемых полос, способствуют повышенной обрывности.

4. Проведен статистический анализ влияния параметров профиля горячекатаного подката на обрывность ЭАС при ее первой холодной прокатке на стане 1400 ЦДС для 3-х отдельных участков: голова (0-24% от длины), середина (25-84% длины), хвост (85-100% длины). Выявлен сдвиг среднего значения вниз по параметрам плоскостности (ASYM и SYM) на головном участке полосы на полосах с обрывом. Также выявлено, что на всех участках на полосах с обрывом коэффициент детерминации меньше, а прикромочная клиновидность с обеих

сторон во всех зонах выше. Разработана математическая бинарно-логистическая модель вероятности обрыва переднего конца полос ЭАС марки ЭЗА в зависимости от параметров профиля горячей прокатки. Точность модели составила 80%, что является для данного вида регрессионных зависимостей высоким показателем.

5. С целью снижения обрывности полос ЭАС марки ЭЗА разработаны следующие практические рекомендации:

– в Техническую дирекцию дивизиона «Электротехническая сталь» ПАО «НЛМК» переданы требования к параметрам профиля горячекатаной полосы, способствующие минимизации обрывов ЭАС при первой холодной прокатке (Приложение 2). Основные требования предъявляются к следующим параметрам профиля: прикромочная клиновидность со стороны привода и обслуживания (до 125 мкм), симметричной и ассиметричной составляющей плоскостности полосы ( $-20 \div 25$  I-Units), коэффициент детерминации профиля (не менее 0,92), выпуклость профиля (35-45 мкм), смещение выпуклости ( $-80 \div 10$  мкм) и клиновидность профиля ( $-7 \div 7$  мкм).

– для исключения выделения вторых фаз (карбидов) на концевых участках полос ЭАС при ее охлаждении на отводящем рольганге стана 2000 ЦГП, снизить длину недушируемого переднего конца и увеличить длину заднего недушируемого конца полосы.

**Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

**Публикации в изданиях, рекомендованные ВАК РФ:**

1. Сафронов, А. А. Анализ возможностей процесса докатки концевых участков полос электротехнической анизотропной стали при первой холодной прокатке / А. А. Сафронов, С. М. Бельский, И. И. Шопин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 7. – С. 467-470. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-467-468.

2. Сафронов, А. А. Влияние распределения механических свойств и толщины горячекатаных полос из электротехнической анизотропной стали на стабилизацию холодной прокатки / А. А. Сафронов, И. И. Шопин, С. М. Бельский // Metallurg. – 2022. – № 12. – С. 49-52. – DOI 10.52351/00260827\_2022\_12\_49.

**Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus / Web of Science:**

3. Safronov, A.A. Influence of the Variation of Mechanical Properties and Thickness in Hot-Rolled Strips of Electrical Anisotropic Steel to Stabilize Cold Rolling / A. A. Safronov, I.I. Shopin, S.M. Belskiy // Metallurgist. – 2023. - № 66. – P. 1557–1561. - DOI <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01470-y>.

4. Safronov, A. Study of the microstructure of electrotechnical anisotropic steel with accelerated cooling / A. Safronov, S. M. Belsky, A. Filatov // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 37. – P. 236-238. – DOI 10.1016/j.promfg.2019.12.041.

5. Modeling of temperature influence on resistance to plastic deformation of electrotechnical steels in hot rolling / A. A. Safronov, S. M. Belskiy, V. A. Chernyj, I. P. Mazur // Journal of Physics: Conference Series, Suzdal, 01–05 октября 2018 года. Vol. 1134. – Suzdal: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 012050. – DOI 10.1088/1742-6596/1134/1/012050.

6. Belskiy, S. M. Improving efficiency of rolling production by predicting negative technological events / S. M. Belskiy, I. I. Shopin, A. A. Safronov // Diffusion and Defect Data. Pt A Defect and Diffusion Forum. – 2021. – Vol. 410 DDF. – P. 96-101. – DOI 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.96.

### **Публикации в РИНЦ:**

7. Сафронов, А. А. Исследование влияния температуры на диаграмму напряжение-деформация при горячей деформации трансформаторной стали / А. А. Сафронов, С. М. Бельский // Повышение эффективности металлургического производства : сборник тезисов докладов XXVI областной научно-технической конференции, г. Липецк, 29 марта 2018 г. – Липецк, 2018. – С. 35-37.

8. Сафронов, А.А. Исследование зависимости напряжение-деформация от температуры деформации трансформаторной стали на GLEEBLE 3800 / А.А. Сафронов, С.М. Бельский // XV всероссийская научно-практическая конференция студентов и аспирантов, г. Старый Оскол, 25-26 апреля 2018 г.: Том I. - Старый Оскол, 2018. – С. 92-94.

9. Сафронов, А.А. Реологическое поведение металла в условиях сверхпластичности / А.А. Сафронов, В.С. Коморов // Всероссийская научно-практическая заочная конференция с международным участием: сборник научных трудов, г. Ульяновск, 25 ноября 2018 г. - Ульяновск, 2018. – С. 317-320.

10. Сафронов, А. А. Об уменьшении расхода электротехнической анизотропной стали при первой холодной прокатке / А. А. Сафронов, С. М. Бельский, И. И. Шопин // Металлургия XXI столетия глазами молодых : Материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов: сборник докладов, г. Донецк, 26–27 мая 2020 г. / Редкол. С.М. Сафьянц. – Донецк, 2020. – С. 155-159.