

На правах рукописи



**Барабошкин Кирилл Алексеевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ ГРУППЫ ПРОЧНОСТИ  
K55 С ЗАДАНЫМ КОМПЛЕКСОМ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Череповец – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет»

Научный руководитель: **Адигамов Руслан Рафкатович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, машиностроения и технологического оборудования, ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет»

Официальные оппоненты: **Шаталов Роман Львович**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

**Мунтин Александр Вадимович**  
кандидат технических наук, директор Инженерно-технологического центра АО «Выксунский металлургический завод»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Защита состоится «18» декабря 2024 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.078.02 (Д.002.060.02), созданного на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, БКЗ.

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

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский пр., д. 49, Диссертационный совет 24.1.078.02 (Д.002.060.02). Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: [andreev.imet.dis@mail.ru](mailto:andreev.imet.dis@mail.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ »

2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук



Андреев В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Основными производителями обсадных труб группы прочности K55 по API 5CT являются трубопрокатные заводы, изготавливающие трубы бесшовным способом по технологии выплавка заготовки и последующая нормализующая прокатка. Отличием производства сварных труб от бесшовных является условие формоизменения при котором происходит пластическое деформирование, состоящее в преобразовании плоской заготовки в трубу, когда образуются дислокации, которые приводят к изменению механических свойств. Для компенсации вклада дислокаций в упрочнение стали и получения требуемых механических свойств производители сварных труб вынуждены использовать термическую обработку труб, которая приводит к снижению производительности и удорожанию процесса производства. Для решения задачи получения механических свойств в трубе, сохранения производительности и стоимости продукции (не прибегая к использованию дополнительной термообработки) были исследованы влияния химического состава, режимы производства на НШПС и ТЭСА, а так же процессы связанные с изменением механических свойств при изготовлении труб.

**Степень разработанности темы исследования.** Большой объём, исследований трубных сталей проведен как отечественными (М.Ю. Матросов, Ю.И. Матросов, Д.Ю. Морозов, А.А. Кичкина, Н.Г. Колбасников, В.М. Фарбер, Л.И. Эфрон, А.Г. Ширяев, И.Ю. Пышминцев и др.), так и зарубежными авторами (Davies R. J., Zhang Q., Baker, T. N., Manabu Takahashi, Belato Rosado D. и др.). Результаты исследований образования структур и формирования свойств элетросварных труб в процессе охлаждения после прокатки и микроструктурного состояния проката, проведенных с использованием различных методик, вошли в нормативные документы, связанные с технологическим процессом производства металлопроката. Они представлены в работах М.Ю. Матросова, Ю.И. Матросова, Д.Ю. Морозова, А.А. Кичкиной, В.М. Фарбера и других ученых.

Необходимо признать, что до сих пор при исследовании трубных сталей большое внимание уделялось изучению макроструктуры и механических свойств при различных термических и механических воздействиях во время производства металлопроката. В тоже время, такие важные параметры формирования структуры и свойств электросварных труб после воздействия на него пластических деформаций (формовка) в процессе трубного передела по технологии формовки труб непрерывным методом, пока не были достаточно исследованы. Слабо освещены вопросы взаимосвязи воздействия на него пластических деформаций (формовка) в процессе трубного передела по технологии формовки труб непрерывным методом на конечные свойства электросварных труб в связке с анализом условий охлаждения после прокатки и микроструктурного состояния проката. Сказанное выше определяет актуальность постановки настоящих исследований. Это позволило сформулировать рекомендации по технологическим параметрам производства как в процессе прокатки и охлаждения металлопроката, так и в последующем процессе трубного передела по технологии формовки труб непрерывным методом.

**Целью диссертационной работы** являлось установление закономерности изменения механических свойств электросварных труб в процессе их производства на основании анализа влияния химического состава, технологии прокатки на непрерывном широкополосном стане, микроструктурного состояния проката, а также воздействия на него пластических деформаций в процессе трубного передела для разработки сквозной технологии производства сварных труб группы прочности K55 по API 5CT.

**Объектом исследования** технология изготовления рулонного проката на НШПС и трубы на ТЭСА группы прочности K55 по API 5CT.

**Предмет исследования** химический состав, режимы прокатки и охлаждения на НШПС, их влияние на формирование микроструктуры проката, а так же технология изготовления труб, возникающие пластические деформации и изменение механических свойств стали группы прочности K55 по API 5CT при формовке.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Изучение влияния параметров технологии изготовления трубы на ТЭСА и возникающих пластических деформаций на изменение механических свойств стали и определение целевого уровня механических свойств проката для изготовления труб группы прочности K55;

2. Исследование влияния величины деформации на ТЭСА на изменение механических свойств стали. Разработка физической модели прогнозирования механических свойств в трубе;

3. Исследование влияния химического состава, режимов прокатки и охлаждения на НШПС для формирования микроструктуры и механических свойств стали для производства рулонного проката группы прочности K55 по API 5CT;

4. Разработка промышленной технологии проката и рекомендаций по изготовлению сварных труб группы прочности K55 по API 5CT.

**Научная новизна:**

1. Разработана методика прогнозирования величины изменения предела текучести и временного сопротивления разрушению труб в зависимости от степени деформации на трубоэлектросварочном агрегате, позволяющая определить уровень механических свойств горячекатаной полосовой стали исходя из величины их прироста на трубном переделе. Выявлено, что окончательное формирование механических свойств металла происходит в результате пластической деформации на трубном переделе, в связи с этим рулонный прокат должен иметь низкое значение предела текучести и высокое значение временного сопротивления. Например, для получения заданного комплекса механических свойств основного металла труб размером 168×8,9 мм из стали группы прочности K55, деформируемых на трубоэлектросварочном агрегате со степенью 2–4%, предел текучести рулонного проката должен быть не более 410 МПа, предел прочности – не менее 655 МПа.

2. Получена математическая зависимость между величиной изменения предела текучести металла в результате трубного передела и процентным содержанием в стали углерода, показавшая, что снижение содержания углерода ведет к снижению прироста предела текучести.

3. Установлено, что низкое значение изменения предела текучести при трубном переделе обеспечивается равновесной феррито-перлитной микроструктурой полосовой стали после горячей прокатки, а высокое значение временного сопротивления разрушению достигается повышением процентного содержания в стали углерода и марганца.

4. Выявлено, что снижение степени деформации при формовке труб, связанное с уменьшением ширины штрипса, приводит к снижению прироста предела текучести в результате трубного передела вследствие уменьшения плотности дислокаций.

#### **Теоретическая значимость работы:**

1. Выполнено исследование величины изменения предела текучести и временного сопротивления разрушению труб в зависимости от степени деформации на трубоэлектросварочном агрегате, позволившее определить уровень механических свойств горячекатаной полосовой стали с учетом величины их прироста на трубном переделе. Выявлено, что окончательное формирование механических свойств металла происходит в результате пластической деформации на трубном переделе, в связи с этим рулонный прокат должен иметь низкое значение предела текучести и высокое значение временного сопротивления. Для получения заданного комплекса механических свойств основного металла труб размером 168×8,9 мм из стали группы прочности K55, деформируемых на трубоэлектросварочном агрегате со степенью 2–4%, предел текучести рулонного проката должен быть не более 410 МПа, предел прочности – не менее 655 МПа;

2. Выявлена зависимость между величиной изменения предела текучести металла в результате трубного передела и процентным содержанием в стали углерода, показавшая, что снижение содержания углерода ведет к снижению прироста предела текучести;

3. Установлено, что низкое значение изменения предела текучести при трубном переделе обеспечивается равновесной феррито-перлитной микроструктурой полосовой стали после горячей прокатки, а высокое значение временного сопротивления разрушению достигается повышением процентного содержания в стали углерода и марганца.

4. Выявлено, что снижение степени деформации при формовке труб, связанное с уменьшением ширины штрипса, приводит к снижению прироста предела текучести в результате трубного передела вследствие уменьшения плотности дислокаций.

#### **Практическая ценность работы:**

1. Разработан химический состав стали с увеличенным содержанием углерода до 0,37–0,40% и марганца до 1,0–1,4% для получения требуемых значений механических свойств металла в рулонном прокате и в электросварных трубах, а также для обеспечения условий свариваемости штрипсов.

2. Разработана технология горячей прокатки, обеспечивающая получение рулонного проката с равновесной феррито-перлитной микроструктурой, в которой доля перлита составляет не менее 60%, и механическими свойствами, гаран-

тирующими в дальнейшем получение труб с временным сопротивлением не менее 665 МПа, пределом текучести – от 379 до 552 МПа, относительным удлинением – не менее 19%, работой удара KV при 20 °С – не менее 27 Дж.

3. Разработаны рекомендации по применению в производстве труб малого и среднего диаметров штрипса уменьшенной ширины для обеспечения степени продольной вытяжки труб после формовки не более 1,8%, что позволяет снизить рост предела текучести в результате трубного передела. Оптимальной шириной штрипса при производстве труб размером 168×8,9 мм является ширина 519 мм.

4. Разработана сквозная технология производства электросварных труб группы прочности K55 с гарантированным комплексом механических свойств, позволяющая исключить дополнительную термическую обработку труб для компенсации вклада возникающих при формовке дислокаций в упрочнение материала и обеспечивающая получение экономического эффекта 36 млн руб. в год.

#### **Методология и методы диссертационного исследования.**

Методологической основой исследования послужили труды ведущих отечественных и зарубежных ученых в области изучения трубных сталей, зарубежные и государственные стандарты РФ, а также теоретические положения по влиянию различных технологических переделов на механические свойства сталей.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Установленные закономерности между химическим составом, микроструктурой стали и исходными механическими свойствами, полученными в процессе контролируемой прокатки и контролируемого охлаждения высокопрочного проката при производстве рулонного проката на непрерывном широкоплоском стане, а также их влияние на изменение свойств в трубном переделе при производстве труб на ТЭСА.

2. Зависимость изменения механических свойств металла трубы при формовке от величины пластической деформации на ТЭСА и исходной микроструктуры рулонного проката.

3. Разработана методика определения изменения механических свойств «рулон – труба» в процессе формовки трубы на ТЭСА.

**Содержание диссертации соответствует** областям исследований паспорта научной специальности 2.6.4 Обработка металлов давлением: 1. Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов; 2. Исследование способов, процессов и технологий обработки давлением металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования; 3. Исследование структуры, механических, физических, магнитных, электрических и других свойств металлов, сплавов и композитов в процессах пластической деформации.

**Достоверность полученных результатов** определяется проведением комплекса исследований и экспериментов на действующих станах, использованием новейших измерительных приборов и аппаратуры, современных методов исследований и корректных методов статистической обработки данных измерений и расчетов. Сформулированные научные положения отвечают современным

представлениям о природе деформирования металлов, а также согласуются с известными работами по проблемам повышения качественных показателей металлопродукции и эффективности производства.

**Личный вклад** автора состоит в постановке задач исследований, в получении основных научных результатов, в организации и проведении экспериментов, обработке и анализе их результатов, во внедрении в производство сквозной технологии производства электросварных труб группы прочности К55.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены и обсуждены на: Лауреат Металл Экспо 2020, Москва, 2020 г.; XVIII Всероссийский Конкурс молодежных авторских проектов «Моя страна – моя Россия» в номинации «Большая технологическая раведка моей страны», 2020 г.; XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов», 2022г.; Международной научно-технической конференции «МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении», Москва, 2022 г.; Всероссийской Конференции «Жизненный цикл конструкционных материалов», Иркутск, 2022 г., XIV Международный Конгресс Прокатчиков, Череповец, 2024 г., Всероссийской Конференции «Жизненный цикл конструкционных материалов», Иркутск, 2024 г.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 8 научных статей, из которых 2 статьи в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ, 2 статьи – в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, получен 1 патент на изобретение.

**Структура и объем работы.** Работа содержит 165 страниц основного текста, 79 рисунков и 44 таблицы. Состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 147 наименований, 4 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы с обоснованием актуальности темы, отражены цель работы и задачи исследования, показана ее теоретическая и практическая значимость, научная новизна, степень достоверности и разработанности.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния исследований, практика и перспективы развития вопросов формообразования рулонного проката с учетом трубного передела. На основании работ отечественных и зарубежных авторов выполнен анализ существующих технологий производства труб для стальных обсадных и насосно-компрессорных труб, используемых для нефтяных скважин в нефтяной и газовой промышленности. Освещено современное состояние вопроса изменения механических свойств стали после трубного передела. По результатам изучения состояния вопроса были сформулированы цели и задачи исследования.

**Во второй главе** представлены результаты проведенных анализов свойств высокопрочных марок сталей, производимых на ПАО «Северсталь», методики

измерения, лабораторное оборудование, использованное при проведении исследовательских работ, описаны требования к механическим свойствам стали и варианты химических составов.

Проведены расчеты и серии экспериментов с применением физического моделирования. Определены химический состав и условия производства по двум вариантам технологий. Сделаны выводы о применении технологий ГП+УО и КП с последующим охлаждением на воздухе. Определена микроструктура и условия ее формирования. Отмечено, что на  $\frac{1}{2}$  толщины полосы структура характеризуется большим размером зерна феррита. После применения технологии ГП+УО формируется структура, состоящая из полигонального и квазиполигонального феррита и достаточно большой доли углеродсодержащей фазы (что обусловлено высоким содержанием углерода в стали).

В ходе экспериментов установлено, что повышение скорости охлаждения при прочих равных условиях приводит к измельчению зерна феррита, понижение температуры смотки также приводит к измельчению зерна феррита и к увеличению доли квазиполигонального феррита.

**В третьей главе** описаны рекомендации для производства опытно-промышленной партии, результаты экспериментальных прокаток новой марки стали, сделаны выводы по результатам производства опытной партии горячекатаного рулонного проката толщиной 8,9 мм из стали марки К55 по API 5СТ на ПАО «Северсталь».

Установлено, что механические свойства рулонного проката, полностью соответствуют требованиям API 5СТ к стали группы прочности К55. Значения временного сопротивления для всех рулонов 1-ой опытной партии соответствовало требованиям API 5СТ (таблица 1).

Таблица – 1 результаты испытаний опытно-промышленной партии проката

Партия	№ рулона	Место отбора (виток)	Tсм, °С	σв, МПа	σт, МПа	δ5, %	KV+20, Дж	KV+20 ср, Дж	изгиб
29346	1	3	620	680	460	28	70, 72, 78	62	Уд
29346	1	1	620	680	450	23	62, 69, 77	69	Уд
29346	2	1	621	690	460	25	65, 70, 78	71	Уд
29346	2	3	621	680	450	24	58, 61, 65	61	Уд
29346	3	2	622	690	460	22	55, 64, 68	62	Уд
29346	3	3	622	670	430	23	59, 62, 68	63	Уд
29346	3	1	622	680	445	24	55, 59, 64	59	Уд
29346	4	2	618	700	485	24	66, 69, 73	69	Уд
29346	4	3	618	690	495	25	58, 64, 71	64	Уд

Микроструктура всех исследованных образцов опытной партии является феррито-перлитной с высокой долей второй фазы (около 20-30%) что связано с высоким содержанием углерода в стали (рисунок 1). Зерна феррита (в основном полигональной морфологии) имеют достаточно малый размер (средний размер зерна около 10мкм). С целью уточнения морфологии второй фазы, провели ис-

следование микроструктуры образцов методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). В результате проведения исследования подтверждено предположение о том, что вторая фаза представляет собой перлит.

Анализ влияния трубного передела на уровень механических свойств стали группы прочности K55 по API 5CT показал, что для всех исследованных труб временное сопротивление основного металла и сварного соединения, изготовленных из полосы опытных партий, имеет хорошие пластические свойства – значения относительного удлинения ( $\delta_5$ ) не ниже 29%. Однако уровень предела текучести металла труб оказался выше максимального уровня требований для всех исследуемых труб. В результате трубного передела предел текучести основного металла труб увеличился по сравнению с полученными результатами механических испытаний в среднем на 120-160МПа.

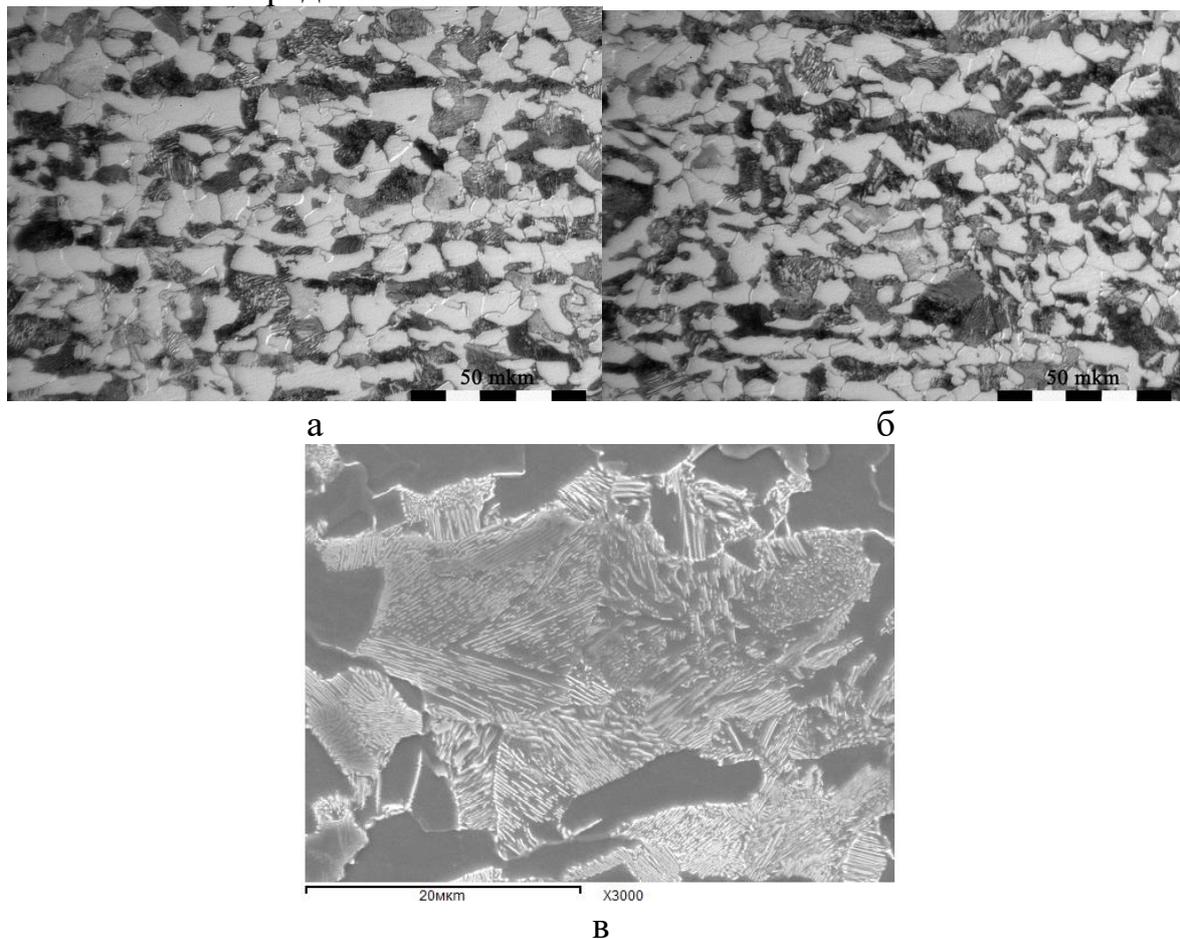


Рисунок 1 – Характерная микроструктура. Рулон № 29346-1, х400  
а)  $\frac{1}{4}$  толщины; б)  $\frac{1}{2}$  толщины; в) СЭМ, х1000

Анализ изменения предела текучести в результате трубного передела при производстве труб диаметром 168,28 мм и толщиной стенки 8,9 мм показал, что для обеспечения требуемого API 5CT для группы прочности K55 уровня предела текучести основного металла трубы, предел текучести рулонного проката должен быть менее 410МПа (Рисунок 2).

На основании анализа результатов испытаний рулонного проката и влияния трубного передела на механические свойства основного металла труб, были

даны следующие рекомендации по режимам прокатки и смотки для второй опытной партии рулонного проката из стали группы прочности K55 по API 5 CT:

Режим №1: Ткп=840-880°C (целевая 860°C)

Тсм=635-665°C (целевая 650°C)

Режим №2: Ткп=890-930°C (целевая 905°C)

Тсм=660-690°C (целевая 670°C)

Таблица 2 – Результаты механических испытаний труб  $\varnothing 168,28 \times 8,94$  мм

№ партии /№ рулона/ № штрипса	Маркировка образца	Основной металл			Сварное соединение
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\sigma_B$ , МПа
20801/ 29346-3/2	первая труба (В.В. рулона)	663	570	29	670
	средняя труба (середина рулона)	668	577	32	660
	последняя труба (Н.В. рулона)	707	591	30	680
3-й виток рулона		670	430	23	
20802/ 29346-2/11	первая труба (В.В. рулона)	673	580	29	670
	средняя труба (середина рулона)	677	574	29	670
	последняя труба (Н.В. рулона)	711	608	29	680
3-й виток рулона		680	450	24	
20803/ 29346-4/8	первая труба (В.В. рулона)	706	602	29	670
	средняя труба (середина рулона)	685	592	29	650
	последняя труба (Н.В. рулона)	709	605	30	690
3-й виток рулона		690	495	25	
20804/ 29346-1/5	первая труба (В.В. рулона)	692	594	29	660
	средняя труба (середина рулона)	682	586	29	660
	последняя труба (Н.В. рулона)	711	633	28	680
3-й виток рулона		680	460	28	
Требования по ГОСТ Р53366-09 для группы прочности K55		$\geq 655$	379-552	$\geq 17$	$\geq 655$
Требования API 5CT		$\geq 655$	379-552	$\geq 19$	

Анализ результатов механических испытаний рулонного проката показывает, что повышение температуры конца прокатки (до около 910-920°C) и температуры смотки (до около 670-680°C) привело к снижению предела текучести стали до значения 375МПа. При этом значение временного сопротивления для двух рулонов второй опытной партии оказалось ниже нижней границы требований API 5CT в среднем на 25МПа. Значения относительного удлинения и работы удара соответствуют требованиям API 5CT.

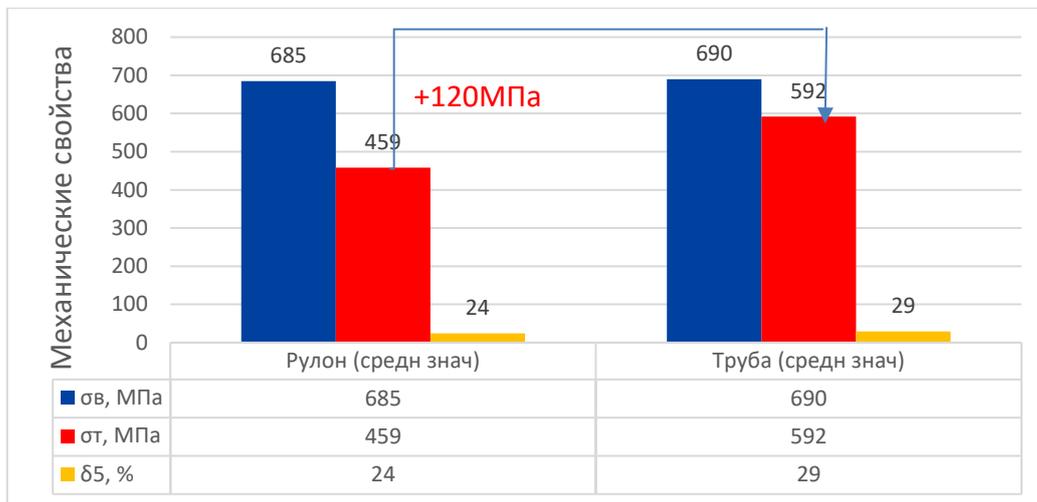


Рисунок 2 – Изменение механических свойств при производстве труб 168,28×8,9 мм

Анализ результатов исследования равномерности распределения свойств по ширине полос показал, что разброс значений предела текучести и временного сопротивления по ширине полосы не превышает 5МПа. В поперечном направлении относительно направления прокатки, значения предела текучести больше чем в продольном на 20-25МПа. Разброс значений относительного удлинения по ширине полосы не более 2%, средний разброс значений по длине полосы по пределу текучести составил 29МПа, по прочности – 34МПа.

Качественное сравнение полученных данных с результатами исследования образцов от 1-ой опытной прокатки показывают, что повышение температуры смотки приводит к увеличению межпластинчатого расстояния перлита. Перлит занимает значительную объёмную долю образца. Размер перлитных областей может достигать нескольких десятков микрон.

Результаты просвечивающей микроскопии металла показывают, что нанокарбонитриды микролегирующих элементов обнаруживаются в любом ферритном зерне. Их размеры колеблются в довольно широких пределах. Отдельные частицы достигают ~ 8-12 нм, типичный размер ~ 2-6 нм. Кроме того, имеется значительное количество более мелких частиц размером < 1 нм. Помимо нанокарбонитридов, наблюдались также (единично) субмикрочарбонитриды размером < 0,1 мкм. На рисунке 3 представлена морфология феррита (а) и перлита (б).

Проведенный анализ результатов механических испытаний рулонного проката, произведенного в рамках трех опытных прокаток показал, что повышение температуры конца прокатки и температуры смотки приводит к снижению как предела текучести, так и временного сопротивления рулонного проката толщиной 8,9 мм из стали группы прочности K55 по API 5CT. При этом при повышении температуры прокатки от 840-850°С до 910-920°С и увеличении температуры смотки с 590-620°С до 670-680°С и предел текучести и временное сопротивление снижается в среднем на 50МПа.

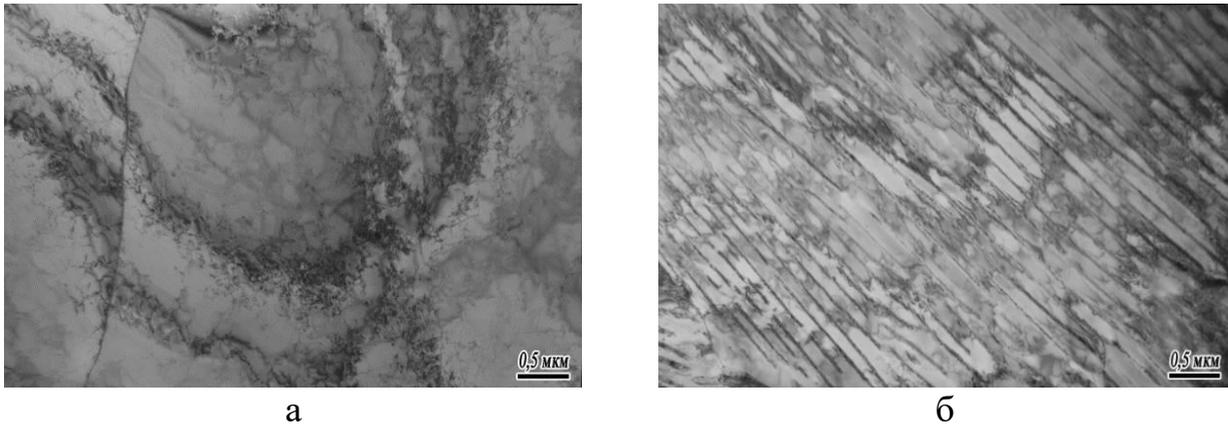


Рисунок 3 – Морфология: а) феррита, x15000; б) перлита

Повышение значений температур конца прокатки и температуры смотки также приводит к снижению работы удара при +20°C. При применении режима прокатки с температурой конца прокатки  $T_{кп}=910-920^{\circ}\text{C}$  и температурой смотки  $T_{см}=640-680^{\circ}\text{C}$  для стали с содержанием углерода 0,28-0,31%, минимальное значение  $KV^{+20}$  равно 41 Дж близко к нижней границе требований API 5CT ( $KV^{+20} \geq 27 \text{ Дж}$ ). Таким образом, использование технологии производства с высокими значениями температур  $T_{кп}$  и  $T_{см}$  нежелательно с точки зрения обеспечения требований к работе удара стали группы прочности K55 по API 5CT.

Проведен анализ влияния содержания углерода на значения временного сопротивления и предела текучести стали группы прочности K55 по API 5CT. Установлено, что при увеличении содержания углерода с 0,27 до 0,31%С значение предела текучести и временного сопротивления в среднем не изменяется. Что означает, что наибольшее значение на уровень прочностных показателей стали оказывает выбор технологических параметров производства полосы: температуры конца прокатки и температуры смотки полосы (рисунки 4-6).

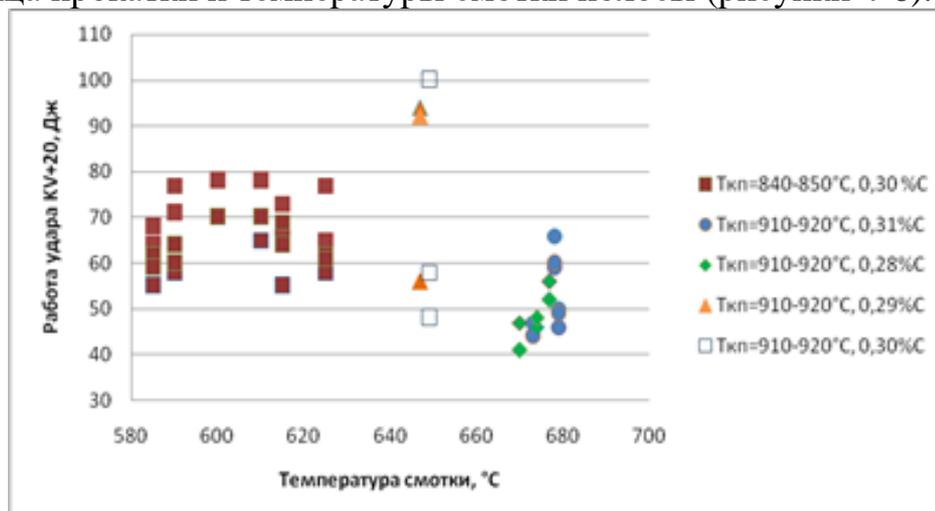
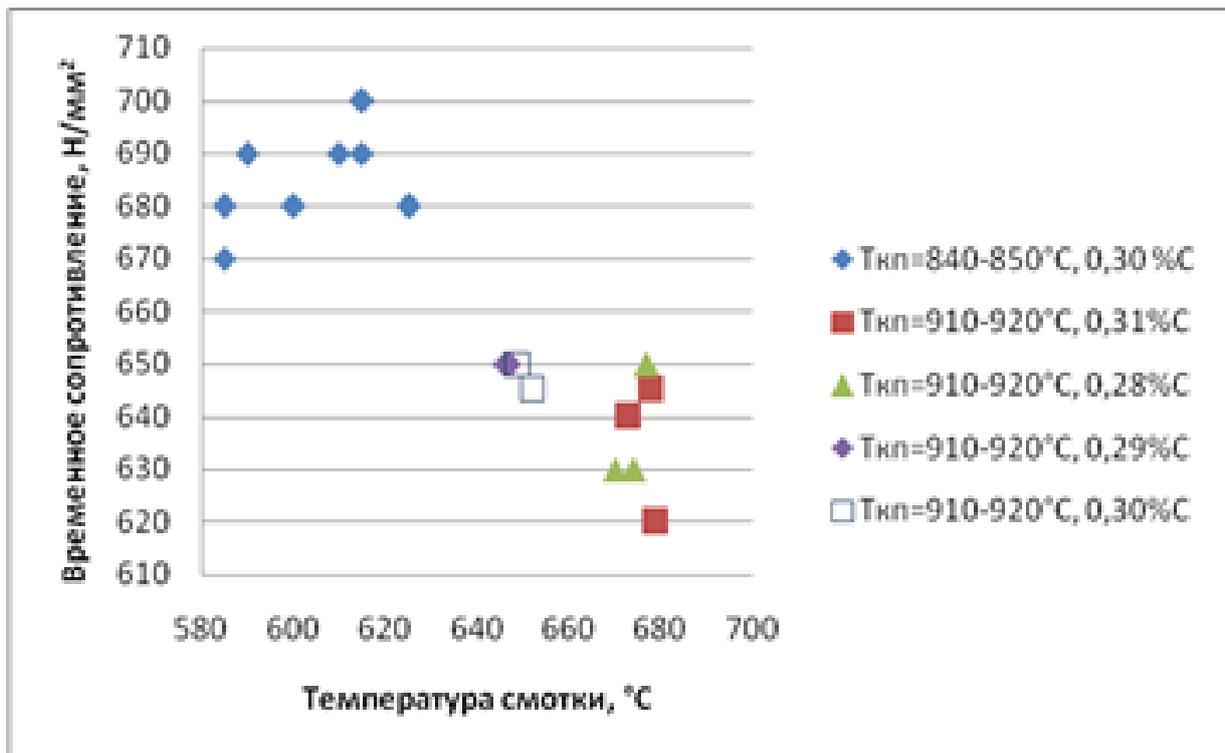
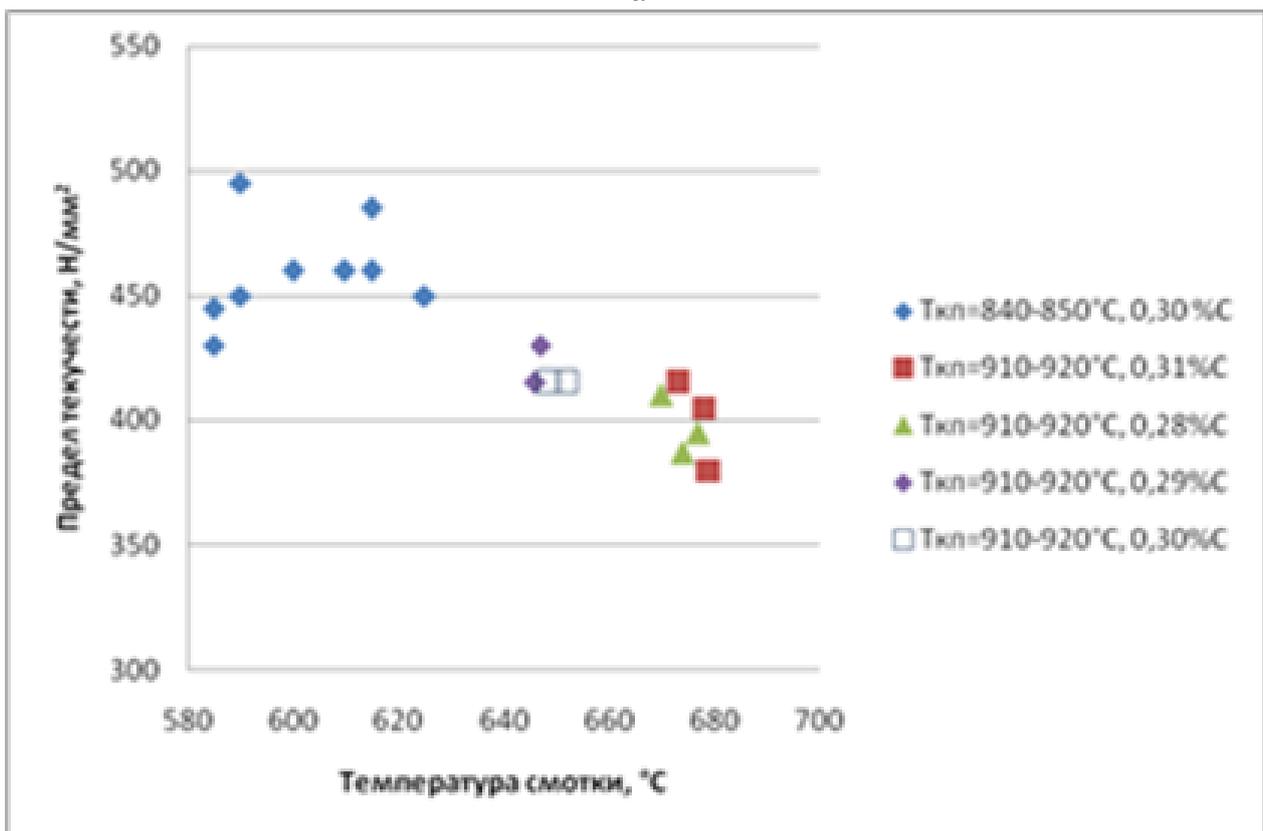


Рисунок 4 – Влияние температуры конца прокатки, температуры смотки и содержания углерода на величину работы удара при +20°C рулонного проката толщиной 8,9 мм из стали K55 по API 5CT

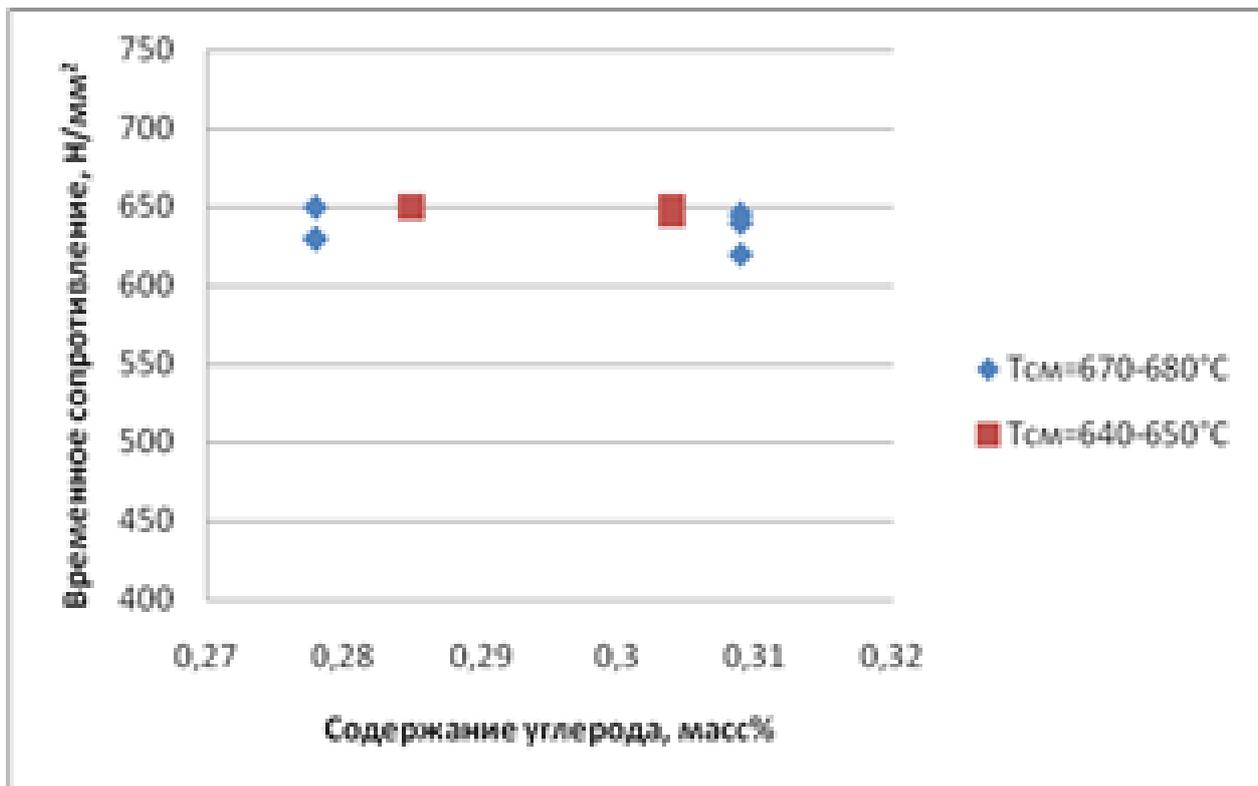


а

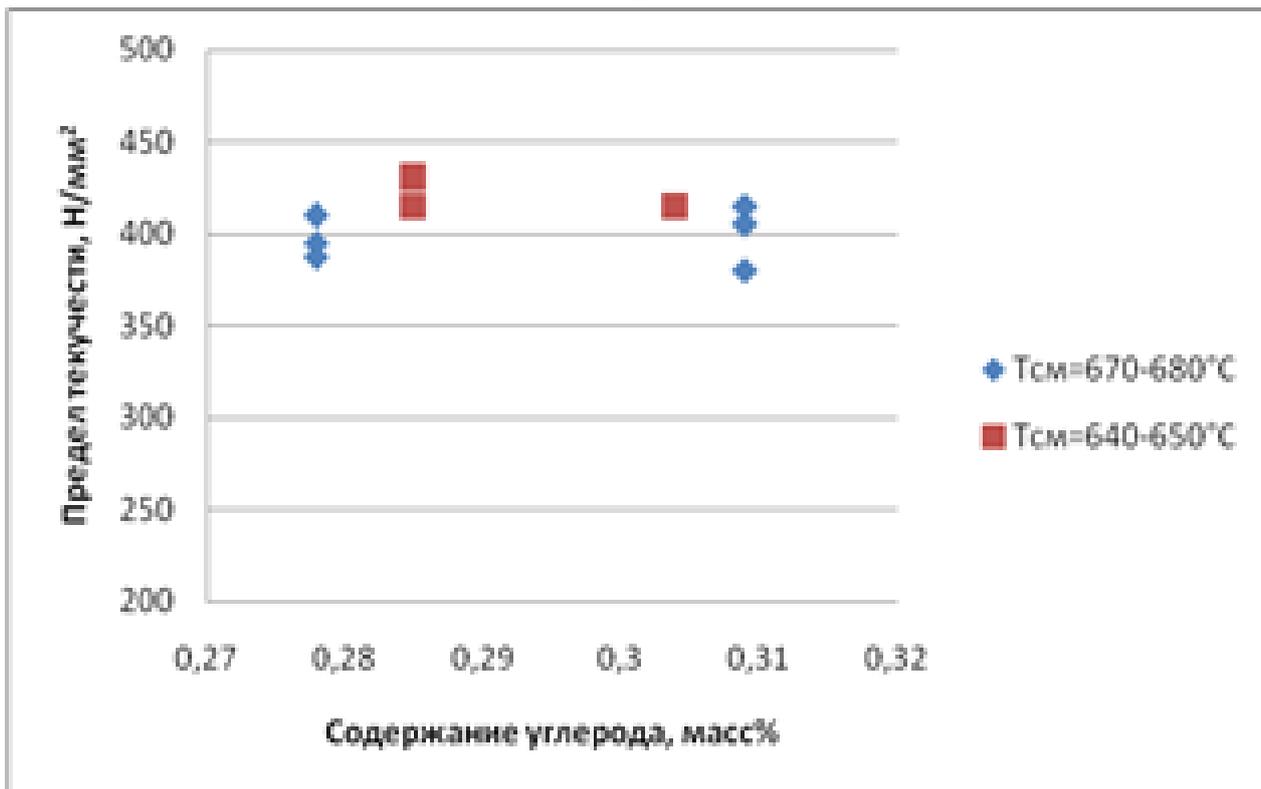


б

Рисунок 5 – Влияние температуры конца прокатки, температуры скотки и содержания углерода на прочностные показатели рулонного проката толщиной 8,9 мм из стали К55 по API 5СТ: а) изменение временного сопротивления стали; б) изменение предела текучести стали



а



б

Рисунок 6 – Влияние содержания углерода на значения прочностных показателей стали группы прочности K55 по API 5CT :а) изменение временного сопротивления стали; б) изменение предела текучести стали

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния трубного передела при производстве труб  $\varnothing 168,28$  мм из экспериментальной стали на изменение уровня механических свойств. Описаны результаты разработки нового химического состава с учетом влияния трубного передела. Проведена оценка уменьшения ширины штрипса при трубном переделе, установлена закономерность изменения механических свойств от ширины штрипса при формовке труб.

Установлено, что целевая структура, дающая минимальный прирост предела текучести в трубе, а именно смесь полигонального феррита и эвтектоидного перлита, обеспечивается при температуре скотки  $675-700^{\circ}\text{C}$ .

Показано, что наименьшим приростом предела текучести при применении предварительной деформации 2-4% характеризуется прокат, произведенный с  $T_{\text{см}} \geq 650^{\circ}\text{C}$ . При этом предел текучести стали K55 увеличивается на 55-74 МПа при степени деформации 2% и 100-147 МПа при степени деформации 3-4% (рисунок 7).

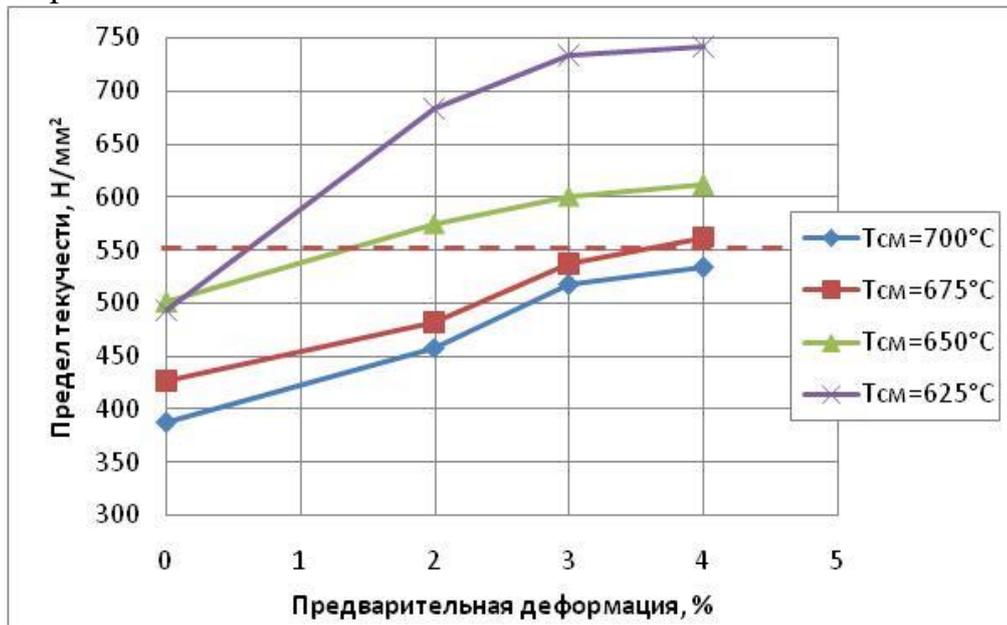
Установлено, что корректировка режимов прокатки экспериментальной стали в сторону увеличения температуры нагрева и снижения температуры скотки позволила увеличить уровень временного сопротивления и получить уровень механических свойств для стали K55 согласно API 5CT.

Установлено, что для обеспечения относительно низкого прироста предела текучести при трубном переделе и обеспечения требований к пределу текучести проката из стали K55 в трубе необходимо создавать условия для формирования равновесной феррито-перлитной микроструктуры стали, что обеспечивается при использовании рекомендуемого химического состава, температуре нагрева  $1220-1240^{\circ}\text{C}$  и  $T_{\text{кп}} = 910-940^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{см}} = 670-700^{\circ}\text{C}$  в промышленном производстве требуемые значения предела текучести будут обеспечены как в рулонном прокате, так и после трубного передела при производстве труб  $\varnothing 168,28$  мм.

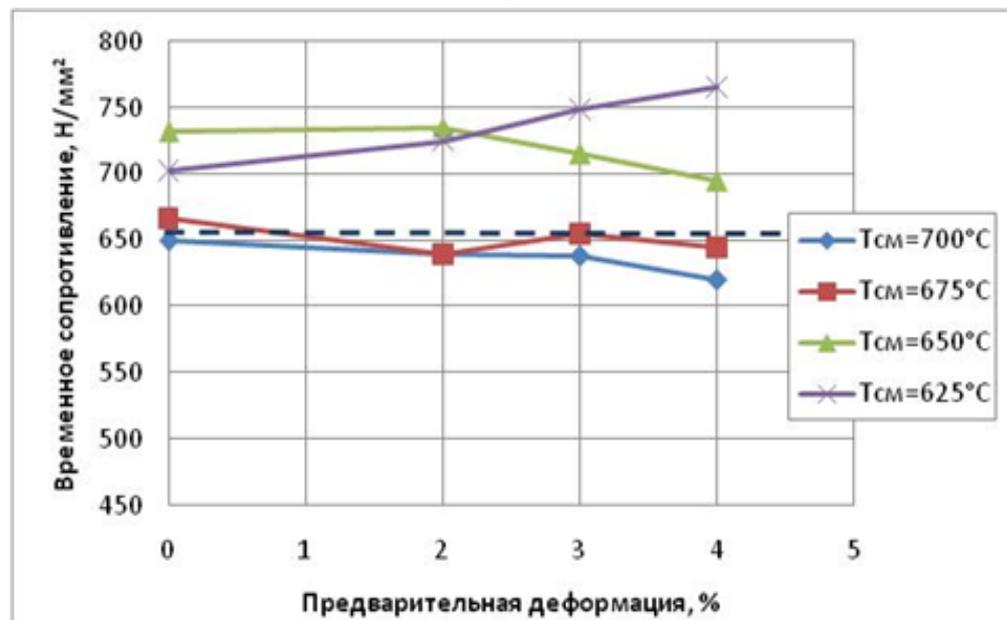
В результате проведения исследования установлено, что при производстве труб  $168 \times 8,9$  мм уменьшение ширины штрипса на 6 мм (519 мм) приводит к снижению прироста предела текучести с 131 МПа до 79 МПа, а дальнейшее уменьшение ширины штрипса до 517 мм приводит к снижению прироста предела текучести до 37 МПа. Очевидно, что наблюдаемое изменение предела текучести является следствием уменьшения плотности дислокаций в результате снижения степени вытяжки труб после формовки. Однако, следует учесть, что уменьшение ширины штрипса приводит к значительному понижению значений временного сопротивления в результате трубного передела. Поэтому сделали вывод, что оптимальным решением является уменьшение ширины штрипса при производстве труб  $168 \times 8,9$  мм до 519 мм (относительно номинального на 6 мм), при этом степень продольной вытяжки составляет 1,8%.

Показано, что при производстве из рулонного проката толщиной 8,9 мм труб диаметром 168 мм (для состава с 0,39С и  $T_{\text{см}} = 660-700^{\circ}\text{C}$ ), происходит увеличение предела текучести на 122-193 МПа,  $(\Delta\sigma_T)_{\text{ср}} = 156$  МПа (при использовании штрипса шириной 519 мм), а при производстве труб диаметром 245 мм – на 76-106 МПа, что связано с меньшим значением отношения  $t/D$  и соответственно с

меньшей степенью деформационного упрочнения при производстве труб большего диаметра.



а



б

Рисунок 7 – Изменение прочностных свойств стали K55 после предварительной деформации: а) изменение предела текучести; б) изменение временного сопротивления

В результате проведения настоящей работы, выявлено, что для обеспечения в основном металле труб уровня механических свойств, соответствующих группе прочности K55, не рекомендуется использование стали с содержанием углерода ниже 0,36%. При этом рекомендованный интервал содержания углерода для увеличивается до 0,37-0,40%. Известно, что повышение содержания углерода может привести к снижению работы удара. Анализ результатов испытаний на ударный изгиб образцов от проката с 0,39%С (плавка 387378) показал, что понижение температуры конца прокатки от 910-940 °С до 870-900°С при

$T_{cm}=660-700\text{ }^{\circ}\text{C}$  позволяет повысить работу удара с 25-31 Дж ( $KV_{cp}=28\text{ Дж}$ ) до 33-41 Дж ( $KV_{cp}=37\text{ Дж}$ ). В соответствии с вышесказанным, для предотвращения падения ударной вязкости при повышении углерода в стали К55 рекомендуется понижение температуры конца прокатки до  $870-900^{\circ}\text{C}$ .

Представлены результаты исследований изменения механических свойств от химического состава, режимов производства и размеров труб (рисунки 8-12).

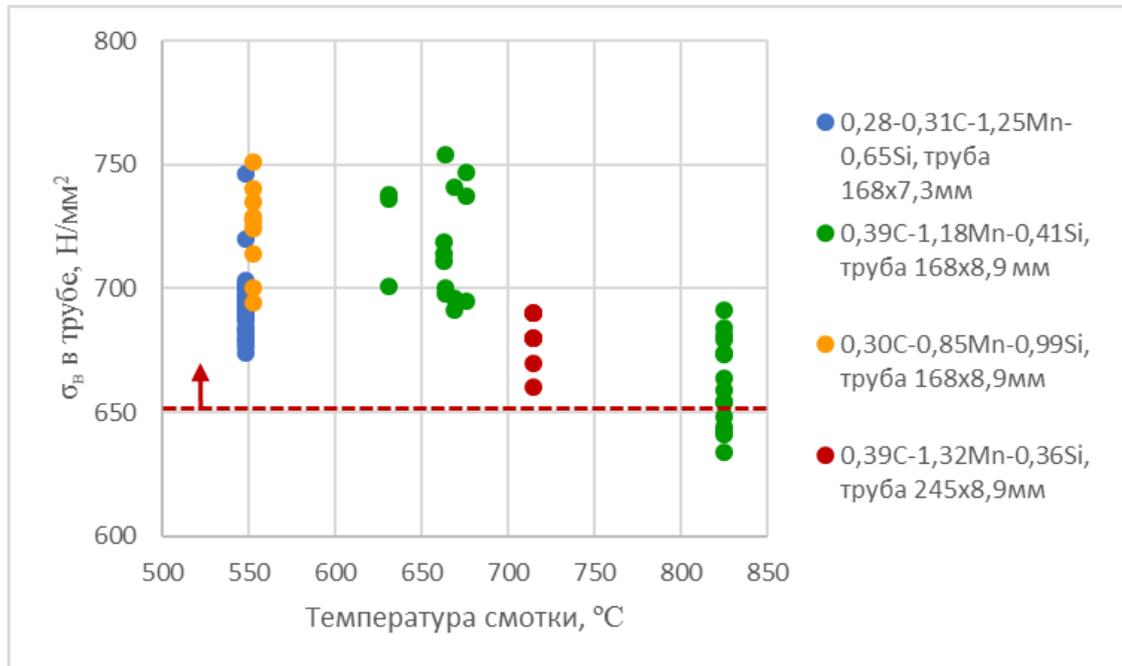
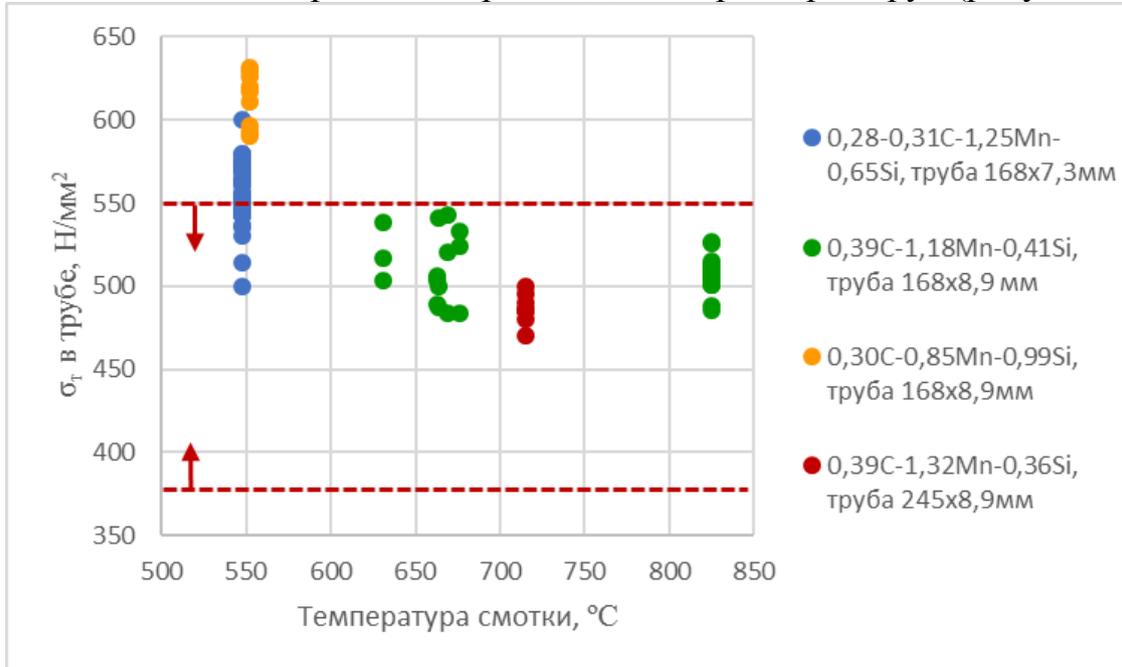


Рисунок 8 – Влияние технологии производства рулонного проката на механические свойства основного металла произведенных из него труб: а) влияние технологии производства на предел текучести; б) влияние технологии производства на временное сопротивление

Представлены результаты моделирования нового химического состава стали (рисунок 9). Для моделирования процесса прокатки стана 2000 ПАО «Северсталь» был использован цифровой двойник, учитывающий химический состав и режимы производства.

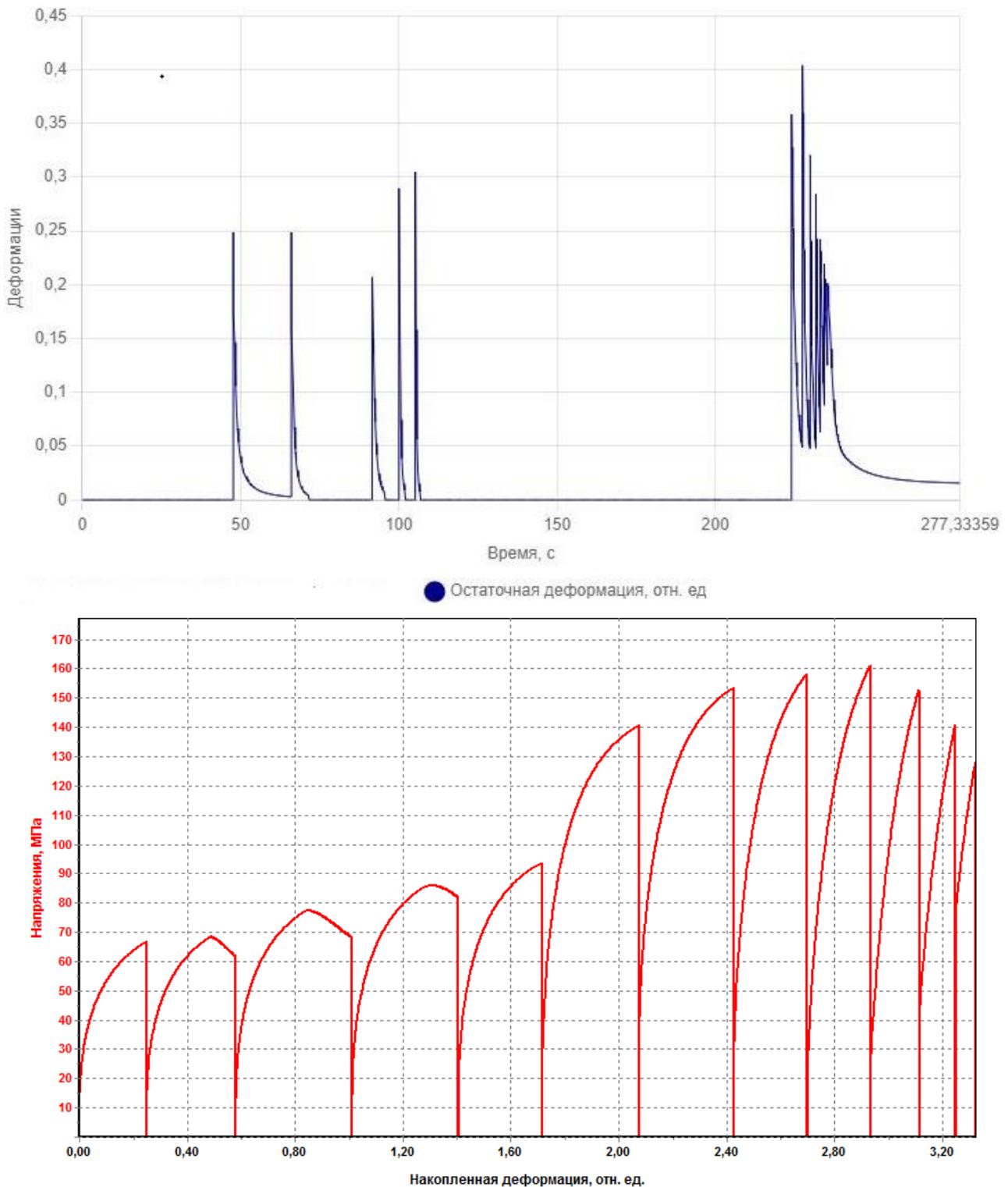


Рисунок 9 – Результаты расчета остаточной и накопленной деформации при прокатке на НШПС 2000

По результатам расчетов определены: вариант химического состава, температурно-деформационные параметры прокатки, прогнозируемые накопленные и остаточные деформации и прогнозируемые механические свойства для последующего физического моделирования выплавки стали и ее прокатки на лабораторном стане. Суммарная накопленная деформация для экспериментального химического состава составляет 3,3 ед ( $L_n$  (Нк/Н0)), остаточная деформация за 12 проходов составляет 0,02 ед. Полученные расчетные значения механических свойств проката составили: предел текучести (вдоль) – 404МПа, предел прочности – 670МПа, относительное удлинение – 25%.

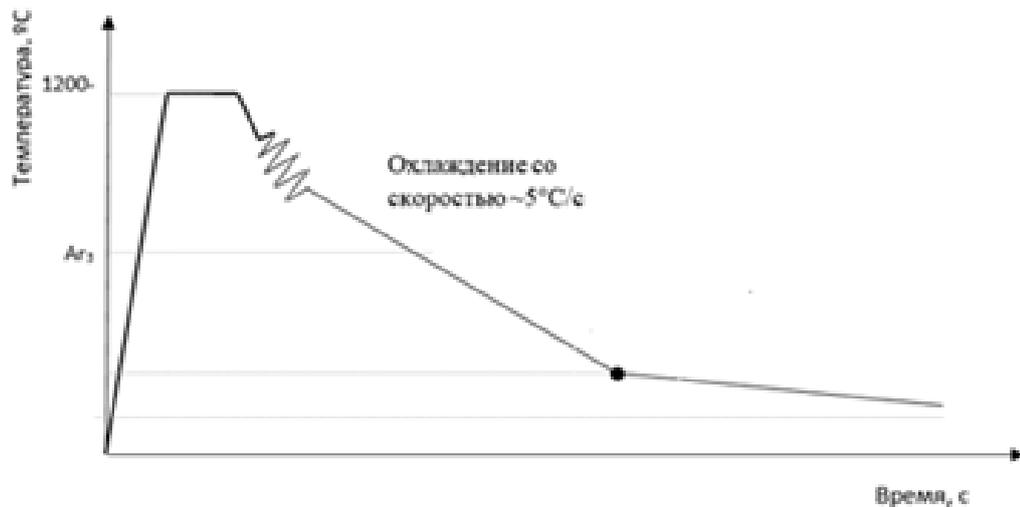


Рисунок 10 - Схема эксперимента на стане АЗТМ-300

Определены механические свойства полос экспериментальной стали, прокатанных на лабораторном стане АЗТМ-300 по различным режимам температуры конца прокатки. Установлена зависимость изменения предела текучести прочности от температуры конца прокатки для экспериментальной стали.

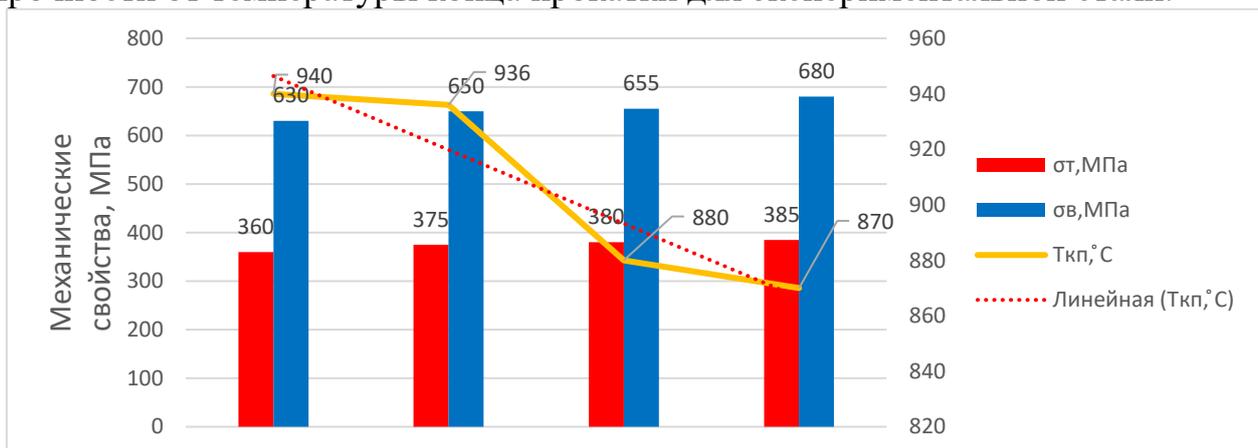


Рисунок 11 – Распределение механических свойств проката в зависимости от температуры конца прокатки

Представлены результаты физического моделирования трубного передела полос из экспериментальной стали, после ее прокатки на лабораторном стане АЗТМ-300.

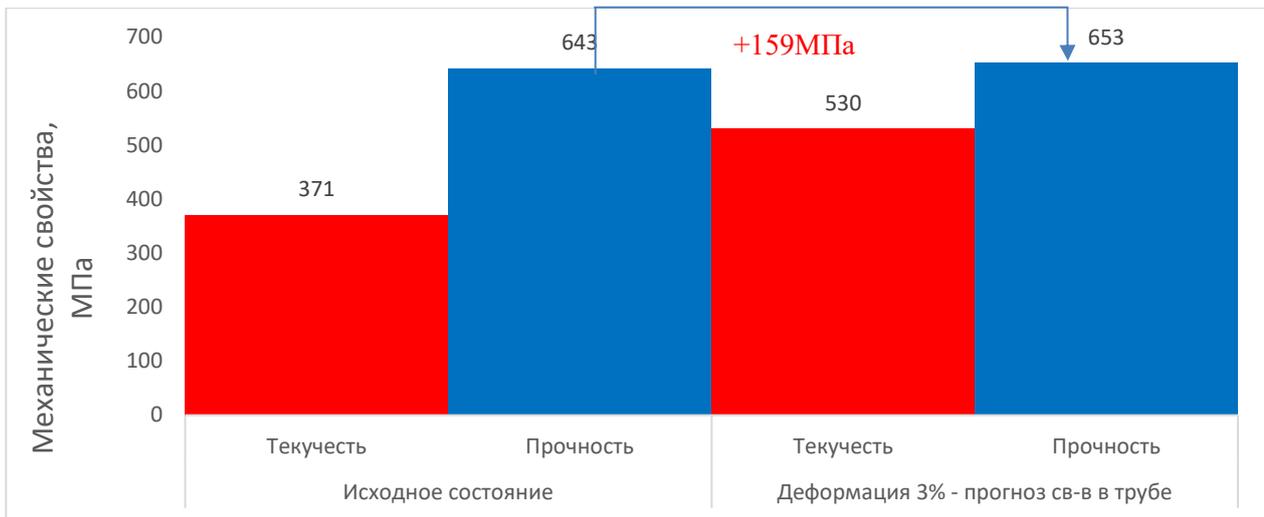


Рисунок 12 – Изменение предела текучести при моделировании трубного передела

Представлены результаты замера энергосиловых параметров прокатки на НШПС-2000 при производстве рулонного проката плавки 387378 с рекомендуемым химическим составом (рисунок 13).

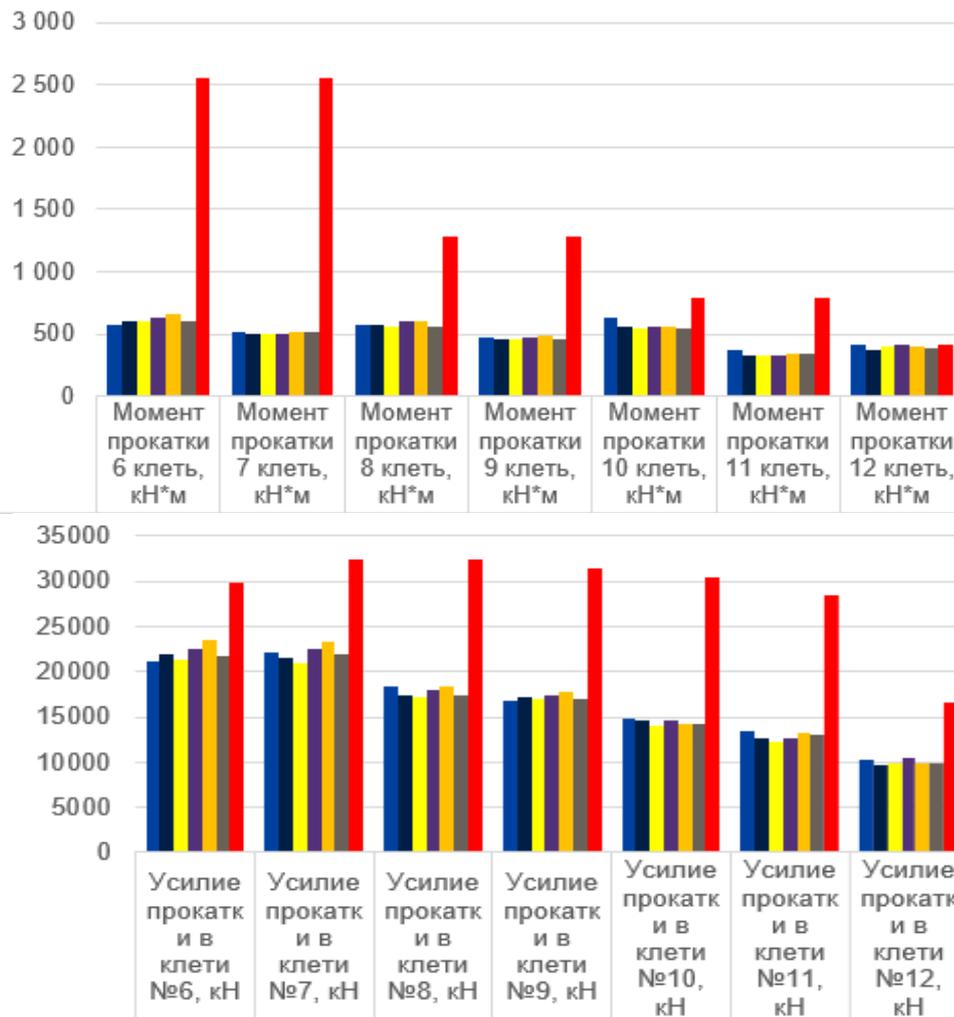


Рисунок 13 – Фактические результаты момента и усилия прокатки для 7 полос толщиной 8,9мм

Установлено, что для промышленного производства рулонного проката для труб группы прочности K55 рекомендуется применение химического состава, указанного в таблице 3.

Таблица 3 – Рекомендуемый химический состав стали K55

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	V	Nb	Ti	Mo	N
Min	0,37	0,30	1,0						0,02					
Max	0,40	0,50	1,2	0,005	0,01	0,10	0,1	0,1	0,05	0,01	0,007	0,005	0,05	0,008

Представлены результаты испытаний механических свойств проката с НШПС-2000 и после производства труб размером 168,3x8,9мм на ТЭСА (рисунок 14).

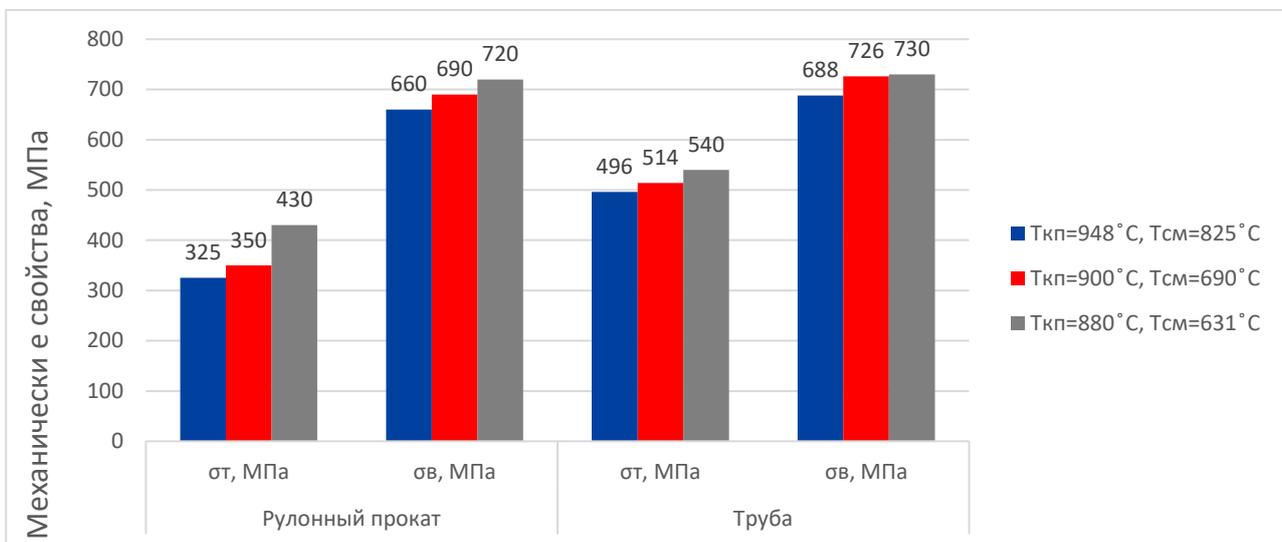


Рисунок 14 – Механические свойства рулонного проката и труб в зависимости от режимов прокатки

По результатам анализа испытаний механических свойств труб установлено: предел прочности для всех реализованных технологий имеет значительный запас после трубного передела, предел текучести для технологии с низкой смоткой не обладает достаточным запасом по верхней границе (540 МПа, при нормативе 379-552 МПа), рациональным решением для производства проката для труб является прокатка полос с  $T_{кп}=870-900^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{см}=670-710^{\circ}\text{C}$ , механические свойства труб полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к категории прочности K55.

Усилия в клетях и момент прокатки в чистовой группе стана 2000 не превышают паспортных данных и имеют близкие к прогнозируемым в цифровом двойнике стана 2000 значения.

Считаем, что разработанные рекомендации, основанные на описанных ранее металлургических подходах и моделировании трубного передела, применимы для производства рулонного проката для труб группы прочности K55 обозначенных в настоящей работе толщин 6-10 (12)мм.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В результате выполнения диссертационной работы, направленной на разработку научных и технологических основ изменения механических свойств стали после пластической деформации для изготовления электросварных труб группы прочности K55 по API 5CT получены следующие основные результаты:

1. Изучены параметры технологии изготовления труб на ТЭСА для стали с химическим составом  $C=0,3\%$ . Прирост предела текучести при производстве труб 168x8,9мм составляет +120МПа и превышает верхний предел в 552МПа по требованиям стандарта API 5CT. Снижение предела текучести в прокате не обеспечивает требования к прочности не ниже 655МПа как в прокате, так и в трубе;

2. Разработана физическая модель прогнозирования изменения механических свойств проката при изготовлении труб на ТЭСА. Для труб размером 168x8,9мм изменение механических свойств при трубном переделе соответствует предварительной деформации образца рулонного проката на установке Gleeble3800 в 3%;

3. Исследовано влияние химического состава, режимов прокатки и охлаждения на НШПС для формирования микроструктуры 60% перлита + 40% феррита для получения предела текучести не выше 400МПа и предела прочности не ниже 655МПа. Химический состав должен содержать  $C=0,37-0,41\%$ ,  $Mn=1,0-1,4\%$ , температура конца прокатки на НШПС должна составлять 870-900оС, температура смотки – 670-710оС;

4. На основании описанных исследований и результатов моделирования трубного передела, разработана технология производства рулонного проката для труб группы прочности K55 толщин 6-12мм и диаметров труб 168,3-406,4мм;

5. Изучены параметры технологии изготовления труб на ТЭСА для  $C=0,4\%$ . Проведена оценка изменения значений временного сопротивления и предела текучести при производстве труб 168x8,9мм, 245x8,9мм. Определено, что при увеличении  $t/D$  и, соответственно, повышении деформационного упрочнения основного металла труб, происходит увеличение прироста величины предела текучести  $(\Delta\sigma_t)_{cp}=+92\text{МПа}$  для труб 245x8,9мм и  $(\Delta\sigma_t)_{cp}=+154\text{МПа}$  для труб 168x8,9мм для сталей с феррито–перлитной структурой в условиях производства на ТЭСА;

6. Зарегистрирован патент №. RU 2728981 C1 – Способ производства горячекатаного проката повышенной прочности.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

### Публикации в изданиях, определенных ВАК РФ

1. Разработка требований к целевой микроструктуре и технологии производства рулонного проката для труб класса прочности K55 / Адигамов Р.Р., Барабошкин К.А., Мишнев П.А., Вархалева Т.С., Матросов М.Ю., Юсупов В.С., Кожевникова И.А. // Сталь. – 2024. – № 4. – С. 26–33.

2. Адигамов Р.Р., Барабошкин К.А., Юсупов В.С. Исследование кинетики фазовых превращений экспериментальной плавки рулонного проката класса прочности K55 для труб // Сталь. 2022. № 11. С. 40-46.

Adigamov R.R., Baraboshkin K.A., Yusupov V.S. Study of the phase transition kinetics in the experimental melting of rolled coils of K55 grade strength steel for pipes manufacturing // *Steel in Translation*. 2022. Т. 52. № 11. С. 1098-1105.

3. Adigamov R.R., Baraboshkin K.A., Mishnev P.A., Karlina A.I. Development of rolling procedures for pipes of K55 strength class at the laboratorial mill // *CIS Iron and Steel Review*. 2022. Т. 24. С. 60-66.

#### **Патенты на изобретения и свидетельство регистрации ПО для ЭВМ**

4. Рулонный прокат для обсадных и насосно-компрессорных труб и способ его производства. Патент на изобретение RU 2728981 С1, Российская Федерация – № 2020105022; заявл. 03.02.2020 / Барабошкин К.А., Митрофанов А.В., Вархалева Т.С., Рыбаков С.А., Федотов Е.С., Матросов М.Ю., Шульга Е.В.; патентообладатель ПАО «Северсталь».

#### **Основные публикации в трудах международных конференций и семинаров**

5. Барабошкин К.А. Различия в применении бесшовных и сварных труб. Тенденции развития // В сборнике: *Жизненный цикл конструкционных материалов*. Иркутск, 2022. С. 330-334.

6. Барабошкин К.А., Адигамов Р.Р., Юсупов В.С. Разработка рулонного проката класса прочности K55 для труб как путь снижения издержек при решении энергетических проблем // В сборнике: *МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении*. сборник трудов Международной научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 177-180.

7. Барабошкин К.А. Поверхностные и внутренние дефекты литой заготовки для труб // В сборнике: *МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении*. сборник трудов Международной научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 3-5.

8. Адигамов Р.Р., Барабошкин К.А., Юсупов В.С. Анализ данных трубного передела разработанной стали 22ГЮ и технологии производства рулонного проката класса прочности K55 // В сборнике: *Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов*. Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2022. С. 48-50.

9. Барабошкин К.А., Адигамов Р.Р., Юсупов В.С. Разработка стали 22ГЮ и технологии производства рулонного проката класса прочности K55 // В сборнике: *Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов*. Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2022. С. 51-54.