

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

Мазова Елена Павловна

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА ТРУБНОГО ПРОКАТА С ПОВЫШЕННОЙ
КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ НА НШПС 2000

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

2.6.4 Обработка металлов давлением

Научный руководитель: к.т.н. Ионов Сергей Михайлович

Москва – 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

На предприятиях отечественного топливно-энергетического комплекса для обустройства нефтяных месторождений широко применяются электросварные прямошовные нефтепроводные трубы малого и среднего диаметра (промысловые трубы), изготовленные из низколегированного малоуглеродистого полосового проката. В условиях нефтепромыслов они подвергаются интенсивному воздействию со стороны транспортируемой водонефтяной смеси, характеризующейся повышенной коррозионной и абразивной активностью. При этом в зависимости от состава используемой подтоварной воды возможна сероводородная или углекислотная коррозия стенок промысловых труб. Указанные процессы коррозионно-абразивного износа являются причиной частого выхода из строя промысловых нефтепроводов, приводящих к аварийным ситуациям в локальной трубопроводной сети. К основным экологическим и экономическим последствиям таких происшествий относится разлив нефти или оборотной воды, дополнительные расходы на замену труб и ликвидацию аварии, снижение производительности скважины на период ремонта.

Анализ литературных данных, а также опыта производства проката повышенной коррозионной стойкости из стали марок 20-КСХ, 13ХФА и 05ХГБ, предназначенного для нефтепромысловых трубопроводов, свидетельствует, что они обеспечивают требуемый уровень механических характеристик для класса прочности K52. Однако опыт их эксплуатации свидетельствует, что в ряде случаев могут иметь место отдельные сквозные коррозионные повреждения через 3 – 5 лет, то есть скорость локальной коррозии таких сталей превышает 3 мм/год. Также отмечено, что на данном сортаменте преобладает износ за счет водородного и сероводородного растрескивания. В то же время, на указанном сортаменте не всегда удается получить требуемые показатели хладостойкости, позволяющие использовать его при производстве труб для районов Крайнего Севера со сложными природно-климатическими условиями. В связи с этим использование труб из указанного проката не позволяет существенно снизить аварийность нефтепромысловых трубопроводов, а также обеспечить высокий уровень указанных специальных параметров, что обуславливает необходимость усовершенствования технологии и разработки металлофизических основ их повышения за счет определения рациональной концепции легирования, оптимизации структурно-фазового состояния и использования соответствующих температурно-скоростных и деформационных параметров прокатки. Для этого могут быть использованы современные металловедческие методы исследования

структурно-фазовых характеристик и эксплуатационных свойств проката, а также физического и аналитического моделирования процесса прокатки с использованием известных и апробированных методов теории и технологии обработки металлов давлением.

Помимо выбора легирующей композиции данного класса сталей немаловажным остается вопрос в оценке степени влияния на коррозионную стойкость неметаллических включений и других избыточных фаз, в т.ч. наноразмерных частиц. Степень влияния неметаллических включений определяется их составом, количеством, размерами и морфологией. Это обуславливает целесообразность разработки методики использования новых способов качественного и количественного исследования неметаллических включений в прокате рассматриваемого сортамента, в качестве одного из инструментов повышения качества и эксплуатационных свойств металлопродукции.

Диссертационные исследования проводились в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства НИОКР «Разработка и освоение наукоемкой технологии производства хладостойкого и коррозионностойкого проката для изготовления прямошовных газонефтепроводных труб в рамках инфраструктурного развития ТЭК РФ с целью импортозамещения» в рамках договора №02.G25.31.0141 от 01.12.2015 г. по постановлению Правительства РФ №218 от 09.04.10, шифр 2015-218-06-034, НИТУ МИСИС совместно с ПАО «Северсталь».

Цель диссертационной работы – исследование и совершенствование технологии производства рулонного проката с повышенной коррозионной стойкостью на НШПС 2000 для изготовления электросварных прямошовных труб.

Для достижения указанной цели поставлены **следующие задачи**:

1 Провести анализ производственных факторов, оказывающих влияние на коррозионную стойкость проката и устойчивость к разрушению при низких температурах. В частности, исследовать влияние неметаллических включений в прокате на его эксплуатационные характеристики.

2 Разработать методику экспериментального исследования состава и объемного распределения неметаллических включений в низколегированном малоуглеродистом металлопрокате, позволяющую оценить его коррозионную стойкость;

3 Провести анализ зависимости характера структурообразования низколегированного малоуглеродистого рулонного проката от технологических факторов его производства на НШПС 2000, включая состав легирующей композиции;

4 Определить требуемые структурно-фазовые характеристики проката рассматриваемого сортамента, получение которых обеспечивает повышение прочностных характеристик и коррозионной стойкости готовой продукции;

5 Для разработанного состава низколегированного малоуглеродистого проката провести построение и выполнить анализ термокинетических диаграмм (ТКД) для определения рациональных температурно-скоростных режимов охлаждения полосы на НШПС 2000.

6 Определить рациональные деформационные режимы прокатки НЛЗ из стали разработанного химического состава на основе исследования реологических свойств и энергосиловых параметров процесса на испытательном комплексе Gleeble Dynamic Systems 3800.

7 Разработать технологические рекомендации по производству рулонного проката с повышенной коррозионной стойкостью на НШПС 2000 и провести их опробование в производственных условиях.

8 Провести комплексную оценку эксплуатационных свойств, включая структуру, механические свойства и коррозионную стойкость, промышленных образцов рулонного проката CORDIS (07ХНД) класса прочности К52.

9 Оценить эффективность разработанных технических решений на основе натурных коррозионных испытаний образцов проката в условиях отечественных нефтепромыслов.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1 Разработан способ экспериментального исследования объемного (3D) состояния неметаллических включений в стали, позволяющий качественно и количественно оценивать их ключевые характеристики (морфология, состав, размер, концентрация в металле), а также определять степень их влияния на коррозионную стойкость низколегированного трубного проката. Установлено, что определяющее влияние на коррозионную стойкость низколегированных малоуглеродистых трубных сталей рассматриваемого сортамента оказывают неметаллические включения на основе алюмомагниево-шпинели.

2 Дана аналитическая оценка влияния легирующих элементов на механические свойства и коррозионную стойкость трубного проката рассматриваемого сортамента, на основе которой разработана система легирования для класса прочности К52.

3 На основе выполненных dilatометрических исследований и построенных термокинетических диаграмм (ТКД) установлен характер структурообразования трубного

рулонного проката с предложенной системой легирования в условиях ускоренного последеформационного охлаждения в потоке НШПС 2000.

4 В результате проведённых пластометрических исследований, выполненных на испытательном комплексе Gleeble Dynamic Systems 3800, определены значения сопротивления деформации, использованные для расчета энергосиловых параметров процесса прокатки при производстве разработанного вида проката на НШПС 2000.

Практическая значимость и реализация работы в промышленности:

1 Определены требования к химическому и структурно-фазовому составу проката для изготовления сварных прямошовных промысловых труб, обеспечивающие высокую коррозионную стойкость стали при минимальном содержании коррозионно-активных неметаллических включений. Разработаны температурно-скоростные и деформационные режимы горячей прокатки с ускоренным охлаждением рулонных полос, обеспечивающие получение необходимых прочностных характеристик проката, соответствующие классу прочности K52.

2 Предложен новый химический состав стали для изготовления рулонного проката с повышенной коррозионной стойкостью CORDIS (07XНД) класса прочности K52.

3 Разработана технология производства рулонного проката с повышенной коррозионной стойкостью CORDIS (07XНД) класса прочности K52 в условиях НШПС 2000 ПАО «Северсталь».

4 Определены значения сопротивления деформации и проведен расчет энергосиловых параметров процесса прокатки при производстве разработанного вида проката на НШПС 2000.

5 Разработанная технология с положительным результатом прошла промышленное опробование и внедрена на НШПС 2000 ЛПЦ-2 ПАО «Северсталь». Изготовлены промышленные партии рулонного проката CORDIS с повышенной коррозионной стойкостью в толщинах 6 – 12 мм. Всего по разработанной технологии изготовлено более 40 тыс. т проката.

6 Результаты опытно-промышленных коррозионных испытаний сварных нефтепромысловых труб, изготовленных из разработанного проката CORDIS, в условиях ряда отечественных нефтепромыслов показали их более высокую эксплуатационную стойкость в сравнении с базовыми марками трубных сталей (13ХФА, 09Г2С).

7 Результаты работы использованы при выполнении научного проекта по созданию высокотехнологичного производства в рамках НИОКТР «Разработка и освоение наукоемкой технологии производства хладостойкого и коррозионностойкого проката для

изготовления прямошовных газонефтепроводных труб в рамках инфраструктурного развития ТЭК РФ с целью импортозамещения» в рамках договора №02.G25.31.0141 по постановлению Правительства РФ №218 от 09.04.10, шифр 2015-218-06-034.

Научные положения, выносимые на защиту:

1 Оценка характера процессов структурообразования при производстве низколегированного малоуглеродистого проката рассматриваемого сортамента, установленная по результатам металлофизического анализа термокинетических диаграмм, полученных с использованием деформационного дилатометра;

2 Результаты исследований по влиянию технологических параметров производства рулонного проката из низколегированных малоуглеродистых сталей, включая состав легирующей композиции, на формирование структурно-фазовых характеристик, а также механических и эксплуатационных свойств;

3 Температурно-скоростная зависимость временного сопротивления от деформационного воздействия (температуры и скорости) для расчета сопротивления деформации при прокатке для разработанного химического состава стали;

4 Оригинальная методика экспериментального исследования состава и объемного распределения неметаллических включений в низколегированном металлопрокате рассматриваемого сортамента, позволяющая оценить степень влияния этих включений на коррозионную стойкость;

5 Технологические режимы производства рулонного проката CORDIS с повышенной коррозионной стойкостью класса прочности K52, реализованные на НШПС 2000 ПАО «Северсталь»;

6 Результаты опытно-промышленных испытаний эксплуатационной стойкости промышленных образцов разработанного проката в условиях ряда отечественных нефтедобывающих предприятий.

Апробация: Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на: производственно-технической конференции «Промысловые трубопроводы – 2017», 19-21 апреля 2017 г. Москва, II-й Международной научно-технической Конференции «Коррозия в нефтяной и газовой промышленности», 6-8 сентября 2017г., Самара, 15ой Международной школе-конференции для молодых ученых и специалистов, Москва, 23 – 27 октября 2017 г., НИЯУ МИФИ, The 10th International Conference of CLEAN STEEL, 18-20 September 2018, Budapest, II Международной конференции «КОРРОЗИЯ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ» - CORROSION OIL&GAS 2019 20-22 мая 2019 г., Санкт-

Петербург, Россия, Научно-практической конференции «ПРОМЫСЛОВЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ 2020» 03-04 марта 2020г., Екатеринбург, Россия. Премией «Молодые учёные 2019» (диплом II степени) была отмечена работа по теме данного исследования: «Разработка трехмерной системы анализа состава и структуры коррозионно-активных неметаллических включений в стальной металлопродукции для повышения эксплуатационного ресурса газонефтепроводной инфраструктуры РФ», а также работа по теме: «Разработка рулонного проката с повышенной хладостойкостью и коррозионной стойкостью для нефтегазовых труб нового поколения» (диплом III степени). Разработки автора были отмечены золотой медалью «Металл-Экспо`2020» за создание и освоение технологии производства низколегированного рулонного проката для нефтегазопроводных труб с повышенной хладостойкостью и коррозионной стойкостью «Cordis» класса прочности K52-K56. В 2022 году диссертантом была получена степень лицензиата технических наук в области материаловедения и инжиниринга в КТН Королевском технологическом институте, Стокгольм, Швеция, по результатам доклада на тему «Неметаллические включения в нефтепромысловых трубопроводах и их влияние на коррозионную стойкость».

Личный вклад автора включает организацию и непосредственное участие при проведении лабораторных, теоретических и экспериментальных исследований. Автором лично проведен анализ современных технологических тенденций производства рулонного проката с повышенной коррозионной стойкостью для изготовления электросварных нефтепромысловых труб, разработано обоснование основных научных и технических положений, выносимых на защиту. При участии автора также выполнены все промышленные испытания и подготовлено внедрение результатов работы в условиях действующего производства на НШПС 2000 ПАО «Северсталь».

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК или входящих в базы данных Scopus.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 164 страницах машинописного текста, содержит 85 рисунков, 54 таблицы. Список использованных источников включает 132 наименования отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цели и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** рассмотрены основные проблемы производства проката для нефтепромысловых трубопроводов, являющихся важнейшим инфраструктурным элементом систем нефтедобычи. Трубопроводы зачастую эксплуатируются в сложных природно-климатических условиях районов Крайнего Севера при низких температурах и применяются для транспортировки водонефтяной смеси с повышенной коррозионной активностью. Поэтому не всегда удастся обеспечить их длительную работу без коррозионных повреждений, таких как появление участков с утонением стенки трубопровода, а также сквозные промывы. Эти повреждения в свою очередь приводят к возникновению аварийных ситуаций на нефтепромыслах (рисунок 1а, б).



Рисунок 1 – Характер локальной коррозии промышленных труб: а – труба Ø89х6 мм; б – труба Ø114х10мм

Для изготовления нефтепромысловых труб в основном используют рулонный горячекатаный прокат, уровень коррозионной стойкости которого определяется свойствами и структурой этого проката, получаемого на широкополосовых станах. В связи с этим, одной из важнейших задач топливно-энергетического комплекса Российской Федерации является повышение эксплуатационных характеристик и качества нефтепромысловых труб, которые во многом определяют эффективность нефтедобычи, а также экологическую безопасность на промыслах.

Для эффективного решения данной производственной задачи необходимо получение проката с более высокими прочностными характеристиками и высокой коррозионной стойкостью. Вопрос коррозионной стойкости промышленного трубопровода изучен достаточно широко. Предложены новые концепции легирования и микролегирования

сталей для повышения их коррозионной стойкости; решен ряд проблем в части усовершенствования технологии выплавки и разливки стали с целью «модификации» неметаллических включений (НВ) и снижения их негативного влияния на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей; применяются различные методы исследования этих включений с целью идентификации их коррозионной активности. Однако текущий опыт эксплуатации промышленных труб, например, в Западной Сибири, показывает, что срок их безаварийной работы при этом не увеличивается.

Эти обстоятельства определили необходимость проведения комплексных исследований, направленных на совершенствование технологии производства рулонного горячекатаного проката с повышенной коррозионной стойкостью. Для этого рассмотрены и проанализированы требования, предъявляемые к трубным сталям, в том числе особенности технологии производства трубного проката на НШПС. Представлена общая оценка влияния легирующих и микролегирующих элементов на механические свойства и коррозионную стойкость рассматриваемого сортамента сталей. Отмечено, что все больше внимания в вопросах обеспечения коррозионной стойкости трубных сталей уделяется изучению неметаллических включений.

Во **второй главе** выбраны и обоснованы материалы, методы и оборудование лабораторных и промышленных исследований. Выбор методов исследований основан на необходимости получения информации об изменении микроструктуры, механических и коррозионных свойств широкополосного проката, используемого для производства труб в зависимости от содержания легирующих элементов и термомеханической обработки.

Выплавка и разливка опытных и экспериментальных заготовок низколегированной стали производилась в вакуумной индукционной печи в тигле из плавленного периклаза (массовая доля MgO не менее 95 %). Полученные после выплавки экспериментальные заготовки были прокатаны на лабораторном прокатном стане ДУО-300 (ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина»). Заготовки прокатывали по режиму, имитирующему контролируемую прокатку с последующим ускоренным охлаждением.

Непрерывнолитые заготовки для промышленных экспериментов выплавляли в 350-т конвертере ПАО «Северсталь». Прокатку НЛЗ для изготовления рулонного проката производили на производственном оборудовании ЛПЦ-2 ПАО «Северсталь», включая НШПС 2000.

Определение механических свойств проводилось с использованием стандартных методик испытаний на растяжение (ГОСТ 1497-84), ударный изгиб (ГОСТ 9454-78), определение твердости (ГОСТ 9013-59). Испытания на хладостойкость проводились при пониженных температурах $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ГОСТ 9454-78).

Металлографические исследования характеристик микроструктуры стали и загрязненности неметаллическими включениями проведены с помощью стандартных методик (ГОСТ 1778-70), а также при использовании дополнительных методов определения загрязненности стали коррозионно-активными неметаллическими включениями.

Исследование коррозионных свойств проката проводилось с помощью гравиметрических испытаний и применения современных электрохимических методов. Для сравнительных испытаний на общую коррозию использовали 5%-ный нейтральный водный раствор NaCl. Испытание на водородное растрескивание проводилось по стандарту NACE TM 0284 в испытательном растворе А (раствор хлорида натрия, уксусной кислоты), насыщенном сульфидом водорода при комнатной температуре и давлении. Оценка стойкости трубного проката против общей и локальной коррозии проводилась потенциодинамическим и потенциостатическим способами.

Исследование деформационно-скоростных и температурных параметров технологии производства горячего проката проводили на основании результатов испытаний на испытательном комплексе «Gleeble System 3800». Для построения ТКД распада аустенита применяли деформационно-закалочный дилатометр DIL 805 A-D.

В **третьей главе** изучено влияние неметаллических включений в низколегированных малоуглеродистых сталях на коррозионную стойкость. Для исследования и определения основных характеристик неметаллических включений был использован метод объемного исследования характера распределения неметаллических включений с использованием электролитической экстракции (ЭЭ) (рисунок 2а, б). Процесс ЭЭ основан на быстром электролитическом растворении стальной матрицы образца с использованием электролита АА (10 % ацетилаcetона – 1 % тетраметиламмония хлорид-метанол). После извлечения включений из образца электролит, содержащий нерастворенные неметаллические включения, фильтровали через мембранный поликарбонатный фильтр с порами диаметром 0,4-мкм. Для исследования первоначальной стадии коррозионного процесса использовали способ химической экстракции, который проводили в том же электролите АА в течение 30 минут без подачи электрического тока.

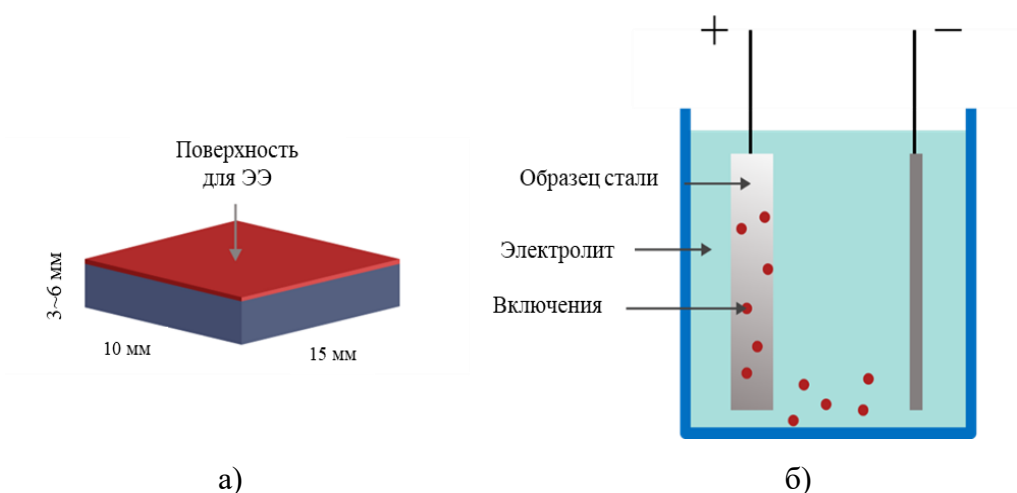


Рисунок 2 – Схема процесса электролитической экстракции металлического образца: а) габариты образца для ЭЭ; б) принципиальная схема процесса ЭЭ.

Анализ неметаллических включений в двух образцах, отобранных от труб, бывших в эксплуатации до выхода из строя в течение 3-х лет (образец Т-1) и более 10 лет (образец Т-2), показал, что общее количество включений в единице объема металла (объемная плотность НВ) для образца Т-1 составила $6,02 \cdot 10^4$ вкл./мм³ по сравнению с $8,36 \cdot 10^4$ вкл./мм³ для образца Т-2, соответственно. Средний эквивалентный диаметр неметаллических включений для образца Т-1 также меньше, чем для образца Т-2. При этом образец Т-2 характеризуется относительно высокими значениями соотношения сторон НВ, т.е. вытянутой конфигурацией неметаллических включений, в отличие от глобулярной морфологии включений, обнаруженных в образце Т-1 (рисунок 3а,б). Таким образом, для коррозионной стойкости трубопроводов в эксплуатационных условиях отечественных нефтепромыслов определяющую роль не всегда играет средний размер и количество неметаллических включений, следует учитывать также и их конфигурацию.

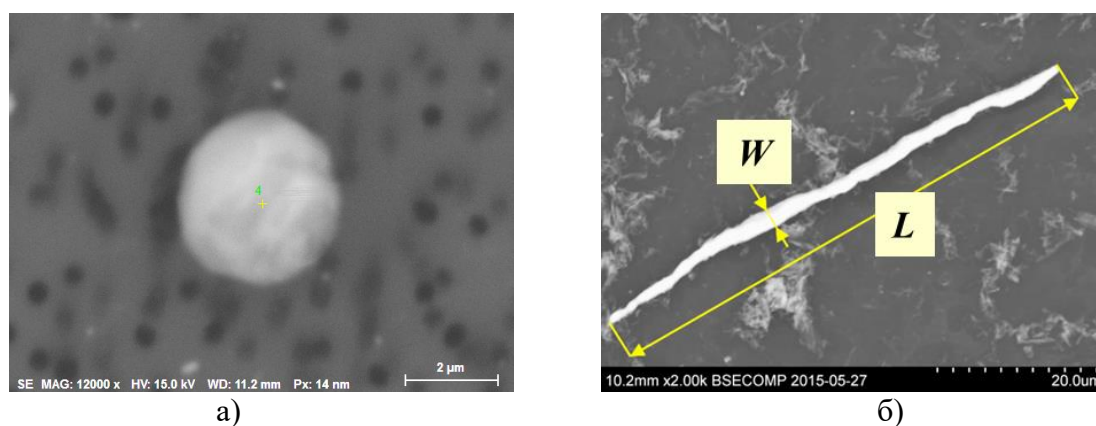


Рисунок 3 – Неметаллические включения на поверхности поликарбонатного фильтра после ЭЭ: а) поверхность образца Т-1; б) поверхность образца Т-2

Образец трубной стали Т-1, период эксплуатации которого составил менее 3 лет, характеризуется значительным количеством (~70 – 75 %) включений на основе Al_2O_3 и MgO (алюмомагниева шпинель), которые практически отсутствуют в образце Т-2, что может являться причиной низкой коррозионной стойкости первой трубы по сравнению со второй. С учетом различного содержания алюминия в образце Т-1 (0,025 %) по сравнению с образцом Т-2 (0,008 %) установлено, что раскисление и легирование данного сортамента продукции необходимо производить минимальным технологически возможным количеством алюминия с целью получения минимального содержания включений на основе Al_2O_3 и MgO .

После химической экстракции на поверхности двух промышленных образцов проката трубных сталей с помощью сканирующего электронного микроскопа в сочетании с микрорентгено-спектральным анализом были обнаружены включения и разного рода коррозионные повреждения вокруг них, которые в зависимости от коррозионного растворения металлической матрицы были отнесены к четырем типам:

1) Включения с образованием глубокого коррозионного кратера сравнительно небольшого размера относительно величины включения ($KD_{cr}^* = 1,8 \sim 12,1$), с одновременным растворением поверхности металлической матрицы вокруг этих включений несколько большей площади, с образованием окружающего кратера неглубокой коррозионной выемки ($KD_{pit}^{**} = 19 \sim 258$);

2) Включения, имеющие глубокие кратеры ($KD_{cr} = 2,0 \sim 4,9$), без образования коррозионной выемки вокруг указанного кратера;

3) Включения, которые содержат НВ, содержащие частичные коррозионные кратеры в металлической матрице ($KD_{cr} = 1,3 \sim 1,9$). Кроме того, коррозионные кратеры наиболее выражены вокруг некоторых специфических фаз этих комплексных включений;

4) Включения, не имеющие коррозионных кратеров и ямок ($KD_{cr} = 1,0 \sim 1,2$). Данные включения не проявляют склонности к растворению металлической матрицы вокруг.

Установлено, что интенсивность первоначального коррозионного растворения металлической матрицы вокруг различных неметаллических включений определяется в большей степени их составом. Для исследованных образцов проката оксидные включения и оксидные фазы ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$) в сложных включениях обычно не содержат кратеров металлической матрицы. В то время как включения и фазы CaS в комплексных неметаллических включениях могут инициировать коррозионное растворение

* KD_{cr} - коэффициент коррозионного растворения металлической матрицы для кратеров.

** KD_{pit} - коэффициент коррозионного растворения металлической матрицы для коррозионных выемок.

металлической матрицы вокруг них. При этом площадь кратера вокруг подобных включений увеличивается с повышением содержания CaS в них.

Рассчитанные значения величины мозаичных напряжений (σ_r) вокруг НВ подтвердили, что имеющиеся оксидные фазы (CaO-Al₂O₃-MgO) во включении и включения TiN создают сжимающие напряжения вокруг НВ и, тем самым, не вызывают первичной коррозии вокруг стальной матрицы (рисунок 4а,б). И наоборот, растягивающие напряжения в слое металлической матрицы (рисунок 4в), возникающие вокруг включений, содержащих фазы CaS, способствуют более легкой начальной коррозии стали вокруг них. На рисунке 4г схематически показаны напряжения в слое металла, возникающие вокруг различных неметаллических включений.

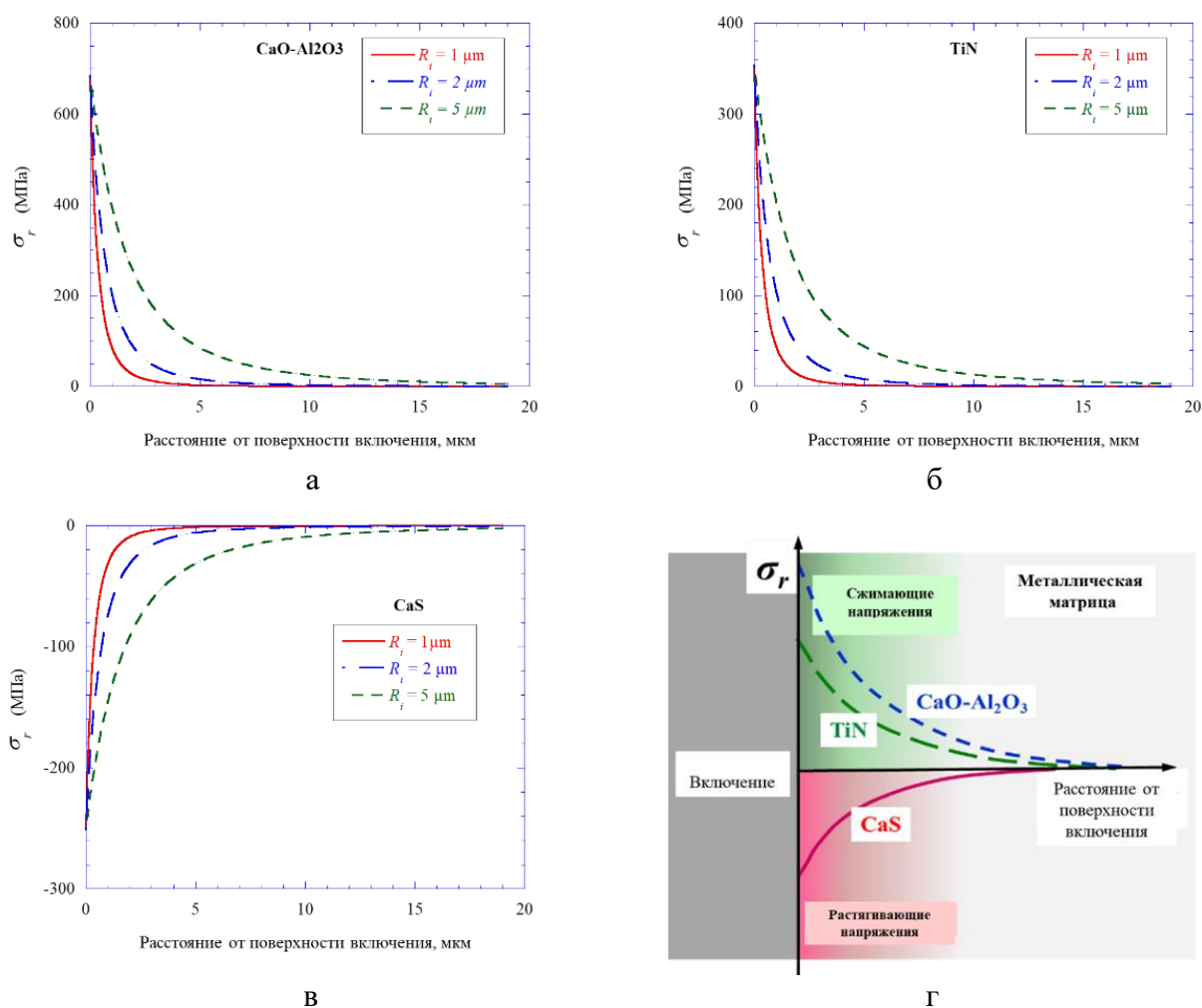


Рисунок 4 – Расчетные мозаичные (радиальные) напряжения: а – вокруг включений CaO-Al₂O₃, б – включений TiN, в – включений CaS разного размера, г – схема возникающих сжимающих и растягивающих напряжений вокруг различных НВ в окружающем слое стальной матрицы

Результаты исследований, представленные в третьей главе, позволили сделать вывод о том, что одним из факторов, оказывающих решающее влияние на коррозионную стойкость трубных сталей являются неметаллические включения, а именно их состав, количество, морфология и концентрация в металле. Результаты исследования первоначальной стадии коррозионного процесса также подтвердили, что с точки зрения коррозионной активности наибольшее негативное влияние оказывают включения на основе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, а также включения на основе или содержащие в своем составе CaS .

В четвертой главе рассмотрены различные концепции химического состава стали с повышенной коррозионной стойкостью и представлены рекомендации по технологическим параметрам выплавки. Установлено, что снижение концентрации алюминия и серы в металле по ходу внепечной обработки низколегированных малоуглеродистых сталей приводит к формированию неметаллических включений сложного состава, включающих O, Ca, Mg, Al, S, а также Si, Mn, Cr, Ti. Неметаллические включения в образцах проката плавки с содержанием алюминия $< 0,015 \%$ и серы $< 0,0015 \%$, существенно модифицированы и не соответствуют обычным представлениям о коррозионно-активных неметаллических включениях. Глобулярную форму преимущественно имеют включения с повышенным содержанием кальция, что можно объяснить появлением на их поверхности легкоплавких алюминатов кальция. Низкое содержание алюминия в металле по ходу внепечной обработки делает процесс раскисления металла комплексным, приводит к участию в раскислении кремния и других компонентов расплава, а также ухудшает условия для образования алюмомагниево-шпинели.

Для обеспечения механических характеристик и повышения коррозионной стойкости проката класса прочности K52 были проведены экспериментальные выплавки лабораторных образцов различных химических составов. При этом было предусмотрено варьирование содержания основных элементов (C, Cr, Ni, Cu), которые могут влиять на коррозионную стойкость, при постоянном содержании кремния, марганца, алюминия и микролегирующих элементов. Результаты электрохимических коррозионных испытаний исследуемых экспериментальных плавок приведены в таблице 1.

Полученные результаты были использованы для проведения статистического анализа влияния химического состава на коррозионную стойкость. В таблице 2 представлены коэффициенты парной корреляции химического состава с характеристиками коррозионной стойкости.

Таблица 1 Результаты электрохимических коррозионных испытаний экспериментальных плавок.

Номер образца	Потенциодинамические исследования	Потенциостатические исследования
	i при обратном ходе при E св.кор, (А/м ²)	i насыщения, (мА/см ²)
Э-1	0,12	4,90
Э-2	3,25	5,05
Э-3	2,78	5,75
Э-4	4,45	6,16
Э-5	4,07	5,82
Э-6	1,24	5,49
Э-7	4,06	5,58
Э-8	3,44	5,62

Таблица 2 Коэффициенты парной корреляции содержания химических элементов и показателей коррозионной стойкости для сталей рассматриваемого класса

Элемент	i насыщения, мА/см ²	i при обратном ходе, мА/см ²
C	-0,276	-0,299
Si	0,700	0,648
Mn	0,319	0,375
Cr	-0,549	-0,462
Ni	-0,188	-0,161
Cu	-0,053	-0,343
Al	0,861	0,467
Ti	0,458	0,102
V	-0,030	0,123
Nb	0,544	0,780

Снижение содержания алюминия в низкоуглеродистых сталях является необходимым условием получения низких значений тока насыщения и, соответственно, высокой коррозионной стойкости. Отмечены сравнительно высокие коэффициенты корреляции хрома с обеими характеристиками коррозионной стойкости. Высокую коррозионную стойкость показали образцы, в том числе с самым высоким и самым низким содержанием углерода, но имеющие в своем составе хром на верхнем пределе исследованного интервала – около 0,8%; а также содержащие минимальное количество алюминия (0,005-0,018%) и титана (не более 0,019%). Для этих составов легирующих композиций были проведены испытания механических свойств экспериментального проката.

Результаты механических испытаний показали, что сравнительно высокие значения временного сопротивления соотносятся с более высоким содержанием углерода в исследуемых образцах сталей (рисунок 5а,б).

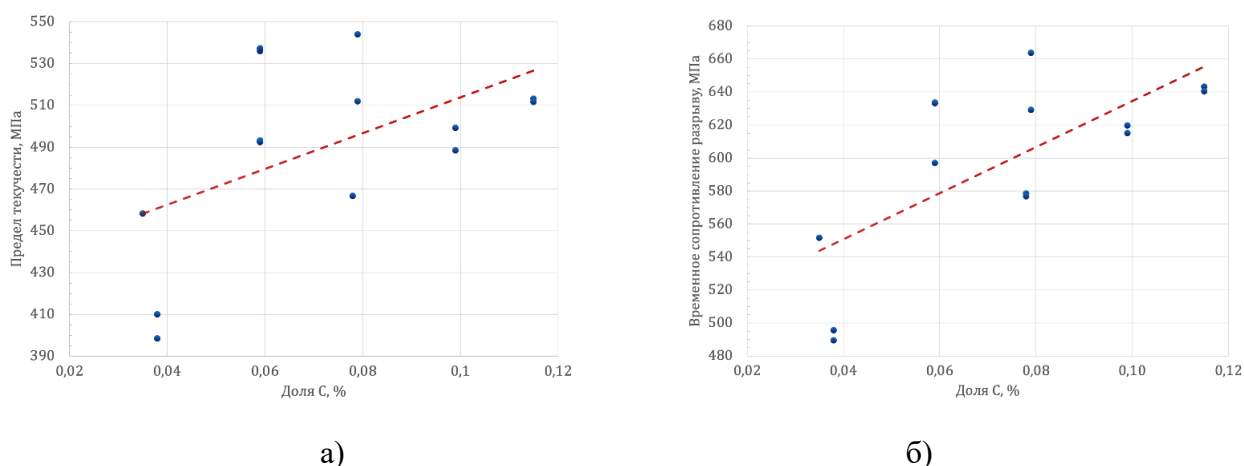


Рисунок 5 – Влияние содержания углерода на предел текучести (а) и временное сопротивление разрыву (б)

Полученная структура сталей со сравнительно более высокой коррозионной стойкостью – феррито-перлитная, при этом содержание перлита уменьшается со снижением содержания углерода. Для всех исследованных образцов экспериментального проката получен близкий размер зерна – в среднем около 10 мкм.

На основе проведенного анализа состава, свойств и структуры экспериментальных плавок определен характер влияния основных легирующих компонентов на коррозионную стойкость. Установлена целевая структура проката для обеспечения высокой коррозионной стойкости низкоуглеродистой стали с содержанием углерода не более 0,07 %, при условии формирования легирующей композиции на основе хрома (0,4 – 0,7%), а также микролегирования титаном (не более 0,015 %) и пониженного содержания алюминия (не более 0,03 %).

В пятой главе представлены результаты физического моделирования процессов горячей деформации и последующего охлаждения для экспериментальных составов разрабатываемой низколегированной малоуглеродистой стали. В результате экспериментальной выплавки были получены образцы низколегированной стали для четырех различных легирующих композиций. Полученные в ходе дилатометрических испытаний кривые для исследуемого диапазона скорости охлаждения (0,1 – 100 °C/с), микроструктуры и измеренная твердость были использованы для построения ТКД распада аустенита. Проведенные эксперименты позволили установить, что получение структуры с максимальным содержанием бейнита или мартенсита является крайне сложной задачей, что связано с необходимостью обеспечения высоких скоростей охлаждения (75 °C/с) и точного контроля температуры полосы. Производство проката с феррито-бейнитной структурой, считающейся одной из лучших с точки зрения соотношения механических свойств и коррозионной стойкости, для всех исследованных композиций сталей возможно: при этом не требуется сверхвысоких скоростей охлаждения, которые могут вызывать появление

термических напряжений и микротрещин, негативно сказывающихся на коррозионной стойкости металла.

На деформационном модуле дилатометра DIL 805 A-D осуществляли моделирование этапов деформационного режима на стадиях черновой и чистовой прокатки экспериментального состава стали с низким содержанием углерода (0,07 %) и марганца (0,88 %), легирующая композиция которого предусматривала содержание хрома (0,74 %) и меди (0,24 %), микролегирование никелем (0,013 %) и молибденом (0,01 %), а также низкое содержание ниобия (0,0038 %) и алюминия (0,01 %). Технологическая схема моделирования на деформационно-закалочном дилатометре DIL 805 A/D режимов производства рулонного горячекатаного проката представлена на рисунке 6. После заключительного обжатия образцы непрерывно охлаждали в широком диапазоне скоростей до комнатной температуры (таблица 3). Варьируемыми параметрами были выбраны: температура конца черновой прокатки $T_{к.чер}$ (температура после 5-й клетки); температура начала $T_{н.чис}$ и конца $T_{к.чис}$ чистовой прокатки; температура конца ламинарного охлаждения $T_{к.уло}$, как наиболее значимые технологические параметры, влияющие на качество получаемого проката.

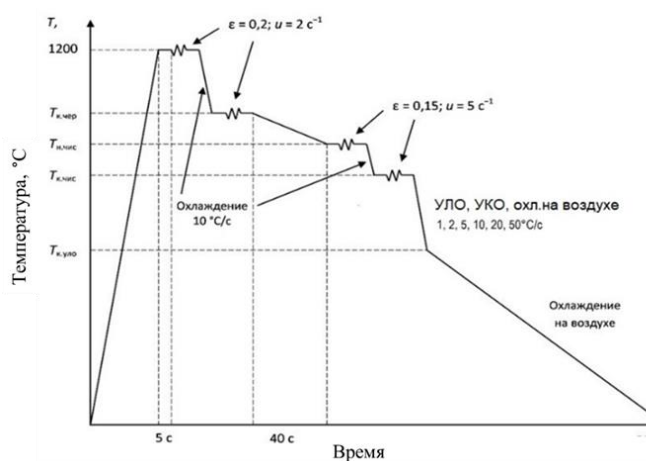


Рисунок 6 – Технологическая схема моделирования на деформационно-закалочном дилатометре DIL 805 A/D

Таблица 3 Температурные параметры моделирования деформационно-закалочном дилатометре DIL 805 A/D

Номер режима	$T_{к.чер}, ^\circ C$	$T_{н.чис}, ^\circ C$	$T_{к.чис}, ^\circ C$	$T_{к.уло}, ^\circ C$
1	1075	900	825	475
2	1090	900	800	450
3	1090	900	800	500
4	1090	940	850	450
5	1090	940	850	500
6	1050	880	800	450
7	1050	880	800	500
8	1050	910	850	450
9	1050	910	850	500

Полученные результаты показывают, что средняя величина расчетного сопротивления разрыву полученных образцов для всех режимов прокатки составляет $\sigma_b^{cp} = 556$ МПа, при диапазоне изменения $\sigma_b = 540 - 593$ МПа, т.е. полностью соответствует требованиям проката класса прочности K52. В пределах рассмотренной выборки явно выраженной зависимости структурных и прочностных характеристик исследуемых образцов от параметров варьирования технологических параметров не выявлено.

Для экспериментальной прокатки данного состава стали на стане ДУО-300 был выбран деформационный режим №5, при котором обеспечивалось получение средней температуры раската за пятой клетью $T_{к.чер} = 1090$ °С; температура начала чистовой прокатки составляла $T_{н.чис} = 940$ °С. Смотку и охлаждение рулона на воздухе моделировали остыванием полос в печи от температуры смотки $T_{смотки} = 500$ °С.

Полученный экспериментальный прокат имел однородную по толщине структуру, представленную зернами феррита и зернами бейнитоподобной смеси (рисунок 7а,б). Размер ферритных зерен варьировался от 10 до 30 мкм, доля феррита в структуре проката составила 85-90%.

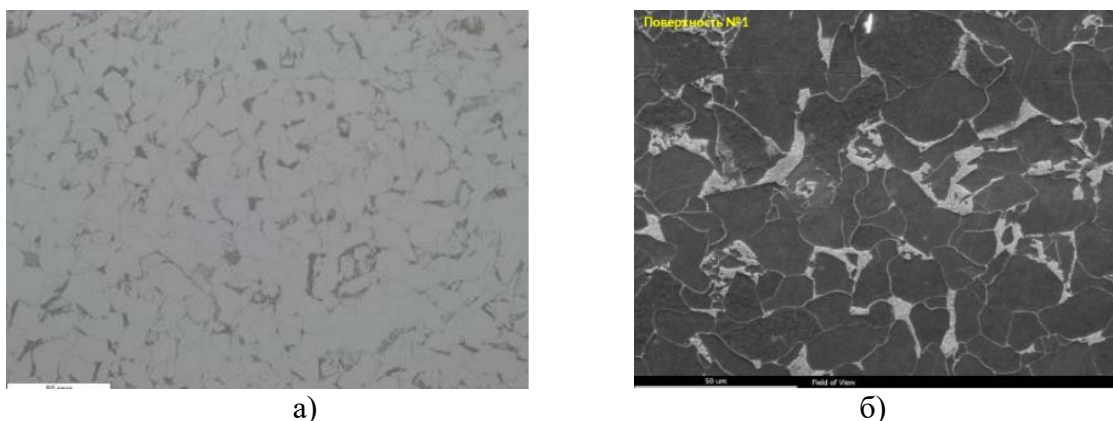


Рисунок 7 – Микроструктура экспериментального проката, оптическая микроскопия: а) увеличение x100; б) увеличение x500.

Химический состав стали

Анализ результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволил предложить новый химический состав низколегированной малоуглеродистой стали, представленный в таблице 4.

Таблица 4 Химический состав низколегированной малоуглеродистой стали CORDIS (07XНД)

Содержание элементов, масс. %													Углеродный эквивалент
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	V	Nb	Mo	[C] _э
0,07	0,25	0,57	0,011	0,001	0,51	0,22	0,25	0,02	0,015	0,075	0,032	0,14	0,34

Для разработанного химического состава (таблица 4) стали CORDIS (07XНД) на деформационно-закалочном дилатометре DIL 805 A-D был получен комплект образцов рулонного проката при разной скорости охлаждения с различными структурными состояниями (рисунок 8-13), анализ которых позволил построить соответствующие ТКД (рисунок 14).

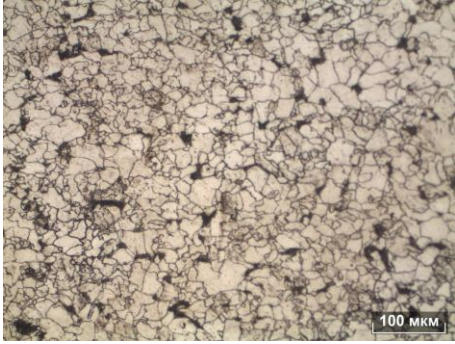


Рисунок 8 – Скорость охлаждения 1 °C/с.
Состав структуры: феррит полигональный
(основная структура) + перлит
сорбитообразный (< 10 %)

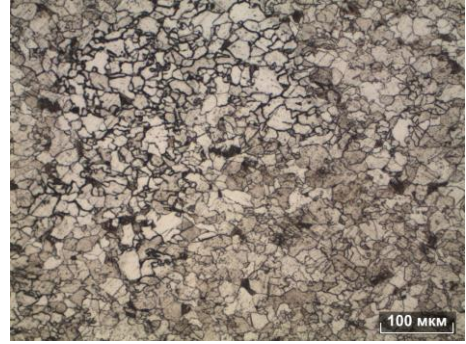


Рисунок 9 – Скорость охлаждения 2 °C/с.
Состав структуры: феррит полигональный
(основная структура) + перлит
сорбитообразный

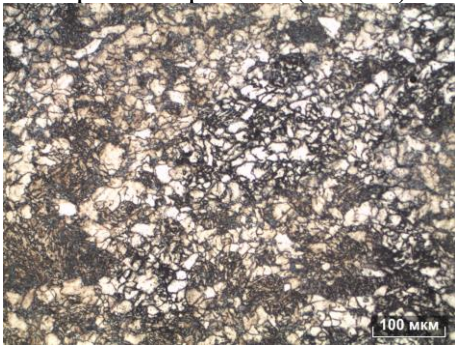


Рисунок 10 – Скорость охлаждения 5 °C/с.
Состав структуры: феррит полигональный +
бейнит (игольчатый)

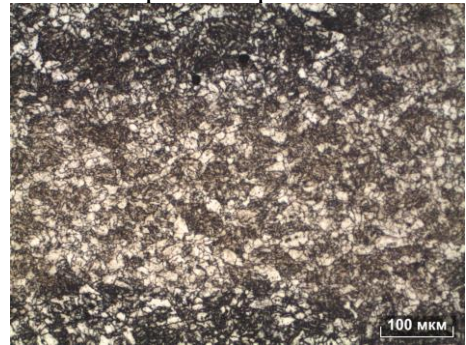


Рисунок 11 – Скорость охлаждения 10 °C/с.
Состав структуры: феррит + бейнит в
соотношении 70/30

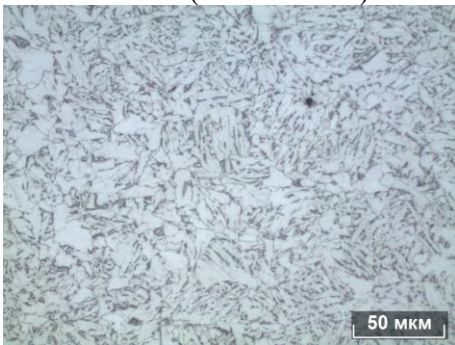


Рисунок 12 – Скорость охлаждения 20 °C/с.
Состав структуры: бейнит игольчатый +
феррит (игольчатый + аллотриоморфный)

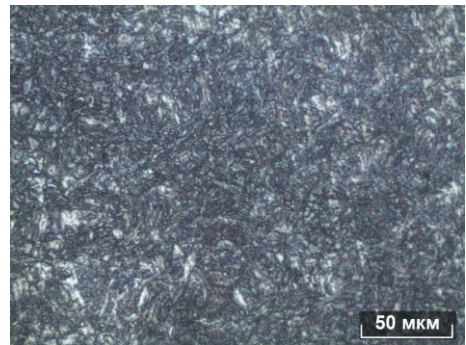


Рисунок 13 – Скорость охлаждения 50 °C/с.
Состав структуры: бейнит — основная
структура + феррит

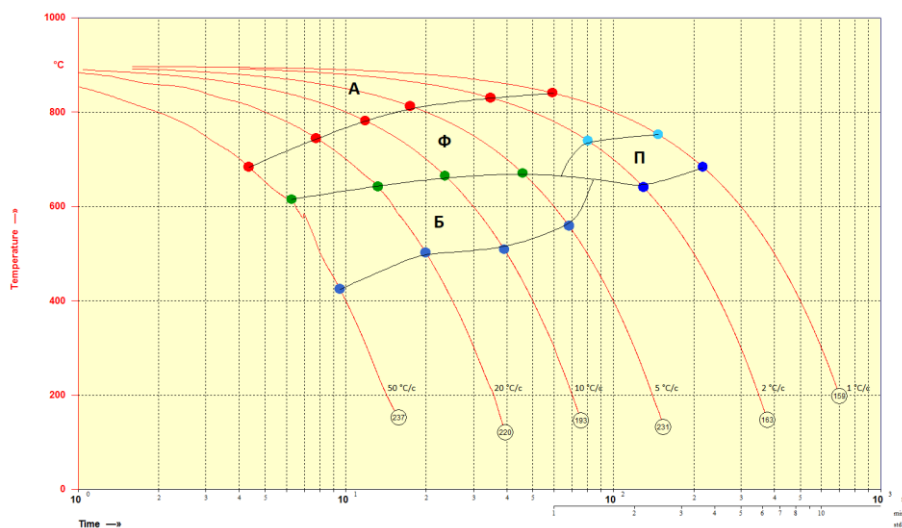


Рисунок 14 – Термокинетическая диаграмма рулонного проката CORDIS (07ХНД)

Получение феррито-перлитной структуры с преобладанием феррита наблюдается при низких скоростях охлаждения порядка 1-2 °C/c. При скорости охлаждения около 5 °C/c характер структурообразования неустойчивый. Для данного химического состава стали целесообразно использовать скорость ламинарного охлаждения выше 5 °C/c для получения ферритно-бейнитной структуры или ниже 5 °C/c для получения ферритно-перлитной структуры.

При скорости ламинарного охлаждения в диапазоне 5 – 10 °C/c снижение температуры скотки от $T_{к.о} = 670 - 680^{\circ}\text{C}$ до $550 - 500^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению содержания бейнита за счет того, что кривые охлаждения проходят более значительную часть бейнитной области. Максимальное относительное содержание бейнита при уменьшении содержания феррита можно ожидать с прекращением ламинарного охлаждения на уровне $T_{к.о} = 500 - 520^{\circ}\text{C}$. Для получения ферритно-перлитной структуры проката, целесообразно использовать температуру конца охлаждения $T_{к.о} = 580 - 600^{\circ}\text{C}$ при скорости охлаждения 5 °C/c.

Для физического моделирования процессов, проходящих при горячей деформации, и определения термомеханических коэффициентов для расчета сопротивления деформации была использована установка Hydrowedge II комплекса «Gleeble 3800». Для разработанного химического состава стали CORDIS (07ХНД) проведены испытания в температурном диапазоне 950 – 1150 °C (с шагом 50 °C) при трех скоростях деформации 0,1; 3 и 30 с⁻¹. Термодеформационный цикл испытаний включал в себя: предварительный нагрев образца до 1200 °C (выдержка 60 сек); остывание до температуры деформации; предварительная деформация ($\varepsilon = 0,1$) и далее основная деформация.

В исходные диаграммы деформации, полученные при испытании по схеме одноосного сжатия цилиндрических образцов, были внесены корректирующие поправки, необходимые для

установления вида «истинной диаграммы деформации» при данных температурно-скоростных условиях деформационного воздействия (рисунок 15).

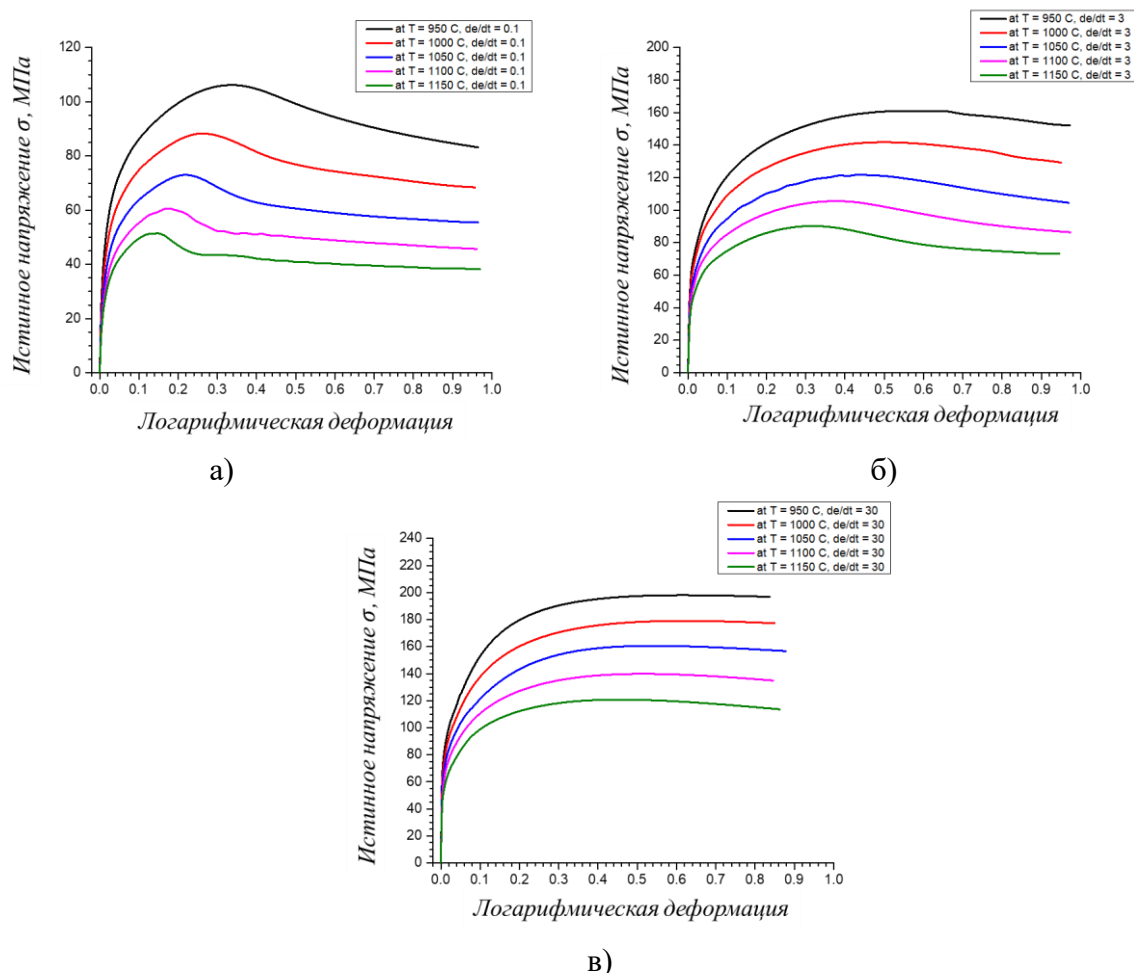


Рисунок 15 – Кривые сопротивления деформации стали 07ХНД при разных температурах и скоростях деформации: 0,1 (а), 3 (б) и 30 с⁻¹ (в)

Методом наименьших квадратов найдено функциональное приближение (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9998$), отражающее зависимость $\ln(S)$ от обратной абсолютной температуры и логарифма скорости деформации:

$$Z = \ln(S) = -10.6917 \cdot X^2 - 0.3670 \cdot XY - 0.0063826 \cdot Y^2 + 21.752 \cdot X + 0.4188 \cdot Y - 5.674 \quad (1)$$

где $X = 1000/T$;

T – абсолютная температура (K);

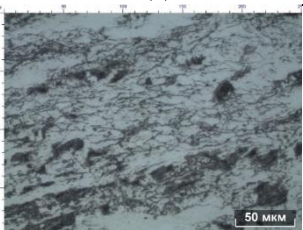
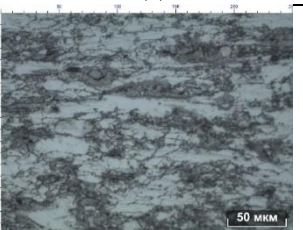
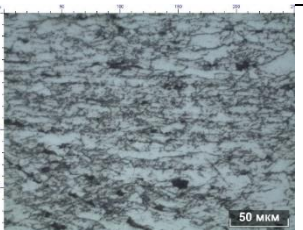
$Y = \ln(\text{de/dt})$ – натуральный логарифм скорости деформации.

На основе полученных данных был проведен расчет параметров горячей деформации и параметра Зенера-Холломона, а также определена энергия активации исследуемого химического состава стали, которая составила 334 ± 5 кДж/моль.

С использованием комплекса «Gleeble 3800» также проведены исследования влияния последеформационного охлаждения на конечную структуру и свойства разработанного рулонного проката. В ходе эксперимента образец нагревался до температуры 1200 °С и выдерживался при данной температуре в течение 15 с. Затем охлаждался до температуры 1050 °С и деформировался со скоростью деформации: $\dot{\epsilon} = 5 \text{ с}^{-1}$ и степенью деформации $\epsilon_1 = 40 \%$ (черновая прокатка). Далее охлаждался до температуры 810 °С и дважды деформировался с одинаковой степенью деформации: $\epsilon_3 = \epsilon_2 = 25 \%$, и скоростью деформации: $\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$, при междеформационной паузе равной 1 с (чистовая прокатка). После завершения деформации были имитированы следующие варианты охлаждения проката: «режим ускоренного охлаждения», предусматривающий принудительное охлаждение потоком воздуха под давлением из форсунок, установленных в рабочей камере модуля со скоростью 30 °С/с; «режим воздушного охлаждения», который предусматривал естественное охлаждение на воздухе со скоростью 0,025 °С/с (40 – 60 °С/час); «базовый режим», предусматривающий моделирование фактических условий охлаждения полосы на отводящем рольганге НШПС 2000: ламинарное охлаждение непосредственно после прокатки со скоростью около 15 °С/с до температуры 600 °С и последующее охлаждение в рулоне 0,025 °С (40 – 60 °С/час) до комнатной температуры.

Результаты качественной оценки структуры образцов, полученных при моделировании различных режимов охлаждения на основе соответствующего металлографического анализа, представлены в таблице 5. Полученные значения временного сопротивления разрыву ($\sigma_B = 630$ МПа), в том числе для реализованного «базового режима охлаждения» на отводящем рольганге НШПС 2000, показал возможность получения проката класса прочности К52 (предел прочности: 510 – 610 МПа) для нового химического состава стали.

Таблица 5 Металлографический анализ структурных составляющих и результаты измерения твердости испытанных образцов

Режим	Ускоренное охлаждение	Воздушное охлаждение	Базовый режим
Микроструктура (x100)			
Структурные составляющие	Феррит–Перлит (сорбитообразный)	Феррит–Перлит (сорбитообразный).	Феррит–Перлит (сорбитообразный). Дисперсная структура.
HV10	212	198	199
HB	202	189	189
σ_B , МПа	675	630	630

Технология производства рулонных полос с повышенной коррозионной стойкостью

По результатам проведенных исследований рекомендована следующая технология горячей прокатки на НШПС 2000: нагрев непрерывнолитой заготовки до температуры 1200 – 1280 °С, черновая прокатка до толщины подката, составляющей 4,75 от толщины готовой полосы, при этом относительные обжатия в первом проходе не менее 30 % и не менее 20 % в последнем проходе черновой группы клетей, чистовая прокатка при величине единичного относительного обжатия в первом проходе не менее 30 % и не более 10 % в последнем проходе до температуры конца прокатки 898 °С, последующее водяное охлаждение прокатанной полосы на отводящем рольганге с последующей смоткой при температуре 585-670 °С.

Результаты расчета энергосиловых параметров процесса горячей прокатки с использованием зависимости (1) показали, что при внедрении на НШПС 2000 разработанной технологии производства низколегированных рулонных полос с повышенной коррозионной стойкостью при соблюдении деформационного режима обжатий (рисунок 16) усилия прокатки для чистовой группы клетей изменяются от 72 % в первых проходах до 40 % в последних проходах от их допустимой величины (рисунок 17). Момент и мощность двигателя не превышают допустимых значений (рисунок 18, 19). Мощность на валу двигателя составляет от 60 до 80 % в первых клетях черновой группы, в клетях чистовой группы составляет от 22 % до 59 % от ее допустимой величины (рисунок 19).

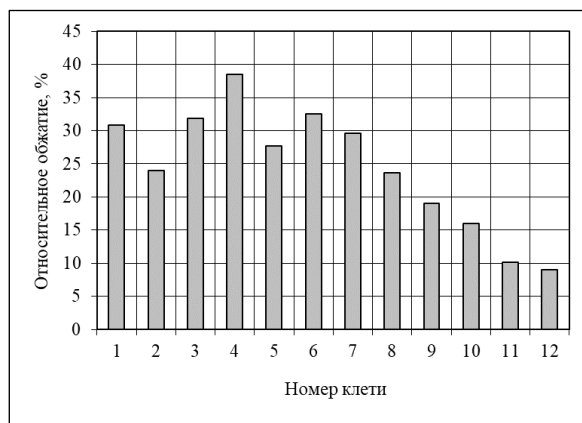


Рисунок 16 – Деформационный режим горячей прокатки по клетям НШПС 2000



Рисунок 17 – Усилие прокатки по клетям НШПС 2000



Рисунок 18 – Момент двигателя по клетям НШПС 2000

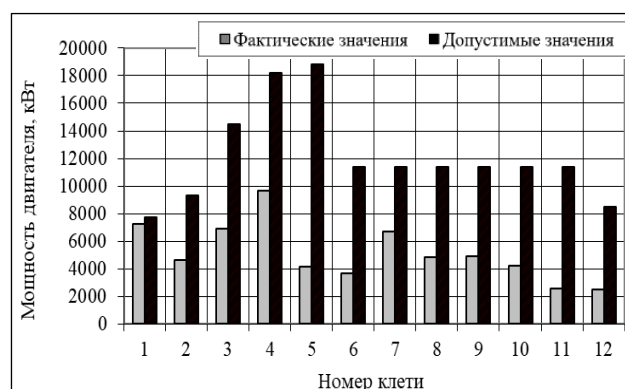


Рисунок 19 – Мощность на валу двигателя по клетям НШПС 2000

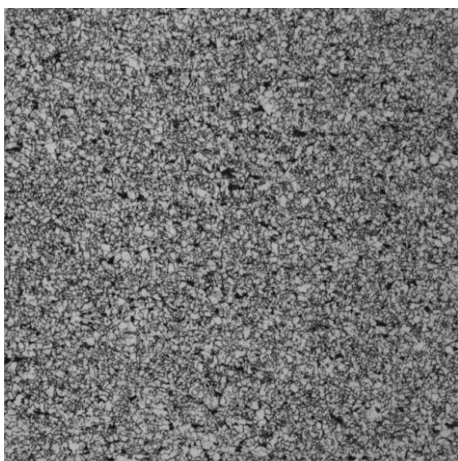
Деформационный и температурный режимы удовлетворяют предусмотренным ограничениям по оборудованию и рассматриваемой технологии производства рулонного проката CORDIS (07XНД) класса прочности K52 энергосиловые параметры прокатки не превышают номинальных допустимых значений.

В **шестой главе** приводятся и анализируются результаты промышленного опробования и внедрения технологии производства низколегированных рулонных полос с повышенной коррозионной стойкостью на ПАО «Северсталь».

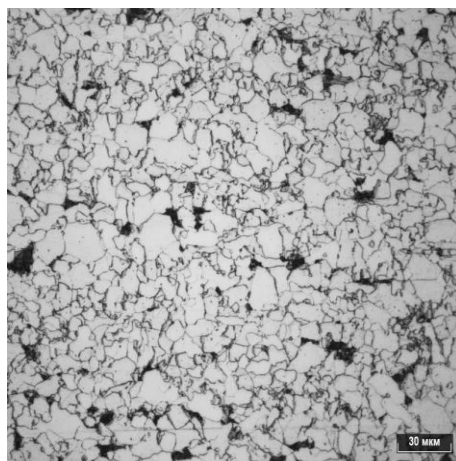
В условиях НШПС 2000 ЛПЦ-2 ПАО «Северсталь» из разработанной марки стали CORDIS (07XНД) изготовлена промышленная партия рулонного проката (более 480 т), которая по комплексу свойств полностью отвечает требованиям рулонного проката класса прочности K52, а также соответствует основным эксплуатационным характеристикам материала для нефтепромысловых труб (таблица 6). Полученная структура проката характеризуется содержанием феррита 95 – 96 % и перлита 4 – 5 % (рисунок 20) с зерном феррита 9 – 11 балл.

Таблица 6. Механические и эксплуатационные свойства промышленных партий проката CORDIS (07XНД) класса прочности K52

Значение	σ_B Н/мм ²	σ_T Н/мм ²	δ , %	KCV ₋₄₀ Дж/см ²	ДВС ₋₅₀ (В), %	Балл НВ	Скорость общей коррозии мм/год	Скорость локальной коррозии мм/год	Стойкость к ВР, %
<i>Требования к прокату K52</i>									
min-max	510- 610	350- 510	≥23	≥150	≥60	≤2,5	≤0,15	≤3	0
<i>Фактические данные</i>									
min-max	510- 545	391- 505	24- 31	220/228/ 243/190/ 215/235	100/100/ 100/100/ 100/100	≤1,5	0,1	0,2	0



а)



б)

Рисунок 20 – Микроструктура промышленного рулонного проката CORDIS (07XHD) класса прочности K52: а) $\times 200$; б) $\times 500$.

Зависимость временного сопротивления разрыву, предела текучести и доли вязкой составляющей для полученных образцов рулонного проката CORDIS (07XHD) от технологических параметров производственного процесса на прокатном переделе представлены на рисунках 21, 22.

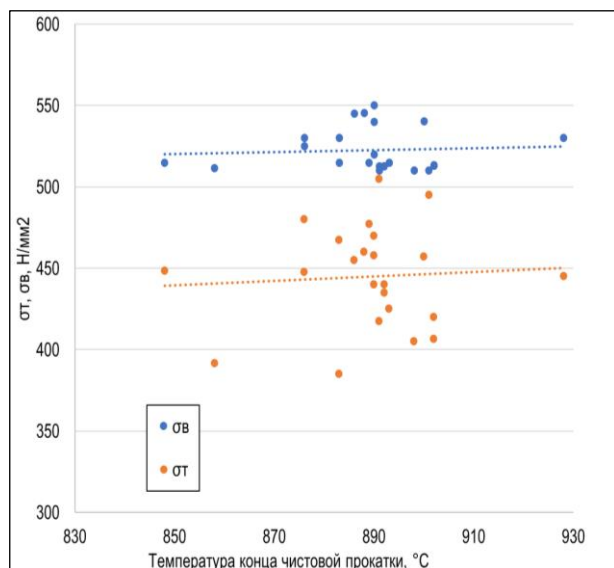


Рисунок 21 – Влияние температуры конца чистовой прокатки $T_{к.п.}$ на прочностные свойства рулонного проката CORDIS (07XHD)

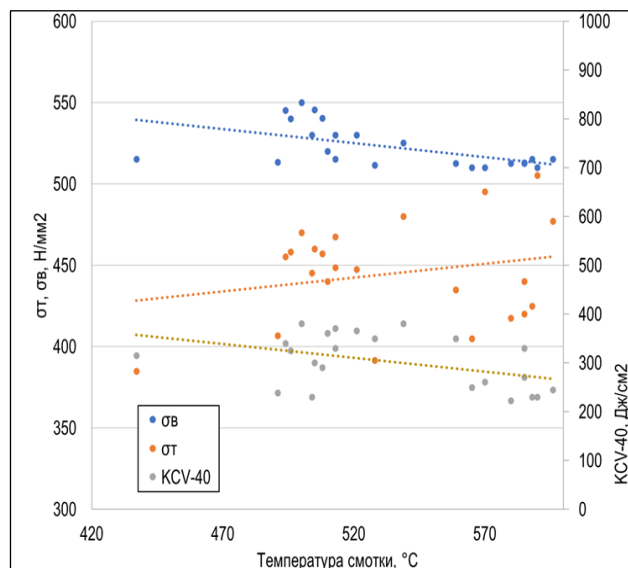


Рисунок 22 – Влияние температуры смотки $T_{см}$ на прочностные свойства и хладостойкость рулонного проката CORDIS (07XHD)

Изменение значений механических характеристик стали определяется прежде всего характером изменения структуры. При температуре конца чистовой прокатки ($T_{кп}$) ниже 880°C ,

скорости ламинарного охлаждения в интервале температур «конец прокатки-смотка» может быть недостаточно для получения требуемого уровня прочностных характеристик (рисунок 21).

При повышении температуры смотки временное сопротивление разрыву монотонно уменьшается с одновременным повышением пластических характеристик (рисунок 22). Ламинарное охлаждение полосы до температуры ниже $T_{см} = 580\text{ }^{\circ}\text{C}$ не обеспечивает достаточно высокого уровня коррозионной стойкости и низкотемпературной вязкости ввиду слишком высокого содержания бейнитной составляющей. В то же время при температуре смотки выше $T_{см} = 670\text{ }^{\circ}\text{C}$ может иметь место также недостаточный уровень прочностных характеристик проката.

Хладостойкость стали (рисунок 22) слабо зависит от $T_{см}$ в интервале $500 - 590\text{ }^{\circ}\text{C}$, но при этом превышает минимально допустимые значения (150 Дж/см^2) данного параметра для всех исследованных промышленных образцов проката.

Полученные данные подтвердили правильность разработанных технических решений в части выбора допустимых значений технологических режимов производства низколегированных рулонных полос, обеспечивающих получение требуемых механических характеристик проката класса прочности K52 и также повышенной коррозионной стойкости.

Анализ результатов опытно-промысловых коррозионных испытаний труб из рулонного проката CORDIS (07ХНД) на действующих нефтесборных пунктах различных месторождений Западной Сибири (Урманское месторождение ООО «Газпромнефть-Восток», трубопровод Западно-Суторминского месторождения ООО «Газпромнефть Муравленко», Большетирское месторождение ООО «Иркутская нефтяная компания», БКНС 1000 Кокуйского месторождения ЦДНГ-10 ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ») показал его высокую коррозионную стойкость в сравнении со стандартными трубными сталями.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что одним из основных факторов, оказывающих негативное влияние на коррозионную стойкость низколегированной стали, являются неметаллические включения, а именно такие их параметры, как состав, количество, морфология и концентрация в металле. Результаты исследования коррозионного процесса показали, что существенное влияние на него оказывают включения на основе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ (алюмо-магниева шпинель), а также включения на основе или содержащие в своем составе CaS .

2. Установлено, что для получения проката с повышенной коррозионной стойкостью необходимо регулирование содержания Al (не более $0,020\text{ } \%$) по ходу ковшевой обработки, способствующее минимизации содержания включений на основе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$.

3. Разработана методика экспериментального исследования состава и объемного распределения неметаллических включений в низколегированном металлопрокате рассматриваемого сортамента, позволяющая оценить степень влияния этих включений на коррозионную стойкость.

4. По результатам анализа термокинетических диаграмм, построенных с использованием деформационного дилатометра, дана оценка характера процессов структурообразования при производстве низколегированного малоуглеродистого проката.

5. Разработана концепция нового экономнолегированного химического состава стали, содержащей мас. %: углерод 0,04-0,07, марганец 0,4-0,9, кремний 0,1-0,4, хром 0,2-0,7, медь 0,3-0,6, никель 0,15-0,60, алюминий не более 0,03, молибден не более 0,08, сера не более 0,003, фосфор не более 0,015, при выполнении соотношения $Nb+V+Ti \leq 0,15$, остальное – железо и неизбежные примеси (патент РФ №2679375).

6. Исследовано влияние температурно-скоростных и деформационных параметров процесса прокатки на протекание структурно-фазовых превращений в прокате, а также механизм формирования прочностных характеристик и показателей коррозионной стойкости. Определено, что основной технологической операцией процесса прокатки разработанного химического состава стали в части формирования показателей качества является режим ламинарного охлаждения полосы на отводящем рольганге широкополосного стана.

7. Разработана технология производства на НШПС 2000 проката CORDIS с повышенной коррозионной стойкостью класса прочности K52, предусматривающая черновую прокатку заготовки при величине единичного относительного обжатия в первом проходе не менее 30 % и не менее 20 % в последнем проходе с обеспечением толщины подката, равной 5,5 – 7,5 толщины готового проката, а чистовую прокатку при величине единичного относительного обжатия в первом проходе не менее 30% и не более 10% в последнем проходе, причем температура конца чистовой прокатки устанавливается из соотношения $T_{кп} = 800 \cdot K, ^\circ C$, где K - эмпирический коэффициент, составляющий $K=1,02 - 1,15$, а смотка полосы в рулон производится в диапазоне температур 585 – 670 °C (патент РФ №2675307).

8. Получены регрессионные уравнения, описывающие изменение сопротивления деформации в зависимости от термомеханических параметров для стали разработанного химического состава.

9. Опытнo-промысловые испытания промышленных образцов из стали CORDIS (07ХНД), полученных в производственных условиях НШПС 2000 ПАО «Северсталь» по разработанной технологии, показали высокие эксплуатационные характеристики по сравнению с серийным прокатом рассматриваемого сортамента.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Комиссаров А.А., Соколов П.Ю., Тихонов С.М., **Сидорова (Мазова) Е.П.**, Мишнев П.А., Матросов М.Ю., Кузнецов Д.В. «Металлофизические особенности производства малоуглеродистого проката для нефтепромысловых труб» // Сталь. 2018. № 11. С. 57-62.
2. Амежнов А.В., Родионова И.Г., Кузнецов Д.В., Комиссаров А.А., **Сидорова (Мазова) Е.П.** Влияние термической обработки на коррозионную активность комплексных неметаллических включений и коррозионную стойкость сталей в водных средах. // Metallurg 2018. №12. С.33-38
3. Карасёв А., Jönsson P.G., **Сидорова (Мазова) Е.П.**, Комиссаров А.А., Кузнецов Д.В., Мишнёв П.А., Митрофанов А.В. Опыт использования метода объемного исследования неметаллических включений для оценки коррозионной стойкости трубного проката.// Сталь. 2019. №2
4. Серов Г.В., Комиссаров А.А., Тихонов С.М., **Сидорова (Мазова) Е.П.**, Кушнерев И.В., Мишнев П.А., Д.В. Кузнецов Д.В. Влияние раскисления на состав неметаллических включений в низколегированной стали. Новые огнеупоры, №12, 2018.
5. **Sidorova (Mazova), E.**, Karasev, A.V., Kuznetsov, D., Jönsson, P.G. Modification of non-metallic inclusions in oil-pipeline steels by ca-treatment. Metals, Volume 9, Issue 4, April 2019
6. **Sidorova (Mazova), E.**, Karasev, A., Kuznetsov, D., Jönsson, P.G. Investigation of the Initial Corrosion Destruction of a Metal Matrix around Different Non-Metallic Inclusions on Surfaces of Pipeline Steels. Materials, 2022, 15(7), 2530
7. **Мазова Е.П.**, Тихонов С.М., Комиссаров А.А., Матросов М.Ю., Адигамов Р.Р., Мишнев П.А., Кузнецов Д.В. Опыт использования современных методов исследования неметаллических включений в низколегированном металлопрокате. Проблемы черной металлургии и материаловедения, №4, 2022. С.66-77.
8. Родионова И.Г., Митрофанов А.В., Тихонов С.М., **Сидорова (Мазова) Е.П.**, Комиссаров А.А., Кузнецов Д.В., Барабошкин К.А. «Северкор» - современный прокат для нефтепромысловых трубопроводов. Инженерная практика №12/2017
9. Кичигина Н.А., Комиссаров А.А., Ионов С.М., Тихонов С.М., **Мазова Е.П.**, Мишнев П.А., Кузнецов Д.В. Промысловые испытания труб из рулонного проката «Северкор» с повышенной коррозионной стойкостью. Инженерная практика №5-6/2020
10. **Sidorova (Mazova) E.** Non-metallic inclusions in pipeline steels and their effect on the corrosion resistance. Licential Thesis in Materials Science and Engineering. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden 2022

Патенты

1. Патент RU 2675307 Способ производства низколегированных рулонных полос с повышенной коррозионной стойкостью (авт.: **Сидорова (Мазова) Е.П.**, Митрофанов А.В., Серов Г.В., Киселев Д.А., Матросов М.Ю., Родионова И.Г., Комиссаров А.А., Кузнецов Д.В., Барабошкин К.А., Тихонов С.М., Зайцев А.И.)
2. Патент RU 2679375 Способ производства низкоуглеродистой стали с повышенной коррозионной стойкостью (авт.: **Сидорова (Мазова) Е.П.**, Митрофанов А.В., Матросов М.Ю., Мезин Ф.И., Комиссаров А.А., Кузнецов Д.В., Барабошкин К.А., Тихонов С.М.)
3. Патент RU 2697030 Способ проведения испытаний проката для нефтепромысловых труб на коррозионно-абразивный износ (авт.: Альхименко А.А., Колесов С.С., Шемякин Б.А., Митрофанов А.В., Тихонов С.М., Кузнецов Д.В., Комиссаров А.А., **Сидорова (Мазова) Е.П.**, Алексеева Е.Л.)
4. WO 2019/117756 A1 Method of manufacturing low-alloyed coiled strip of higher corrosion resistance. Mitrofanov A.V., Baraboshkin K.A, Tikhonov S.M, **Sidorova (Mazova) E.P.** et.