

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

Комиссаров Александр Александрович

МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ И СПЕЦИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ  
МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Специальность 2.6.1  
«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Диссертация  
на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:  
д.т.н., профессор Никулин Сергей Анатольевич

Москва – 2024

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

Микролегирование является эффективным способом достижения необходимого комплекса свойств низкоуглеродистых сталей. При серийном производстве металлопродукции со специальными свойствами подходы к разработке новых марок сталей и формированию оптимальной структуры в процессе изготовления отличаются от технологий изготовления единичных изделий, где зачастую ограничиваются лишь корректировкой химического состава и режимом термической обработки. Универсальной системы легирования сталей с учетом существующих требований к комплексу их физико-механических, эксплуатационных свойств и уникальности металлургических предприятий, на которых планируется производство металлопродукции со специальными свойствами, не существует. Поэтому разработка принципов микролегирования низкоуглеродистых сталей со спецсвойствами для решения конкретных задач по созданию инновационных производств металлопродукции чрезвычайно актуальна.

Низкоуглеродистые стали широко используются в различных отраслях промышленности, в том числе, в качестве материала промысловых трубопроводов (электросварные прямошовные трубы малого и среднего диаметра) на нефтегазоконденсатных месторождениях Российской Федерации. В условиях нефтепромыслов происходит процесс интенсивного воздействия металла труб с транспортируемой многокомпонентной высокоагрессивной средой. При этом в зависимости от состава транспортируемой среды возможна сероводородная или углекислотная коррозия стенок промысловых труб, а также коррозионно-эрозионный износ твердыми частицами вымываемых горных пород. Указанные процессы коррозионно-эрозионного износа являются наиболее вероятной причиной частого выхода из строя промысловых нефтепроводов, приводящих к экологическим и экономическим последствиям (разлив нефти или оборотной воды, дополнительные расходы на замену труб и ликвидацию аварии, остановка производительности скважины на период ремонтных работ). Использование труб, изготовленных из существующих марок низкоуглеродистых сталей, не позволяет существенно снизить аварийность нефтепромысловых трубопроводов, что обуславливает необходимость усовершенствования всего комплекса их эксплуатационных свойств за счет определения рациональной системы микролегирования, оптимизации структурно-фазового состояния металла. Для этого необходимы новые принципы микролегирования низкоуглеродистых сталей, методы исследования их структурно-фазового состояния и эксплуатационных свойств проката.

Помимо выбора легирующей композиции данного класса сталей малоизученным остается вопрос оценки степени влияния на коррозионную стойкость неметаллических включений и других избыточных фаз, в том числе, наноразмерных частиц.

Для бесшовных труб, которые используются на нефтепромыслах в виде насосно-компрессорных и обсадных труб, наиболее актуальной проблемой является повышение прочности и коррозионной стойкости. Трубы данного типа требуются в более высокопрочном исполнении, чем сварные – классы прочности L80, C90, P110 и выше.

Актуальной научно-практической задачей является разработка химического состава сталей и определение режимов термической обработки, которые будут пригодны для создания труб, эксплуатирующихся в осложненных условиях. Это необходимо для обеспечения трубами при освоении и развитии районов Крайнего севера России, где располагаются ключевые нефтегазовые и другие месторождения ценных полезных ископаемых.

Решение задачи обеспечения специальных свойств за счет микролегирования актуально и в строительстве различных промышленных объектов, где последствия чрезвычайных происшествий носят предельно резонансный характер (строительство трубопроводов, в том числе, магистральных нефтегазовых, промышленных металлоконструкций сложной формы, большепролетные, высотные и пр.).

Потребность в высокопрочном прокате с нормируемым пределом огнестойкости для изготовления металлоконструкций строительного назначения обусловлено возросшим количеством техногенных катастроф, чрезвычайных ситуаций и пожаров на объектах промышленной и социальной инфраструктуры, наносящих большой ущерб зданиям и сооружениям, характеризующихся значительными социальными последствиями. Это определяет необходимость разработки мер и технических решений по повышению огнестойкости незащищенных строительных металлоконструкций, являющихся составной частью всех зданий и сооружений III и IV степеней огнестойкости. Сравнительно низкая фактическая степень огнестойкости указанных зданий связана с недостаточно высокой огнестойкостью и прочностными характеристиками проката, используемого для изготовления металлоконструкций [1].

Для пожаростойких сталей требуется конструкционная прочность, которая существенно зависит от температурного воздействия. С повышением температуры вследствие пожара происходит сильная деградация прочностных свойств, что приводит к потере конструкционной прочности. Применение огнезащитных покрытий стальной конструкции позволяет лишь увеличить время до критического нагрева, при котором произойдет лавинообразное разупрочнение и разрушение, либо снизить степень

необратимой пластической деформации строительных металлоконструкций. Однако такое повышение огнестойкости имеет значительные ограничения использования – увеличение сроков и стоимости строительства конструкции, вредное и токсичное нанесение покрытий методом распыления.

Необходимым условием повышения степени противопожарной безопасности зданий является использование высокопрочного проката строительного назначения с повышенной огнестойкостью, позволяющего либо частично, либо полностью отказаться от огнезащитного покрытия. Для этого необходимо решение комплексной задачи разработки инновационной металлургической технологии производства подобной продукции.

В настоящее время единственным классом прочности, регламентирующим пожаростойкость проката, является класс с повышенной огнестойкостью С355П (ГОСТ 27772-2015 «Прокат для строительных стальных конструкций»). Строительные нормы совершенствуются и усложняются с каждым годом, сооружения становятся масштабнее, и требуется материал, полностью соответствующий всем требованиям безопасности сооружения.

Основной концепцией данной диссертационной работы является определение принципов и выработка общего подхода к управлению специальными свойствами сталей на основе микролегирования и совершенствования микроструктуры, необходимых для развития инновационных промышленных технологий производства металлопродукции. Под спецсвойствами в данном случае понимается повышенная коррозионная стойкость в многокомпонентных средах, огнестойкость, хладостойкость для создания новых трубных сталей (сварные промысловые, бесшовные насосно-компрессорные и обсадные трубы) и пожаростойких сталей строительного назначения (балки, колонны, фермы).

Диссертационные исследования проводились в рамках реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства:

**1.** НИОКТР «Разработка и освоение наукоемкой технологии производства хладостойкого и коррозионностойкого проката для изготовления прямошовных газонепроводных труб в рамках инфраструктурного развития ТЭК РФ с целью импортозамещения» в рамках соглашения №02.G25.31.0141 от 01.12.2015 г. по постановлению Правительства РФ №218 от 09.04.10.

**2.** НИОКТР «Разработка и освоение инновационной технологии производства высокопрочного стального проката для изготовления строительных конструкций с нормируемым пределом огнестойкости с целью обеспечения эксплуатационной безопасности производственных и гражданских объектов в экстремальных условиях» в

рамках соглашения №075-11-2020-042 от 14.12.2020 г. по постановлению Правительства РФ №218 от 09.04.10.

**3. НИОКТР «Разработка и внедрение комплексных технологий производства бесшовных труб из сталей нового поколения с управляемой коррозионной стойкостью при осложненных условиях эксплуатации для топливно-энергетического комплекса Российской Федерации» в рамках соглашения №075-11-2023-011 от 10.02.2023 г. по постановлению Правительства РФ №218 от 09.04.10.**

### **Цели и задачи работы**

Основной целью работы является разработка способов управления микроструктурой путем использования принципов микролегирования и термомеханической обработки в условиях реальных промышленных предприятий для обеспечения специальных свойств металлопродукции из низкоуглеродистых сталей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– установление закономерностей и факторов влияния микролегирования на структурообразование, физико-механические и специальные свойства низкоуглеродистых сталей;

– определение способов достижения рациональной микроструктуры и требуемого уровня специальных свойств низкоуглеродистых сталей путем их микролегирования и термомеханической обработки;

– определение оптимальных систем микролегирования и режимов изготовления металлопродукции из новых марок сталей со специальными свойствами различного назначения, включая выбор режима термомеханической обработки (ТМО), комплексные исследования структурно-фазовых характеристик продукции и её эксплуатационных свойств, для производства на НШПС 2000 высокопрочного рулонного проката повышенной коррозионной стойкости для труб и повышенной огнестойкости для строительных металлоконструкций.

Для решения поставленных задач было необходимо:

**1.** Актуализировать информацию по действующим нормативным материалам в части эксплуатационных характеристик металлопродукции рассматриваемого сортамента. Изучить нормативно-техническую документацию и определить уровень эксплуатационных требований, в том числе, требований нефтедобывающих компаний;

**2.** Определить способы повышения прочностных и пластических характеристик, а также огнестойкости металлопродукции низкоуглеродистых сталей рассматриваемого сортамента, учитывающие влияние легирующих элементов, размер аустенитного и ферритного зерна, характер структурно-фазовых превращений;

3. Провести анализ производственных факторов, оказывающих влияние на достижение специальных свойств проката и трубной заготовки, а также устойчивость к разрушению при отрицательных и повышенных температурах (огневом воздействии);

4. Разработать инновационные композиции химических составов низкоуглеродистых сталей, провести анализ зависимости характера структурообразования плоского проката нефтегазового и строительного назначения от технологических факторов производства на непрерывном широкополосном стане 2000 (НШПС 2000);

5. Определить требуемое структурно-фазовое состояние проката из низкоуглеродистой стали рассматриваемого сортамента, которое обеспечивает повышение прочностных характеристик и специальных свойств готовой продукции;

6. Провести для разработанных систем микролегирования низкоуглеродистых сталей построение термокинетических диаграмм (ТКД) для определения рациональных температурно-скоростных режимов охлаждения полосы на НШПС 2000 и заготовок на термическом участке изготовления бесшовных труб;

7. Разработать технологические рекомендации по производству проката и бесшовной трубы с повышенной коррозионной стойкостью, провести их опробование в производственных условиях;

8. Провести комплексную оценку механических и эксплуатационных свойств, коррозионной стойкости и огнестойкости промышленных образцов низкоуглеродистого проката и бесшовной трубы.

9. Оценить эффективность разработанных технических решений на основе промысловых/натурных испытаний образцов металлопродукции в реальных условиях эксплуатации (байпасные испытания на действующих нефтепроводах, огневые испытания элементов строительных металлоконструкций).

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке принципов легирования низкоуглеродистых сталей на основе установленных закономерностей влияния микролегирования на формирование структуры, механические и специальные свойства (огнестойкость и коррозионная стойкость) для обеспечения металлургического качества плоского проката и труб, в том числе:

1. Впервые для огнестойких сталей разработана и научно обоснована безмолибденовая система легирования Cr-V-Nb-Ti с содержанием Cr 0,5÷0,8 %, обеспечивающая формирование исходной мелкозернистой ферритно-бейнитной структуры с долей бейнита 50% и выделение наноразмерных частиц NbC, VC, TiC в условиях пожара, что обеспечивает класс прочности С390П повышенной огнестойкости.

2. Впервые показано, что система легирования, основанная на пониженном содержании С, легировании Cr и микролегировании Cu, Ni и Nb позволяет достичь в сталях для нефтегазопроводных прямошовных труб класса прочности K52÷K56 повышенной коррозионной стойкости при эксплуатации в высоко агрессивных многокомпонентных средах, содержащих CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S, за счет формирования поверхностного слоя из продуктов коррозии, замедляющего процессы локальной язвенной коррозии.

3. Для обеспечения повышенной коррозионной стойкости низкоуглеродистых сталей для бесшовных труб представленных в работе композиций химического состава необходимо проводить высокотемпературную аустенизацию, обеспечивающую образование карбидов и карбонитридов Nb и Ti, что приводит к измельчению аустенитного зерна и сохранению высокой концентрации хрома в твердом растворе, с последующим высокотемпературным отпуском, позволяющим достигнуть требуемые механические свойства для классов прочности K52÷56.

### **Практическая значимость**

1. Разработаны новые марки стали и подход к обеспечению комплекса свойств производства низкоуглеродистого проката, которые использованы при освоении сквозной металлургической технологии изготовления новой марки трубной стали 07XHD (CORDIS) на Череповецком металлургическом заводе (ПАО «Северсталь»). Данный прокат обладает повышенной коррозионной стойкостью для работы с высокоагрессивными средами нефтедобывающих компаний, содержащих H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub>, и используется для изготовления промысловых трубопроводов. Для получения разрешения использования сварных трубопроводов из данной марки стали были проведены опытно-промышленные испытания на действующих нефтепроводах ПАО «Газпром нефть» (Урманское месторождение ООО «Газпромнефть Восток»), ПАО «Лукойл» (Кокуйское месторождение ООО «Лукойл-Пермь»), ООО «Иркутская нефтяная компания» (Большетирское месторождение), положительный результат которых позволил внести марку 07XHD в перечень разрешенных для эксплуатации материалов. Объем производства низкоуглеродистого проката новой трубной марки стали за период 2018÷2023 гг. составил более 15 тыс. тонн.

2. Разработаны новые марки стали для бесшовных труб коррозионностойкого исполнения и огнестойких сталей. В результате исследований в промышленную реализацию были рекомендованы трубная марка стали П-1 и огнестойкая марка С390П. Огнестойкая сталь успешно прошла стандартные огневые испытания. Балки из огнестойкой стали прошли огневые испытания по ГОСТ 30247.1-94 во Всероссийском

научно-исследовательском институте противопожарной обороны Министерства чрезвычайных ситуаций РФ, которые подтвердили повышение огнестойкости в два раза по сравнению с классами прочности С255 и С345. В настоящее время огнестойкий прокат С390П реализуется ПАО «Северсталь», общий объем производства составил более 400 тонн.

**3.** Предложенные принципы микролегирования могут быть использованы при разработке новых марок сталей со специальными свойствами либо для улучшения свойств существующих марок сталей. Результаты работы могут быть использованы при разработке нормативно-технической документации (ГОСТ, ТУ, Своды правил и прочее), а также для обоснования проектных решений.

**Достоверность результатов:** результаты диссертационной работы были получены с использованием современных методов исследований, испытаний и техники эксперимента, с большим объемом структурных исследований и механических испытаний, с необходимым для получения достоверных данных количеством измерений и применением специального программного обеспечения для обработки результатов. Результаты подтверждены промышленной апробацией предлагаемых в диссертационной работе новых марок сталей и технических решений.

**Личный вклад автора:** Личный вклад автора диссертационной работы состоит в формулировке концепции работы, анализе состояния вопроса по теме диссертации и постановке задач, составлении плана проведения лабораторных исследований и испытаний, в получении, обработке, анализе и обобщении результатов, участии в практической реализации результатов в условиях металлургического производства, а также в формулировании выводов на всех этапах выполнения работы, подготовке публикаций и патентов по результатам работы.

**Апробация работы:** основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов» (г. Москва, 2024); LXVII международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (г. Екатеринбург, 2024); LXVII международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности» (г. Витебск, Беларусь, 2024); Научно-техническая конференция «Коррозия в нефтяной и газовой промышленности» (г. Самара, 2016/2018/2021/2024); Международная конференция «Коррозия в нефтегазовой отрасли» (г. Санкт-Петербург, 2019/2021/2023/2024 г.); Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур ПРОСТ» (г. Москва, 2014/2016/2018/2020-2021/2023); Национальный нефтегазовый форум (г. Москва, 2022); XXII Международная конференция

«Трубы» (г. Челябинск, 2016/2021); Ежегодная производственно-техническая конференция «Промысловые трубопроводы» (г. Москва, 2016; г. Пермь, 2018); V Международная конференция «Современные требования и металлургические аспекты повышения коррозионной стойкости и других служебных свойств углеродистых и низколегированных сталей» (г. Москва, 2017); VII Международная научно-техническая конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее GTS-2017» (г. Москва, 2017); 15-ая Международная школа-конференция для молодых ученых и специалистов (г. Москва, 2017).

**На защиту выносятся основные положения и результаты:**

1. Закономерности процессов структурообразования при производстве низкоуглеродистого рулонного проката и трубной заготовки рассматриваемого сортамента инновационного химического состава, обеспечивающего достижение специальных свойств металлопродукции;

2. Принципы микролегирования низкоуглеродистых сталей для достижения специальных свойств металлопродукции различного назначения;

3. Оценка влияния параметров производства рулонного проката и трубной заготовки из низкоуглеродистых сталей, включая состав легирующей композиции и методы ТМО, на структуру, механические и эксплуатационные свойства металлопродукции на основе математического и физического моделирования технологических процессов;

4. Результаты математического моделирования растворения и образования дисперсных частиц на основе микролегирующих элементов V, Nb, Ti, Cr, Mo и других элементов при повышении температуры огневого воздействия;

5. Результаты исследований влияния микролегирования на микроструктуру, механические характеристики и специальные свойства (огнестойкость и коррозионная стойкость) лабораторных и промышленных образцов металлопродукции;

6. Технологические рекомендации производства рулонного проката для труб класса прочности K52 повышенной коррозионной стойкости, рулонного проката С390П повышенной огнестойкости, реализованные на НШПС 2000 ПАО «Северсталь», бесшовной трубы класса прочности K52 повышенной коррозионной стойкости;

7. Результаты опытно-промысловых испытаний эксплуатационной стойкости трубных сталей в реальных условиях отечественных нефтедобывающих предприятий и огневых испытаний двутавровых балок, изготовленных из рулонного проката С390П, в сравнении с балками их рядовых строительных марок сталей класса прочности С255 и С355.

**Публикации:** основные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 научных статьях в изданиях из списка ВАК и входящих в международные базы цитирования, и в более 30 тезисах докладов. В рамках работы получено 7 патентов, в том числе, один международный патент.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов и списка использованной литературы, содержащего 280 источников. Диссертация изложена на 237 страницах машинописного текста, работа включает 82 рисунка, 72 таблицы.

### **Содержание диссертации**

#### **Глава 1 Принципы микролегирования сталей для получения специальных свойств**

Для решения актуальных задач создания новых сталей различного назначения, обладающих требуемым комплексом механических и специальных свойств, обеспечивающих высокую эксплуатационную надежность, на основе известных марок сталей и систем легирования в последние годы широко используется микролегирование элементами (МЛЭ), которые даже в сравнительно небольших концентрациях могут значительно изменить структурно-фазовое состояние сталей и придать им при использовании специальных технологий металлургического производства новый комплекс свойств, обеспечивающих более высокое качество и востребованность металлопродукции для различных областей применения [2], [3]. Микролегирование влияет на размер зерна, состав и морфологию избыточных фаз, а, следовательно, на все, как технологические, так и эксплуатационные свойства. Однако, несмотря на привлекательность этого направления легирования, его реализация в реальном производстве является сложной задачей комплексного подхода к изучению влияния МЛЭ и технологий обработки на структурно-фазовые превращения и свойства сталей. Это требует проведения масштабных металлургических и материаловедческих исследований для решения конкретных задач производства инновационной металлопродукции. Это относится, в частности, к созданию новых трубных сталей магистральных трубопроводов и огнестойких строительных сталей, широко востребованных в промышленном секторе России [4], [5].

Современные методы легирования сталей для сварных труб, адаптированные к различным классам прочности и условиям эксплуатации, предполагают низкое содержание углерода в сочетании с легирующими элементами, такими как Mn, Si, Cr, Ni и Cu, в различных комбинациях, а также с микролегирующими добавками (например, Nb, Ti, V) [6]÷ [8]. Для повышения эксплуатационных характеристик низколегированных

трубных сталей применяются разные варианты термомеханической обработки, такие как прокатка в  $\gamma$ - и  $(\gamma+\alpha)$ -областях с последующим ускоренным охлаждением, чтобы контролировать рост зерен, рекристаллизацию и фазовые превращения. Микролегирующие добавки, преимущественно воздействующие в твердом состоянии, способствуют формированию растворов внедрения или замещения, увеличению дисперсности зерен и неметаллических включений, а также улучшению структуры границ зерен и нейтрализации вредных примесей [9], [10]. Среди таких элементов ванадий и ниобий схожи по влиянию: оба образуют карбиды и нитриды, причем ниобий имеет более высокую карбидообразующую способность. Карбонитриды ниобия растворяются в аустените в больших количествах и при более низких температурах по сравнению с карбидами ванадия. Благодаря ниобию удается формировать мелкозернистую структуру за счет подавления рекристаллизации аустенита перед переходом  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Ванадий, вводимый в количестве от 0,05 до 0,20 %, также усиливает прочностные характеристики стали на 10÷13 % как в горячекатаном, так и в термически обработанном состоянии, замедляя процессы статической рекристаллизации. Микролегирующие элементы оказывают значительное влияние на рост зерна аустенита при нагреве и рекристаллизацию в низко- и экономнолегированных сталях. Введение ниобия в концентрации около 0,02 % эффективно тормозит рост зерна, что позволяет получить мелкозернистую структуру стали. Комплексное использование ниобия и титана обеспечивает еще более мелкое зерно аустенита, так как ниобий замедляет рост зерна через механизм твердорастворного торможения. В этом контексте использование комбинации ниобия с малым количеством титана оказывается высокоэффективным для создания мелкозернистых сталей [11], [12].

Аналогичные подходы к микролегированию применяются и при производстве бесшовных труб. На нынешнем этапе развития промышленного сектора РФ разработка и освоение технологий изготовления бесшовных труб с повышенной коррозионной стойкостью является научно-практической задачей. Научные разработки в направлении развития технологий производства бесшовных труб, проводимые большинством трубных заводов России и мира, связаны, в первую очередь, с поиском оптимальных композиций легирующих и микролегирующих элементов и рациональных технологий производства, включающих термическую обработку, как ключевую технологическую операцию для формирования физико-механических свойств бесшовных труб [13], [14].

Для разработки новых марок сталей необходимо учитывать требования нефтегазовых компаний к химическому составу сталей и к дополнительным эксплуатационным свойствам. Очевидно, что анализ требований позволит определить

возможность создания марок сталей, которые бы как по химическому составу, так и по показателям механических и коррозионных свойств удовлетворяли требованиям основных потребителей бесшовных труб.

При производстве сварных труб из плоского проката в последнее время чаще используются стали с низким содержанием углерода – менее 0,06 %. С другой стороны, при производстве бесшовных труб часто используется содержание углерода от 0,1 до 0,15 % – это позволяет экономить на легирующих элементах и, как результат, получать требуемые эксплуатационные свойства за счет термообработки. Повышение содержания углерода ведет к снижению показателей хладостойкости. К тому же в последнее время нефтяные компании повышают требования к хладостойкости и вполне ожидаемо, что потребуются стали с повышенной ударной вязкостью KCV до -60 °C при сохранении высоких требований к показателям коррозионной стойкости: в этом случае достигать таких показателей в сталях с содержанием углерода 0,1÷0,15 % будет сложнее.

Помимо осуществления глубокой десульфурации сталей, перспективным для получения требуемого комплекса эксплуатационных свойств является микролегирование. Добавление в сталь карбидообразующих элементов (Mo, V, Nb, Ti) позволяет получить повышенные параметры прочностных свойств без уменьшения значений пластичности при одновременной экономии дорогостоящих легирующих элементов. Для трубных изделий, работающих в жестких условиях, выдвигаются требования, в том числе, по чистоте металла по вредным примесям, газам, неметаллическим включениям. В настоящее время, когда цены на микролегирующие элементы нестабильны, необходима разработка сталей с рациональным использованием элементов и определение режимов термической обработки. Соблюдение данных требований приведет к повышению качественных показателей и объемов выпускаемой продукции при одновременном сокращении производственных издержек.

Микролегирование используется при разработке новых марок сталей не только в трубопроводном транспорте, но и в строительстве, особенно при создании специальных огнестойких сталей. Стальной металлопрокат играет ключевую роль в современной строительной архитектуре, предоставляя необходимую основу для возведения как гражданских, так и промышленных сооружений. Металлопрокат обладает уникальными свойствами, которые полностью соответствуют всем требованиям для строительства различных видов зданий. Благодаря высокой несущей способности металлические конструкции широко используются в качестве структурных элементов для сооружений с большими пролетами, таких как ангары, эллинги, гаражи, рынки, стадионы и другие подобные объекты. Следовательно, еще на этапе проектирования строительных

металлоконструкций необходимо учитывать возможности металлургической промышленности по производству стального металлопроката с необходимым комплексом характеристик. Для этого важно иметь подробное представление о разнообразии видов строительного металлопроката и понимать основные принципы технологии их производства [15].

В современных условиях при обеспечении надежности строительных сооружений приоритетной задачей является достижение высокой огнестойкости металлоконструкции. Для обеспечения необходимого уровня огнестойкости стальных конструкций применяют различные методы термической защиты: огнеупорные покрытия, облицовочные материалы и пассивирующие огнезащитные покрытия, которые сохраняют прочность конструкции при воздействии высоких температур. Однако применение таких защитных материалов значительно увеличивает затраты на строительство [16].

Сталь с высокой огнестойкостью можно успешно применять в строительных конструкциях, не требующих дополнительного огнезащитного покрытия. Эти конструкции находятся в условиях относительно низкого содержания горючих материалов, таких как открытые автостоянки, парковки, атриумы зданий и подобные объекты. В случае пожаров, охватывающих такие строения, масштаб происшествия ограничен, и они, как правило, ограничиваются локальными очагами возгорания. В таких условиях открытые участки стальных конструкций не требуют специальной огнезащиты. Разработка новых марок сталей, способных сохранять прочность при огневом воздействии, является альтернативным методом для повышения надёжности конструкции при экстремальном воздействии вследствие пожара [17].

Анализ литературных источников и опыт российских и зарубежных производителей показал, что на момент начала работы были известны и применялись системы микролегирования в основном для достижения требуемого уровня характеристик прочности и пластичности металла, хладостойкости. Однако, они не обеспечивали достижение необходимого комплекса специальных свойств коррозионной стойкости на сварных и бесшовных трубах, необходимого для надежной работы в реальных осложненных условиях эксплуатации нефтепромыслов, а также необходимой огнестойкости металлопродукции для строительства.

Современные исследования механизмов и факторов, влияющих на водородное и сероводородное растрескивание трубных сталей, показывает, что при производстве стального проката для трубопроводов, предназначенных для транспортировки агрессивных многокомпонентных сред, ключевой задачей является снижение допустимого содержания серы до  $0,001 \div 0,0005$  %. Помимо этого, рекомендуется снижать

концентрации углерода и марганца, а также добавлять в сталь легирующие элементы, такие как медь и никель, до 0,3 % каждого. При транспортировке менее агрессивных сред некоторые производители допускают использование сталей с содержанием серы до 0,005 %, если применяется дополнительное легирование. Уровень марганца в таких сталях в основном зависит от содержания углерода: при минимальном его уровне (менее 0,05 %) даже при концентрации марганца около 1,5 % не возникает выраженной химической неоднородности, и устойчивость к сероводородному растрескиванию сохраняется на высоком уровне [18]÷[20].

Устойчивые к сероводородному растрескиванию стали должны иметь равномерную химически однородную микроструктуру с отсутствием полосчатости. Растрескивание по осевой плоскости проката может быть в значительной мере предотвращено в случае применения ускоренного охлаждения (УО) после контролируемой прокатки (КП), так как получаемая дисперсная бейнитная структура имеет лучшие характеристики, чем полосчатая феррито-перлитная структура. Однако имеются ограничения для баланса между высокой прочностью и сопротивлением сероводородному растрескиванию, так как чувствительность к трещинам в кислой среде возрастает одновременно с повышением прочности.

При разработке сталей для нефтегазопроводных труб (сварные промышленные и бесшовные насосно-компрессорные) с повышенным уровнем эксплуатационных свойств необходимо использовать следующие возможные системы легирования и микролегирования, направленные на повышение коррозионной стойкости и хладостойкости проката [21]÷[23].

Fe-C-Cr-V-Nb. Пониженное содержание углерода, повышенное содержание хрома порядка 0,5 %, присутствие ниобия и ванадия: хром формирует защитный оксидный слой, а снижение содержания углерода уменьшает осевую сегрегацию и позволяет хрому сохраняться в твердом растворе. Введение ниобия способствует измельчению зерна и улучшению хладостойкости стали, в то время как ванадий отвечает за повышение прочности.

Fe-C-Cr-Cu-Ni-Nb-Ti. Применение стали с пониженным содержанием углерода, содержанием хрома в диапазоне 0,3÷0,4 %, увеличенным уровнем меди (около 0,3 %) и добавками ниобия и титана имеет свои преимущества: медь формирует защитный слой и усиливает действие хрома, а ниобий и титан способствуют уменьшению размера зерна и повышению хладостойкости.

Fe-C-Cr-Cu-Mo. Пониженное содержание углерода, хром в диапазоне 0,3÷0,4 %, повышенное содержание меди порядка 0,3 %, присутствие молибдена: молибден эффективен в присутствии Cu и Cr.

Разработка трубных марок сталей с высокой коррозионной стойкостью должна включать определение химического состава, целевого структурного состояния стали, а также определение оптимальных параметров сквозной технологии производства, обеспечивающих чистоту стали по неметаллическим включениям, в том числе, коррозионно-активным, и благоприятное структурное состояние [6], [24].

Для сварных труб промысловых трубопроводов с характерным коррозионно-эрозионным износом при эксплуатации рекомендована система микролегирования хромом и медью (Fe-C-Cr-Cu-Nb-Ti). Формирование защитного слоя на поверхности труб за счет микролегирования должно снизить вероятность проявления коррозионных поражений на внутренней поверхности трубы. Для бесшовных труб эрозионный износ менее характерен, поэтому в качестве основной системы микролегирования была выбрана Fe-C-Cr-V-Nb. Содержание ванадия в сталях рекомендуется минимизировать из-за формирования оксида ванадия в сварном шве, что приводит к значительному охрупчиванию сварного соединения.

Для огнестойкого стального проката присутствие в твердом растворе Mo и Nb способствует замедлению движения дислокаций, а также миграции границ зерен [1]. Таким образом, расширение низкотемпературной области (области, в которой зависимость изменения предела текучести от изменения температуры сравнительно невелика) огнестойкой стали в область более высоких температур является результатом действия этих растворенных элементов, замедляющих явление возврата. Однако, температурная зависимость предела текучести огнестойкой стали уменьшается при низких температурах, что указывает на то, что существует еще один источник сопротивления деформации в дополнение к границам зерен и дислокационным сеткам. Таким источником может являться наличие поля напряжений, возникающего в результате выделения дисперсных когерентных/полукogerентных частиц [25].

Механизм обеспечения высокотемпературной прочности стали с добавлением ниобия заключается в замедлении процессов возврата в твердом растворе атомов Ni, что позволяет сохранить высокую плотность дислокаций. Кроме этого, выделение сложных карбонитридов ниобия значительно увеличивает сопротивление движению дислокаций при температурах до 550 °С.

Существенное влияние на высокотемпературную прочность оказывает исходная микроструктура. При одном и том же уровне содержания Mo микроструктура, состоящая

из бейнита (Б) или из бейнита и мелких зерен феррита (Ф), показывает наиболее высокую устойчивость к нагреву [26]. Структуры стали с ферритом и небольшой долей бейнита, а также феррита и перлита (П) обладают меньшей устойчивостью при нагреве. Бейнитная структура является наиболее эффективной в повышении высокотемпературной прочности. Структура бейнита с высокой плотностью дислокаций эффективно повышает и стабилизирует высокотемпературную прочность при 600 °С, что является результатом замедления возврата растворенными атомами Мо и Nb.

Кроме того, необходимо, чтобы в структуре матрица состояла из определенной фракции феррита для достижения низкого коэффициента текучести, необходимого для сталей строительного назначения. Для того, чтобы надежно обеспечить соотношение пределов текучести при повышенной температуре к комнатной не менее 2/3 при 600 °С в такой структуре, необходимо обеспечить долю выделений карбидов типа МС примерно  $4,5 \times 10^{-3}$  или выше.

Таким образом, основными принципами создания огнестойкой стали являются:

- создание устойчивой к нагреву дислокационной структуры;
- создание устойчивого к распаду твердого раствора;
- создание устойчивых к нагреву дисперсных фаз;
- обеспечение выделения дисперсных фаз при нагреве в заданном интервале температур.

При разработке сталей для проката строительного назначения с повышенным уровнем огнестойкости необходимо использовать следующие возможные системы легирования и микролегирования: Fe-C-Cr-V-Nb-Ti – пониженное содержание углерода 0,05 %, повышенное содержание хрома порядка 0,6 %, присутствие ниобия и ванадия: находясь в твердом растворе хром способствует повышению твердорастворного упрочнения. Снижение содержания углерода уменьшает химическую неоднородность, позволяет хрому оставаться в твердом растворе. Ниобий и ванадий – это элементы с высокой карбидообразующей способностью, которые способствуют образованию карбидов. Карбиды ниобия способствуют измельчению зерна, что повышает хладостойкость стали, а карбиды ванадия обеспечивают прочность и способствуют вторичному упрочнению при температурах выше 600 °С.

Для подтверждения и реализации сформулированных выше принципов микролегирования и возможных систем химических составов проведены комплексные исследования с последующим лабораторным, опытно-промышленным и промышленным опробованием составов и структурных состояний сталей на примере сварных и бесшовных труб, а также строительного проката.

## Глава 2 Исследования и практическая реализация принципов микролегирования огнестойких сталей

С целью отработки подходов микролегирования при разработке марок сталей огнестойкого проката была проведена выплавка экспериментальных лабораторных образцов в вакуумной индукционной печи ВИП-100, включающей в себя три композиции легирования лабораторных плавков. Химический состав представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав экспериментальных марок сталей

Плавки	Содержание элементов, % (масс.)												
	C	Si	Mn	S	P	Al	Cr	Cu	Ni	Nb	Ti	V	N
1 (Cr+Nb+V)	0,067	0,30	0,69	0,005	0,004	0,008	0,66	<0,005	0,033	0,020	0,019	0,083	0,0029
2 (Cr+↑Nb+V)	0,066	0,29	0,70	0,005	0,004	0,009	0,68	0,006	0,025	0,059	0,020	0,077	0,0029

Полученные слитки были предварительно прокатаны на заготовке сечением 80x80 мм, после чего разделены каждая на 2 части длиной 120÷150 мм.

Прокатывали по 4 заготовки от каждой плавки. Температура нагрева заготовок перед прокаткой составляла 1200 °С, выдержка – не менее 1 часа после разогрева.

Для каждой плавки опробовали 3 режима производства:

1. Контролируемая прокатка с последующим охлаждением на воздухе (режим КП);
2. Контролируемая прокатка с последующим ускоренным охлаждением до 500 °С (режим КП+УО(500));
3. Контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением до 500 °С и отпуском при 500 °С непосредственно после УО с последующим охлаждением с печью для имитации охлаждения рулонного проката после смотки (режим КП+УО(500)+О(500));

Для режима КП+УО до 500 °С полосы после прокатки помещали в печь, нагретую до 500 °С для выравнивания температуры после УО на 5÷10 мин.

В рамках исследований проводился широкий комплекс испытаний на растяжение при комнатной и повышенных температурах с использованием универсальной разрывной машины Zwick Z250. Испытательные образцы были цилиндрической формы типа В в соответствии с ГОСТ 9651-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах». Испытания при высоких температурах проводились с нагревом ≤ 10 °С/мин и выдержкой не менее 15 минут. Для оценки уровня огнестойкости определяли коэффициент огнестойкости YS как отношение предела текучести образца

при температуре 600 °С к пределу текучести при комнатной температуре:  $YS = \sigma_T^{600^\circ\text{C}} / \sigma_T^{20^\circ\text{C}}$ .

По результатам исследований были даны рекомендации по выплавке промышленных образцов. Результаты изменения предела текучести экспериментальных образцов представлены на рисунке 1.

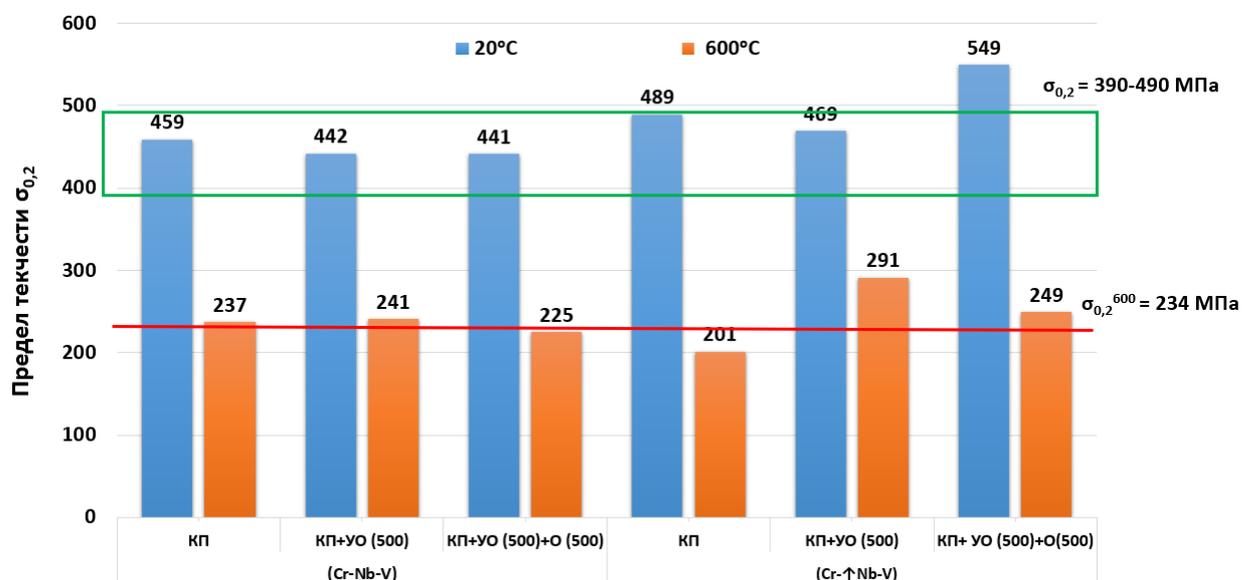


Рисунок 1 – Изменение предела текучести от температуры испытания и режимов ТМО плавки

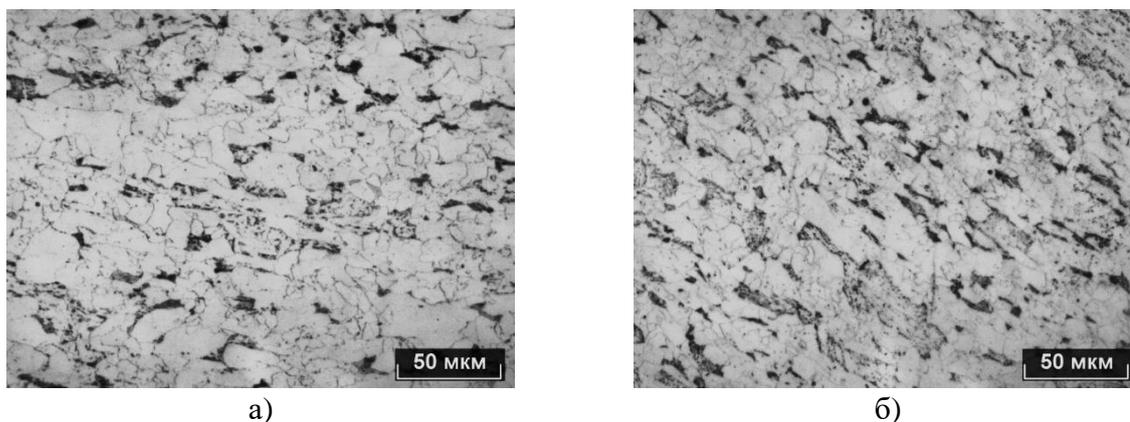
Для стали плавки 1 (Cr+Nb+V) удовлетворительную огнестойкость, оцениваемую по уровню предела текучести при температуре испытания 600 °С (более 234 МПа), продемонстрировали образцы 1-1 и 2-2, произведенные по режимам КП и КП+УО (500), однако уровень временного сопротивления этих полос ниже требований к классу прочности С390.

Из полученных результатов видно, что для стали плавки 2 (Cr+↑Nb+V) наилучшие результаты достигнуты при применении режима производства КП+УО(500). Также положительные результаты по огнестойкости при 600 °С получены после применения режима КП+УО(500)+О(500) (образец 2-3), однако, предел текучести при комнатной температуре также повысился и составил 549 МПа.

Ударная вязкость всех исследованных образцов соответствует требованиям к стали С390.

Для достижения комплекса свойств, соответствующих классу прочности С390П и обеспечивающих высокую огнестойкость, сталь плавки 2 – по режимам КП+УО и КП+УО с последующим охлаждением до 500 °С в условиях смотки. Такой результат достигается

благодаря формированию феррито-бейнитной структуры, основным элементом которой является низкоуглеродистый бейнит (рисунок 2).



а) – КР+УО(500); б) – КР+УО(500)+О(500)  
Рисунок 2 – Микроструктура лабораторной плавки 2

Для остальных исследованных образцов наблюдалась структура, матрица которой состоит из феррита полиэдрической или квазиполигональной морфологии. Сопоставление результатов исследования микроструктуры и механических испытаний показывает, что для всех исследованных плавок, формирование структуры, в которой преобладает феррит, приводит к получению низких значений предела текучести при высокотемпературных испытаниях (600 °С).

Наиболее приемлемой технологией для получения целевой феррито-бейнитной микроструктуры стали С390П при изготовлении строительной стали является контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением (КР+УО) из  $\gamma+\alpha$  – области до температур 500÷550 °С. Для получения проката огнестойкой стали С390П на непрерывных широкополосных станах необходимо использовать КР+УО, при этом, чтобы избежать критического снижения плотности дислокаций в феррите из-за длительного нахождения при высоких температурах, желательно использовать температуру смотки около 500 °С.

Обеспечение требования к огнестойкости  $\sigma_{\text{т}}^{600}/\sigma_{\text{т}}^{20} \geq 2/3$  достигается для опытных образцов С390П плавки 2 (Cr-V-Nb), режим КР+УО(500), КР+УО(500)+О(500).

Для производства рулонного проката из огнестойкой стали марки С390П в кислородно-конверторном цехе ПАО «Северсталь» была произведена специальная плавка С390П с химическим составом непрерывнолитой заготовки, приведенным в таблице 2. Было выплавлено 6 непрерывнолитых заготовок стали С390П общим весом 110,307 тн. Химический состав полученной плавки соответствует заданию на выплавку.

Таблица 2 –Химический состав С390П, полученной в рамках проведения промышленных испытаний, масс. %

Плавки	Содержание элементов, % (масс.)												
	C	Si	Mn	S	P	Al	Cr	Cu	Ni	Nb	Ti	V	N
Система легирования	0,05 - 0,08	0,20 - 0,25	0,80 - 0,90	≤0,005	≤0,005	0,02 - 0,03	0,55 - 0,65	≤0,2	≤0,10	0,025 - 0,035	0,01 - 0,02	0,08 - 0,12	≤0,005

От произведенного рулона провели отбор проб внешнего витка с целью изготовления разрывных образцов для испытаний на растяжение при комнатной температуре и при температуре 600 °С (огнестойкость), а также образцов KCV и KCU для проведения испытаний низкотемпературной вязкости. Результаты испытаний представлены в таблице 3, микроструктура на рисунке 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний на растяжение образцов от рулона С390П толщиной 10 и 12 мм при комнатной температуре и при 600 °С

Место отбора	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_T^{600}$ , МПа	$\sigma_B^{600}$ , МПа	$\sigma_T^{600}/\sigma_T$
С390П-10	451	585	21,7	301	354	0,67
С390П-12	479	590	22,4	320	360	0,67
Технические требования к прокату С390П	390÷550	520÷680	≥20	≥234	–	≥0,6

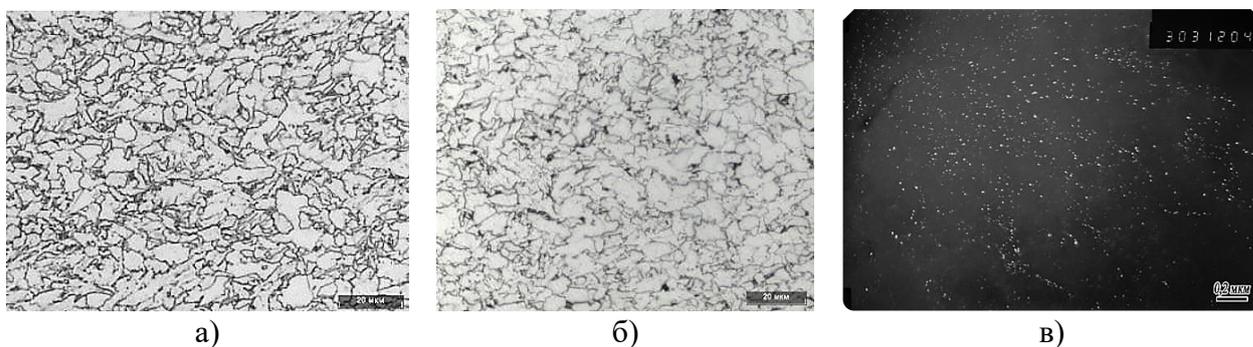


Рисунок 3 – Микроструктура промышленных образцов рулонного проката С390П толщиной 10 мм (а) и 12 мм (б), карбидные включения Ti, Nb и V (в)

Из представленных данных видно, что прочностные и пластические свойства полосы С390П-10,12, определяемые при испытаниях на растяжение при комнатной температуре образцов, полностью соответствуют нормативным значениям для рулонного проката С390П. При проведении испытаний на растяжение при температуре 600 °С также получен требуемый уровень прочностных характеристик, обеспечивающий выполнение нормативных требований по огнестойкости, т.е. величину соотношения  $\sigma_T^{600}/\sigma_T \geq 0,6$ .

Результаты огневых испытаний изготовленных металлоконструкций в испытательном центре Федеральное государственное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны» использованы для

оценки огнестойкости высокопрочного металлопроката С390П, промышленного производства. Согласно стандарту ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость», при проведении испытаний на огнестойкость для изгибаемых конструкций предельное состояние считается достигнутым, если прогиб в середине балки под воздействием нагрузки и нагрева достигает величины, равной  $L/20$ , где  $L$  – это пролет балки, см.

За предел огнестойкости для рассматриваемых балок принималось время от начала нагрева до получения предельного прогиба 150 мм, соответствующего потере этой балкой несущей способности. Это позволяет дать объективную оценку сравнительной эффективности разрабатываемых видов проката при решении целевых задач работы – изготовлении огнестойких металлоконструкций строительного назначения.

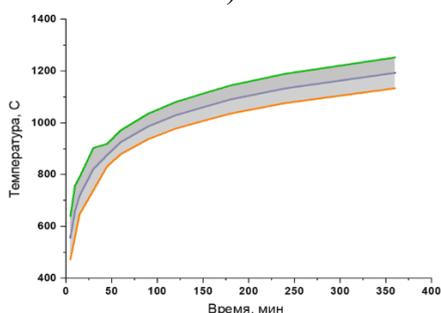
Во время экспериментов для каждой балки с заданными интервалами времени, от 1 мин в начале испытания до 30 с на завершающем этапе, фиксировались время от начала огневого воздействия, температура в огневой камере и по сечению балки, а также проводилось наблюдение за изменениями в поведении конструкции. Полученные графики для балок из проката С390П приведены на рисунке 4. Это позволило оценить динамику деформации балок, изготовленных из различных видов проката, по мере их нагрева вплоть до наступления предельного состояния и представить результаты измерений в графическом виде.



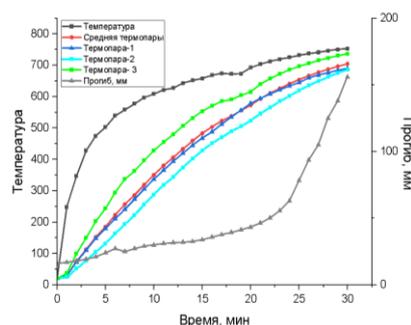
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Внешний вид двутавровых балок до (а) и после испытаний (б), графики изменения температуры в огневой камере печи (в) и величины соответствующего прогиба для опытного образца сварной балки, изготовленного из проката С390П (г)

В результате проведения испытаний на огнестойкость по ГОСТ 30247.1-94 экспериментальных стальных двутавровых балок, изготовленных из металлопроката С390П (стан 2800 и стан 2000 ПАО «Северсталь»), при условии приложения к ним сосредоточенной в середине пролета постоянной статистической нагрузки 64,66 кН для балок С390П установлено, что пределы огнестойкости данных балок были достигнуты на 24 мин испытания для С390П (стан 2800), а также – на 31 мин испытания для С390П (стан 2000) вследствие потери ими несущей способности (R) с последующим обрушением. При этом скорость нарастания деформации составляла в среднем 0,55 см/мин. Предельный прогиб при испытании всех указанных балок составлял около 150 мм. Иначе говоря, потеря несущей способности балок С390П зафиксирована через 24 и 31 минут, соответственно, после начала огневого воздействия на них, при температуре 753 °С и 754 °С. При этом устанавливали нагрузку на балках, составляющую 75 % от нормативного предела текучести этих видов проката при комнатной температуре. Разница по времени достижения пределов огнестойкости балок С390П (стан 2800) и С390П (стан 2000) объясняется различием в режиме нагрева: балку С390П (стан 2800) грели по «жесткому режиму» – верхняя граница допуска нагрева, балку С390П (стан 2000) – по «мягкому» режиму – нижняя граница допуска нагрева. На момент достижения опытными образцами предельного состояния по потере несущей способности конструкции (R), средняя температура по термопарам, установленным на их обогреваемых поверхностях (термопары № 1÷3), составляла 704 °С и 693 °С для С390П, стан 2800 и стан 2000 соответственно. Фактические результаты огневых испытаний балок, изготовленных из рядового строительного проката С255 (сталь СтЗсп) и С355 (сталь 09Г2С) следующие: пределы огнестойкости С255 – 14 мин, С355 – 17 мин, а средняя температура прогрева балок по термопарам 485 °С и 540 °С, соответственно.

Исчерпание несущей способности для использования высокопрочного огнестойкого проката С390П при действующих нормативных нагрузках происходит на 10÷15 мин позднее и при температуре на 150÷200 °С выше, чем для рядового строительного проката, что значительно увеличивает предел огнестойкости конструкции.

Таким образом, результаты испытаний параметров огнестойкости сварных двутавровых балок, изготовленных из опытных образцов проката строительного назначения, на экспериментальной установке ФГБУ ВНИИПО МЧС России подтверждают более высокую устойчивость к огневому воздействию строительных металлоконструкций из проката С390П по сравнению с рядовым строительным прокатом С255 и С355, что определяет возможность его использования для изготовления строительных металлоконструкций ответственного назначения.

### Глава 3 Исследования и практическая реализация принципов микролегирования трубных сталей для изготовления прямошовных труб

Принципы микролегирования сталей для достижения необходимых свойств сварных труб с высокой коррозионной стойкостью, хладостойкостью и прочностью для промысловых нефтегазопроводов разработаны на основе комплексных исследований образцов лабораторных и промышленных образцов металлопродукции.

В настоящее время в производстве трубной стали класса прочности K52, в том числе, стали с повышенной устойчивостью к коррозии и низкотемпературной стойкостью, применяются легирующие составы, которые допускают варьирование содержания углерода от 0,05 до 0,22 % и марганца в пределах 0,4÷1,65 %. С ростом прочностной категории содержание марганца постепенно увеличивается. Для повышения антикоррозионных и низкотемпературных свойств стали дополнительно вводят легирующие элементы: хром в пределах 0,15÷1,0 % (стали 20-КСХ с низким содержанием углерода и 13ХФА), а также никель и медь до 0,3 % (20-КСХ с низким углеродом). Дополнительно во всех этих сталях используется микролегирование ниобием, а в некоторых случаях и ванадием (например, в 13ХФА) или ванадием и титаном (в сталях К56).

Выбор состава стали с пониженным углеродным содержанием и минимальными добавками легирующих элементов позволяет достичь высоких показателей прочности, устойчивости к низким температурам и коррозии в рулонном прокате для сварных труб.

Для увеличения прочности рулонной полосы при уровне углерода не более 0,08 % применяют дисперсионное упрочнение, которое достигается образованием мелкодисперсных карбонитридных частиц (Nb, V) (C, N) в процессе охлаждения после намотки рулона, либо создают феррито-бейнитную структуру стали путем введения элементов, стабилизирующих аустенит (таких как Mo, Ni, Cr, Cu, Nb) в твердом растворе. Для повышения стойкости к сероводородному растрескиванию уменьшают содержание углерода и марганца, что препятствует образованию нежелательных неметаллических включений, представляющих собой активные ловушки коррозии (MnS, Fe<sub>3</sub>C, фосфорные включения), и формируют равномерную, мелкозернистую микроструктуру со слабовыраженной текстурой и пониженным уровнем остаточных напряжений. Достигается это благодаря применению технологий контролируемой прокатки с последующим ускоренным или ламинарным охлаждением (КП+УО).

Для производства рулонного проката требуемой толщины до 12 мм используют низкоуглеродистую сталь (C = 0,04÷0,09 %) с добавлением марганца (0,9÷1,2 %) и микролегирующими компонентами – ниобием (0,02÷0,06 %) и ванадием (до 0,03 %). По

показателям механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_T/\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ) такая рулонная сталь, имеющая низкое содержание углерода (0,04÷0,09%), полностью соответствует, а по хладостойкости даже превосходит стали с более высоким содержанием углерода (0,08÷0,15 %), такие как 09ГСФ и 13ХФА, применяемые для труб класса прочности К56. Эти результаты подтверждают целесообразность разработки трубных сталей с пониженным содержанием углерода.

Таким образом, ключевым направлением при создании хладостойкого и устойчивого к коррозии рулонного проката класса прочности К52 для газонефтепроводов является внедрение технологий промышленного производства сталей с пониженным содержанием углерода (0,04÷0,09%) и марганца, а также микролегирование медью, никелем и ниобием.

Для адаптации технологического процесса на стане 2000 по выпуску рулонного проката К52 требуется оптимизация состава легирующих и микролегирующих элементов с учетом технологических возможностей оборудования и структуры стали. Также важно определить оптимальные параметры сквозной технологии для выпуска этого проката на стане 2000, включая использование технологии контролируемой прокатки и последующего ускоренного или ламинарного охлаждения (КП+УО).

При выплавке экспериментальных легирующих составов регулировалось содержание основных элементов, таких как углерод, хром, никель и медь, которые, согласно предыдущим исследованиям, влияют на стойкость стали к коррозии. Концентрации кремния, марганца, алюминия и микролегирующих добавок оставались постоянными (таблица 4). Основное внимание уделялось снижению содержания углерода и марганца, увеличению доли хрома и меди – элементов, ответственных за устойчивость к коррозии и необходимые прочностные характеристики. Химический состав экспериментальных образцов представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Химический состав полученных экспериментальных плавок

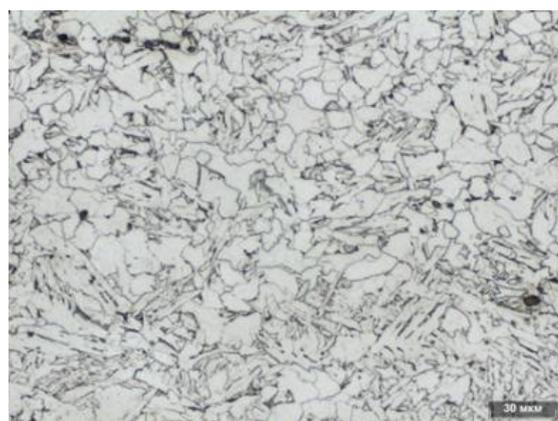
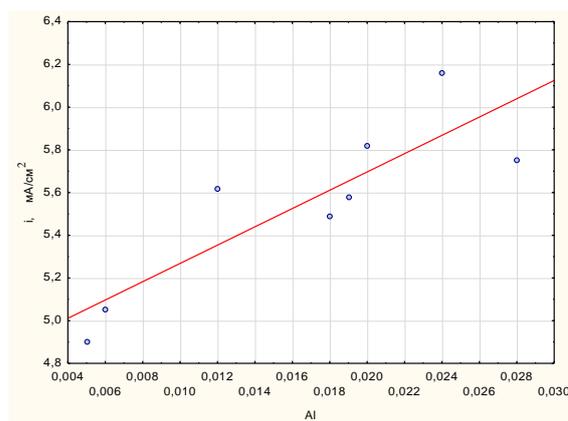
№ Плавки	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	V	Nb
Э-1	0,115	0,037	0,53	0,002	0,004	0,76	0,50	0,50	0,005	0,019	0,070	0,031
Э-2	0,059	0,21	0,60	0,002	0,004	0,80	0,50	0,11	0,006	0,016	0,072	0,056
Э-3	0,099	0,26	0,60	0,002	0,004	0,41	0,49	0,12	0,028	0,043	0,068	0,048
Э-4	0,059	0,27	0,57	0,002	0,004	0,40	0,50	0,48	0,024	0,032	0,074	0,056
Э-5	0,079	0,19	0,92	0,002	0,004	0,84	0,18	0,11	0,020	0,016	0,065	0,048
Э-6	0,035	0,25	0,59	0,002	0,004	0,79	0,097	0,51	0,018	0,017	0,068	0,049
Э-7	0,078	0,23	0,57	0,002	0,004	0,40	0,096	0,51	0,019	0,017	0,069	0,050
Э-8	0,038	0,28	0,58	0,002	0,004	0,42	0,097	0,12	0,012	0,015	0,070	0,051

В таблице 5 указаны показатели электрохимических коррозионных испытаний экспериментальных плавок.

Таблица 5 – Результаты электрохимических коррозионных испытаний экспериментальных плавок

№ образца	Методика 1	Методика 2
	Локальная коррозия i при обратном ходе при E св.кор, (А/м²)	Общая коррозия i насыщения, (мА/см²)
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

На рисунке 5 приведена зависимость влияния содержания алюминия на тока насыщения.



а)

б)

Рисунок 5 – Влияние содержания алюминия на плотность тока насыщения для сталей класса К52 (скорость общей коррозии) (а), микроструктура Э-1 после КП+УО (б)

Полученные результаты показывают, что образец Э-1 демонстрирует наиболее высокую коррозионную стойкость при испытаниях по обеим методикам. В данном образце содержание алюминия находится на минимальном уровне. Образец Э-2 показывает практически такую же стойкость против общей коррозии (методика 2), но уступает образцу Э-6 по стойкости против локальной коррозии, который по стойкости против общей коррозии находится на 3-ем месте после образцов Э-1 и Э-2. Для наиболее перспективных легирующих композиций, отличающихся высокой коррозионной стойкостью (экспериментальные образцы 1, 2 и 6), были проведены испытания механических свойств, результаты которых представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты механических испытаний экспериментальных сталей

Номер плавки - образца	Предел текучести $\sigma_s$ , МПа	Средн. $\sigma_s$ , МПа	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Средн. $\sigma_b$ , МПа	Относит. удлинение $\delta_5$ , %	Средн. $\delta_5$ , %
Э-1	513	512	641	642	22,9	23,7
	512		643		24,4	
Э-2	493	493	597	597	23,7	23,4
	493		597		23,2	
Э-6	458	458	552	552	25,1	26,2
	458		551		27,4	

Проведенные исследования показывают, что стали с лучшими антикоррозионными характеристиками по механическим свойствам соответствуют прочностным классам К60 (сталь 1), К52÷К56 (стали 2 и 6). Увеличение прочностных характеристик связано с более высоким содержанием углерода, влияющим на предел текучести и прочность на разрыв. Анализ микроструктуры выявил, что стали с высокой коррозионной стойкостью (плавки 1, 2 и 6) имеют феррито-перлитную структуру, при этом содержание перлита снижается с уменьшением углерода. Во всех образцах зернистость сохранялась в среднем около 10 мкм, без признаков феррито-перлитной полосчатости.

Для плавки 1 наноразмерные карбонитридные частицы имеют средний размер 4÷6 нм, а в плавке 6 эти частицы мельче, размером, не превышая 2 нм, причем основная часть имеет размер менее 1 нм, что обусловлено более высоким содержанием ниобия. Предполагается, что такая структура может снизить коррозионную стойкость, в отличие от более крупных частиц плавки 1. Возможно, что уменьшение содержания ниобия до 0,03 % могло бы улучшить антикоррозионные свойства стали плавки 6.

Предложенные технологические методы были применены для производства рулонного проката категории прочности К52 на непрерывном широкополосном стане 2000 ПАО «Северсталь». Анализ механических характеристик рулонного проката подтвердил возможность получения требуемого уровня прочностных характеристик, а удлинение всех рулонов соответствовало минимально допустимым параметрам для данного класса ( $\delta \geq 23$  %). Основные показатели хладостойкости (ударная вязкость KCV<sup>-40</sup> и доля вязкой составляющей излома KCV<sup>-50</sup>) значительно превышают требуемые значения, что подтверждает высокую хладостойкость продукции.

При температуре смотки выше  $T_{см} = 670$  °С прочностные характеристики проката не достигают требуемого уровня в то время, как ламинарное охлаждение до температуры ниже  $T_{см} = 580$  °С приводит к повышению бейнитной фазы, снижая коррозионную стойкость и низкотемпературную вязкость. Результаты опытных испытаний подтвердили правильность выбранных технологических режимов для низколегированных рулонных

полос, которые обеспечивают необходимый уровень прочности и коррозионной стойкости для класса К52.

Проверка антикоррозионных характеристик трубной стали в условиях эксплуатации показала, что важно учитывать физико-химические параметры перекачиваемой водонефтяной смеси, такие как рН, содержание сероводорода, углекислого газа и минерализация воды, для повышения точности оценки стойкости к коррозии.

Анализ промышленных испытаний показал, что образцы стали рулонного проката категории прочности К52 продемонстрировали устойчивость к коррозии на 33,6 % выше по сравнению с образцами из стали Ст20 и на 62,2 % выше по сравнению со сталью 13ХФА. В рамках второго этапа испытаний ООО «Газпромнефть-Восток» изготовило опытные катушки из стали рулонного проката категории прочности К52, которые показали минимальные показатели скорости коррозии – 0,2÷0,3 мм/год. Оценки стоимости стали данного проката предполагают, что она будет на 10 % дешевле по сравнению с аналогами, такими как сталь 13ХФА. На основании данных испытаний рабочей группой ООО «Газпромнефть-Восток» рекомендовано включить сталь рулонного проката категории прочности К52 в перечень низколегированных антикоррозионных сталей ПАО «Газпром нефть» для группы 4.

Полевые испытания проката малоуглеродистой низколегированной стали класса прочности К52 были организованы на нефтесборных участках месторождений в Западной Сибири. Испытания успешно прошли на объектах ПАО «Лукойл», ПАО «Роснефть» и других нефтяных компаний. По итогам испытаний сталь рулонного проката прочности К52 признана конкурентоспособной, что свидетельствует о ее перспективности для промышленного применения.

#### **Глава 4 Исследования и практическая реализация принципов микролегирования трубных марок сталей для изготовления бесшовных труб**

Анализ требований ведущих нефтяных компаний к микроструктуре, содержанию легирующих/микролегирующих элементов позволил рекомендовать систему микролегирования для получения бесшовных нефтегазопроводных труб с повышенной коррозионной стойкостью в сероводородной и углекислотной средах, а также комбинированных многокомпонентных средах. На основании изучения требований ведущих нефтегазовых компаний и межгосударственного стандарта ГОСТ 3183-2016 определен допустимый диапазон концентрации легирующих элементов.

Предложены два варианта химического состава, которые бы удовлетворяли вышеуказанным требованиям (таблица 7).

Таблица 7 – Два варианта химического состава сталей, массовая доля, %

Категория	C	Si	Mn	Cr	P	S	V	Ti	Nb
Хладостойкая	0,18	0,60	1,40	0,50	0,020	0,006	0,10	0,04	0,06
Коррозионностойкая	0,16	0,40	1,40	0,50	0,015	0,005	0,09	0,04	0,06

При этом общее содержание ванадия, титана и ниобия ограничено значением не более 0,16 %. Как показано в таблице 7, для сталей в коррозионностойком исполнении установлены более строгие требования к содержанию вредных примесей, таких как фосфор и сера, хотя основной химический состав остается практически неизменным.

При производстве сталей, стойких к водородному растрескиванию, содержание углерода ограничивают из-за его сильной склонности к ликвации в осевой зоне заготовки, что может приводить к образованию структурных составляющих с высокой твердостью и, соответственно, с высокой напряженностью на внутренней поверхности труб, что при работе в среде с высоким парциальным давлением сероводорода может привести к растрескиванию и к образованию блистерингов [4].

Углерод оказывает наибольшее влияние на прочностные характеристики стали и улучшает прокаливаемость. В настоящее время российские производители бесшовных труб при создании экономнолегированных сталей используют достаточно высокое содержание углерода – до 0,15 % – однако при таком содержании углерода сложнее получить высокие показатели по ударной вязкости при отрицательных температурах и возможно снижение стойкости к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН). В связи с этим оптимальным содержанием углерода можно считать интервал от 0,06 до 0,1 %.

Марганец применяют для повышения прокаливаемости и прочности, а также раскисления стали. Содержание марганца более 1,5 % снижает ударную вязкость и стойкость стали к коррозии в среде CO<sub>2</sub>. Содержание марганца при производстве бесшовных труб часто вынуждены сильно ограничивать (менее 1 %) из-за достаточно высокого содержания углерода. Кроме того, марганец с серой образует пластичные сульфиды марганца, которые при горячей деформации сильно вытягиваются и образуется большая площадь раздела матрицы и сульфида, где в последствии скапливается водород. Возможно дополнительное упрочнение за счет сегрегации марганца по границам зерен – снижается ударная вязкость и, как следствие, стойкость к водородному растрескиванию.

Необходимо, чтобы металл, из которого осуществляется изготовление бесшовной трубной продукции, характеризовался пониженной концентрацией вредных примесей. Современные технологии выплавки позволяют обеспечить низкое содержание фосфора (до 0,012 %) и серы (до 0,005 %) без колоссальных экономических затрат.

В соответствии с литературными рекомендациями медь, никель, хром добавляются по мере необходимости для прочности. Наиболее распространенным и эффективным легирующим элементом, применяемым при изготовлении сталей, стойких к водородному растрескиванию, является хром. Он отличается небольшой стоимостью, также расширяет ферритную область и способствует увеличению прочностных показателей. Кроме того, снижает скорость общей и локальной коррозии при эксплуатации трубопроводов. Медь также может оказывать положительное влияние на коррозионную стойкость. Однако, в требованиях компании ПАО «Газпромнефть» есть ограничение по суммарному содержанию хрома, никеля и меди – сумма не должна превышать 0,90 %.

В качестве легирующего элемента для улучшения стойкости к углекислотной коррозии в трубных марках стали будет использоваться хром. Большое количество хрома (более 1%) удорожает сталь и увеличивает риск нежелательного образования богатых хромом нитридов и карбидов, которые могут снизить ударную вязкость и устойчивость к водородному охрупчиванию. Добавление небольшого количества хрома (0,3÷0,7 %) в состав низкоуглеродистых сталей заметно повышает их коррозионную стойкость. Это связано с тем, что хром обогащает продукты коррозии, образующиеся на поверхности стали, создавая плотный защитный слой. В продуктах коррозии концентрация хрома оказывается существенно выше, чем в основном металле. Присутствие хромсодержащих соединений, обладающих пониженной электропроводностью по сравнению с железистыми карбонатами ( $\text{FeCO}_3$ ), снижает гальванический эффект между металлической поверхностью и коррозионными продуктами. Это уменьшает воздействие агрессивной среды на металл и способствует его «самовосстановлению», формируя защитный барьер от дальнейшей коррозии.

Дополнительное легирование стали карбидообразующими элементами (ванадий, ниобий, титан) позволяет достичь высокого класса прочности и хладостойкости вследствие образования мелкозернистой структуры и выделения упрочняющих частиц (карбиды, карбонитриды и пр.).

Таким образом, после анализа требований нефтегазовых компаний РФ, литературы и патентных источников выявлен химический состав, который удовлетворяет требованиям основных потребителей бесшовных труб высокой хладостойкости и с улучшенной коррозионной стойкостью в сероводородных и углекислотных средах

(таблица 8). Показана возможность создания универсальной марки стали, которая найдет применение во многих нефтегазодобывающих компаниях, где химический состав транспортируемой смеси значительно различается.

Таблица 8 – Химический состав стали, обеспечивающий высокие параметры хладостойкости и коррозионной стойкости, массовая доля, %

Система легирования	C	Si	Mn	P	S	V	Ti	Cr+Nb
	0,07-0,11	0,20-0,25	0,80-0,90	не более 0,010	не более 0,005	не более 0,09	не более 0,01	0,70

Стали заданных составов были выплавлены в условиях сталеплавильного научно-производственного участка Университета МИСИС. Полученные стальные слитки из экспериментальной трубной стали были повергнуты прошивке на двухвалковом прошивном стане винтовой прокатки «МИСИС 130Д» при температуре 1180÷1200 °С. Изготовленные гильзы раскроены на темплеты шириной 50÷60 мм и толщиной 24 мм. Далее темплеты прокатаны на универсальном стане продольной прокатки «ДУО-210» до толщины 11 мм.

После проведения математического моделирования в программном комплексе «QForm 3D» и вышеуказанного физического моделирования на технологическом лабораторном оборудовании была изготовлена бесшовная труба из стали Э-1.

Таблица 9 содержит фактический химический состав изготовленных бесшовных труб.

Таблица 9 – Фактический химический состав полученных образцов бесшовной трубы, массовая доля, %

№ п/п	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Nb	V	Ti	Al	N
Э-1	0,07	0,25	0,92	0,004	0,006	0,09	0,020	0,64	0,031	0,002	0,011	0,014	0,007

В таблице 10 приведены режимы термообработки и механические свойства для стали указанного состава, структура образцов приведена на рисунке 6.

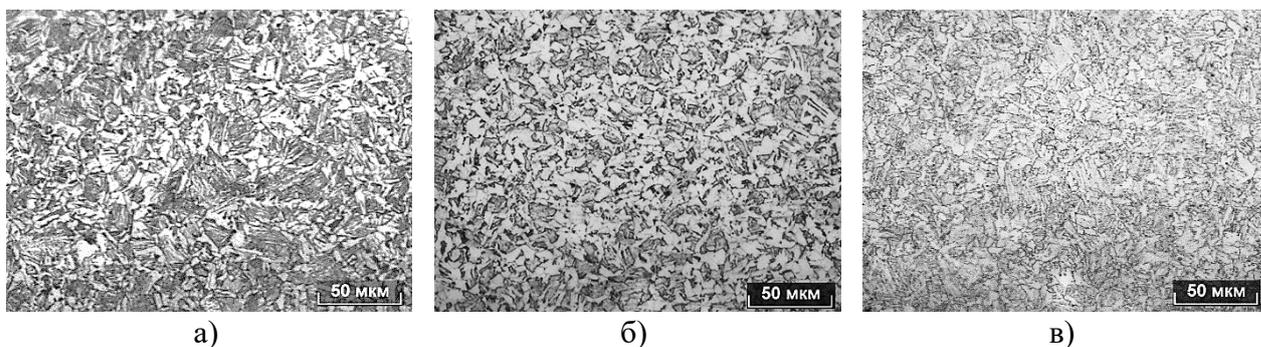


Рисунок 6 – Микроструктура марки стали Э-1 после различных режимов термической обработки, увеличение x500 ОМ: температура отпуска 550 °С (а), 600 °С (б) и 680 °С (в)

Таблица 10 – Механические свойства и режимы термообработки для стали указанного состава

Температура отпуска, °С	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\sigma_T/\sigma_B$	KCV <sup>-60</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
550	476	587	21,4	0,811	373
600	449	554	20,5	0,810	421
680	419	528	22,2	0,794	400
Нормируемые значения в сероводородостойком исполнении для класса прочности					
K56	>410	550÷670	≥20,0	–	≥100
K52	>355	510÷630	≥20,0	–	≥100

Для определения эксплуатационной устойчивости были проведены лабораторные испытания на СКРН (таблица 11), на определение стойкости в сложных многокомпонентных агрессивных средах, содержащих одновременно CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S (таблица 12) и на показатели водородного растрескивания (НИС).

Таблица 11 – Результаты испытаний на СКРН

Образец	Температура отпуска, °С	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Пороговое напряжение, %	Время до разрушения, часы	Наличие/отсутствие дефекта (трещина)
Э-1	550	284	75, 80, 85, 90, 95	720	Отсутствие трещин
	600				

Как видно из полученных результатов, образцы из стали заданного состава характеризуются отсутствием разрушения в течение 720 часов испытаний и трещин на рабочей поверхности, что говорит о высокой стойкости материала в данных условиях.

Таблица 12 – Результаты испытаний на общую коррозию стали Э-1 (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S)

Температура отпуска, °С	Условия испытания	Скорость коррозии, мм/год
550	р-р 5 % NaCl + Pco <sub>2</sub> (0,9 атм.) + Pn <sub>2</sub> s (0,1 атм.), температура +20 °С	0,12
600		0,12

Как видно из таблицы 12, для стали Э-1 после проделанных режимов термической обработки скорость общей коррозии в многокомпонентной среде составила 0,12 мм/год. Данные значения наиболее близки к требованиям, предъявляемым к срокам эксплуатации труб нефтегазовыми компаниями в России, а именно: 0,1 мм/год, при условии испытаний в однокомпонентной среде – CO<sub>2</sub> или H<sub>2</sub>S.

Анализ полированных поверхностей образцов показал, что показатели водородного растрескивания (НИС) – коэффициенты длины трещины (CLR) и толщины трещины (CTR) – равны нулю, что свидетельствует об отсутствии трещин.

После проведения экспериментальных термических обработок и исследований механических и коррозионных характеристик, включая испытания на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением, водородное растрескивание, общая коррозия в многокомпонентной среде (CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>S), было установлено, что образцы из стали П-1 после закалки от 910 °С и проведения отпуска 550÷600 °С характеризуются уровнем механических свойств, соответствующих классу прочности К52÷56, и повышенными параметрами коррозионной стойкости в среде углекислотного и сероводородного воздействия.

Таким образом, использование предложенных принципов микролегирования при разработке новых марок трубных сталей обеспечивает изготовление бесшовных горячекатаных труб с высокой хладостойкостью и повышенной коррозионной стойкостью с увеличенным сроком эксплуатации для транспортировки нефтесодержащих продуктов. Использованный при проведении экспериментов лабораторный комплекс оборудования Университета МИСИС позволяет получить высокую сходимость итоговых свойств лабораторной металлопродукции, в том числе, специальных свойств, с результатами испытаний промышленных образцов бесшовных труб из новых марок сталей.

## **Выводы**

1. Установлены закономерности влияния легирующих элементов на микроструктуру и свойства низкоуглеродистых сталей и разработаны принципы микролегирования для обеспечения специальных свойств металлопродукции: повышенной коррозионной стойкости трубных марок сталей для изготовления сварных и бесшовных труб и строительных сталей повышенной огнестойкости. Металлопродукция из разработанных новых марок сталей успешно прошла аттестационные испытания в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации. Предложены технологические решения для ведущих металлургических предприятий, внедрение и освоение которых позволит внести значительный вклад в сохранение и развитие технологического суверенитета страны.

2. Для огнестойких сталей типа С390П установлены закономерности микролегирования и влияния микроструктуры на механические свойства стали при комнатной и повышенной (600 °С) температурах. Показано, что оптимальной структурой огнестойкой стали, обеспечивающей уровень огнестойкости и предел текучести в пределах 390÷550 МПа, является мелкозернистая феррито-бейнитная микроструктура с долей бейнита 50 %. Высокотемпературная прочность и огнестойкость обеспечивается за счёт наличия в структуре наноразмерных частиц NbC, VC, TiC, дополнительно образующихся при температуре пожара.

3. Установлено влияние технологических параметров прокатного производства на показатели качества проката из стали типа С390П. Повышение температуры скотки при использовании ламинарного охлаждения приводит к повышению низкотемпературной ударной вязкости. Определены оптимальные значения температурно-скоростных и деформационных параметров прокатки рулонов С390П. Показано, что для получения феррито-бейнитной структуры необходимо использование интенсивного ускоренного ламинарного охлаждения до температуры скотки 530÷560 °С на НШПС 2000. По механическим и эксплуатационным свойствам прокат соответствует требованиям для строительной стали класса прочности С390П и имеет высокую огнестойкость, превосходящую огнестойкость существующих строительных сталей классов прочности С255 и С355.

4. Для прямошовных труб из сталей экспериментальных композиций химического состава определены принципы микролегирования, обеспечивающие требуемые коррозионные и механические свойства при комнатной и пониженной (–60 °С) температурах. Показано, что оптимальной структурой для обеспечения класса прочности К52 является феррито-перлитная с размером зёрен феррита не более 10 мкм, которая

достигается за счет формирования наноразмерных карбонитридных частиц микролегирующих элементов Nb и Ti.

5. Показано, что для повышения коррозионной стойкости низкоуглеродистых сталей для бесшовных труб представленных в работе композиций химического состава необходимо проводить высокотемпературную аустенизацию, обеспечивающую образование карбидов и карбонитридов Nb и Ti, измельчение аустенитного зерна, сохранение высокой концентрации хрома в твердом растворе. Механические свойства для классов прочности K52÷56 достигаются высокотемпературным отпуском.

6. Предложены технологические рекомендации для совершенствования технологии производства плоского проката и бесшовных труб из новых марок сталей со специальными свойствами различного назначения. Определены системы легирования, выбраны режимы термомеханической обработки, проведены комплексные исследования структурно-фазовых характеристик и её эксплуатационных свойств продукции, изготовленной на НШПС 2000 по технологии:

- производства высокопрочного огнестойкого рулонного проката для строительных металлоконструкций;

- производства высокопрочного рулонного проката повышенной коррозионной стойкости для нефтегазопроводных труб.

7. Опытно-промышленные испытания образцов прямошовных труб, полученных из промышленных образцов проката, изготовленных в производственных условиях ПАО «Северсталь» по предложенной технологии, показали высокие эксплуатационные характеристики по сравнению серийными образцами труб.

8. Конструкционные характеристики огнестойкости образцов сварных двутавровых балок по результатам в ФГБУ ВНИИПО МЧС России подтвердили более высокую устойчивость к огневому воздействию строительных металлоконструкций из проката С390П по сравнению с рядовым строительным прокатом С255 и С355, что определяет возможность его использования для изготовления строительных металлоконструкций ответственного назначения.

#### **Список основных публикаций по теме диссертации**

1. Влияние комплексного легирования на свойства экономнолегированных сталей для бесшовных горячекатаных труб в сероводородостойком исполнении / Ющук В.В., Комиссаров А.А., Смарикина И.В., Кудашов Д.В., Долгач Е.Д., Мунтин А.В., Червонный А.В. Деформация и разрушение материалов. 2024. №11. С. 23-30.

2. Исследование стойкости сталей с содержанием хрома до 1 % к водородному воздействию / Юшук В.В., **Комиссаров А.А.**, Цветков А.С., Мунтин А.В., Червонный А.В., Машарипов С.З., Ершов Н.А., Дагаев С.Е. Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2024. №3. С. 54-67.

3. Анализ использования огнестойкого проката С390П для изготовления строительных металлоконструкций / **Комиссаров А.А.**, Тихонов С.М., Тен Д.В., Мазова Е.П., Матросов М.Ю., Глухов П.А., Пехотиков А.В., Павлов В.В., Адигамов Р.Р., Мишнев П.А., Кузнецов Д.В. Сталь. 2022. № 12. С. 54-58.

4. Факторы огнестойкости низколегированного строительного проката / **Комиссаров А.А.**, Тихонов С.М., Тен Д.В., Матросов М.Ю., Шульга Е.В., Глухов П.А., Адигамов Р.Р., Мишнев П.А., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Сталь. 2022. № 7. С. 30-34.

5. Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных температурах / Голованов В.И., Крючков Г.И., Стрекалев А.Н., **Комиссаров А.А.**, Тихонов С.М. Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31. № 2. С. 52-62.

6. Опыт использования современных методов исследования неметаллических включений в низколегированном металлопрокате / Мазова Е.П., Тихонов С.М., **Комиссаров А.А.**, Матросов М.Ю., Адигамов Р.Р., Мишнев П.А., Кузнецов Д.В. Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2022. № 4. С. 66-77.

7. Ударная вязкость металла шва сварного соединения низкоуглеродистой стали 09Г2С / Никулин С.А., Рогачев С.О., Белов В.А., **Комиссаров А.А.**, Турилина В.Ю., Шплис Н.В., Николаев Ю.А. Металлург. 2021. № 12. С. 39-46.

8. Сравнительная огнестойкость современных строительных сталей / **Комиссаров А.А.**, Тихонов С.М., Тен Д.В., Матросов М.Ю., Глухов П.А., Пехотиков А.В., Кузнецов Д.В. Сталь. 2021. № 11. С. 40-45.

9. Ductility and plasticity of ferritic-pearlitic steel after severe plastic deformation / Muñoz J.A., **Komissarov A.**, Khelfa T., Cabrera J.-M. Materials Science and Engineering: A. 2020. С. 140624.

10. Исследование причин разрушения высокопрочных бурильных труб / **Комиссаров А.А.**, Ожерелков Д.Ю., Сазонов Ю.Б., Тен Д.В., Токарь А.А. Деформация и разрушение материалов. 2020. № 10. С. 29-33.

11. Effect of deoxidation on low-alloy steel nonmetallic inclusion composition / Serov G.V., **Komissarov A.A.**, Tikhonov S.M., Sidorova E.P., Kuznetsov D.V., Kushnerev V., Mishnev P.A. Refractories and Industrial Ceramics. 2019. Т. 59. № 6. С. 573-578.

12. Опыт использования метода объемного исследования неметаллических включений для оценки коррозионной стойкости трубного проката / Карасев А., Jönsson P.G., Сидорова Е.П., **Комиссаров А.А.**, Кузнецов Д.В., Мишнев П.А., Митрофанов А.В. Сталь. 2019. № 2. С. 49-53.

13. Влияние термической обработки на коррозионную активность комплексных неметаллических включений и коррозионную стойкость сталей в водных средах / Амежнов А.В., Родионова И.Г., Кузнецов Д.В., **Комиссаров А.А.**, Сидорова Е.П. Металлург. 2018. № 12. С. 33-38.

14. Металлофизические особенности производства малоуглеродистого проката для нефтепромысловых труб / **Комиссаров А.А.**, Соколов П.Ю., Тихонов С.М., Сидорова Е.П., Мишнев П.А., Матросов М.Ю., Кузнецов Д.В. Сталь. 2018. № 11. С. 57-62.

15. Термодинамические расчеты и анализ процессов раскисления трубной стали / Падерин С.Н., Серов Г.В., **Комиссаров А.А.**, Тихонов С.М., Кузнецов Д.В. Сталь. 2017. № 1. С. 26-29.

#### Патенты по теме диссертации

1. Способ производства низколегированного толстолистового проката с повышенной огнестойкостью на реверсивном стане / Юлов В.Н., Глухов П.А., Мезин Ф.И., **Комиссаров А.А.**, Тихонов С.М., Кузнецов Д.В., Матросов М.Ю., Шульга Е.В., Тен Д.В. Патент на изобретение 2799194 С1, 04.07.2023. Заявка № 2022132639 от 13.12.2022.

2. Способ производства низколегированного рулонного проката категории прочности С390П / Юлов В.Н., Глухов П.А., Мезин Ф.И., **Комиссаров А.А.**, Тихонов С.М., Кузнецов Д.В., Матросов М.Ю., Шульга Е.В., Пехотиков А.В. Патент на изобретение 2781928 С1, 21.10.2022. Заявка № 2021136939 от 14.12.2021.

3. Способ производства низколегированной стали с повышенной коррозионной стойкостью / Митрофанов А.В., Барабошкин К.А., Киселев Д.А., Мезин Ф.И., Кузнецов Д.В., Тихонов С.М., Серов Г.В., Сидорова Е.П., **Комиссаров А.А.**, Матросов М.Ю. Патент на изобретение RU 2679375 С1, 07.02.2019. Заявка № 2017143878 от 14.12.2017.

4. Способ проведения испытаний проката для нефтепромысловых труб на коррозионно-абразивный износ / Митрофанов А.В., Альхименко А.А., Колесов С.С., Шемякин Б.А., Тихонов С.М., Кузнецов Д.В., **Комиссаров А.А.**, Сидорова Е.П., Алексеева Е.Л. Патент на изобретение RU 2697030 С1, 08.08.2019. Заявка № 2018143744 от 10.12.2018.

5. Способ производства трубного проката повышенной коррозионной стойкости на реверсивном стане / Митрофанов А.В., Попков А.Г., Михеев В.В., Смирнов Е.В., Кузнецов

Д.В., Тихонов С.М., Матросов М.Ю., **Комиссаров А.А.**, Горошко Т.В. Патент на изобретение RU 2697301 С1, 13.08.2019. Заявка № 2018142701 от 03.12.2018.

6. WO 2019/117756 A1 Method of manufacturing low-alloyed coiled strip of higher corrosion resistance. Mitrofanov A.V., Baraboshkin K.A, Tikhonov S.M, **Komissarov A.A.** etc.

7. Способ производства низколегированных рулонных полос с повышенной коррозионной стойкостью / Митрофанов А.В., Барабошкин К.А., Киселев Д.А., Кузнецов Д.В., Тихонов С.М., Серов Г.В., Сидорова Е.П., **Комиссаров А.А.**, Родионова И.Г., Матросов М.Ю., Зайцев А.И. Патент на изобретение RU 2675307 С1, 18.12.2018. Заявка № 2017143876 от 14.12.2017.

### Список цитируемой литературы

1. Одесский П. Д., Смирнов Л. А., Кулик Д. В. Микролегированные стали для северных и уникальных металлических конструкций. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 176 с.: ил.
2. Матросов Ю. И. Механизм влияния микродобавок ниобия на структуру и свойства толстолистовых низколегированных трубных сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022. № 2. С. 18–26.
3. Трифунович И. З., Рыбакова Л. Ю. Анализ поведения стальной балки при воздействии огня // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 1. С. 1–8.
4. Соболева Г. Н. Анализ техногенных катастроф. Причины, классификация // *Инновации в строительстве: материалы конференции*. Брянск, 2023.
5. Сопилко Н. Ю., Шамсутдинова М. Р. Современные проблемы развития нефтегазового комплекса России // *Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета*. 2023. Т. 3. Вып. 4. С. 440–448.
6. Кудашов Д. В., Семернин Г. В., Пейганович И. В., и др. Современная высокотехнологичная сталь 05ХГБ, предназначенная для изготовления электросварных нефтегазопроводных труб повышенной эксплуатационной надежности // *Бурение и нефть*. 2016. № 5. С. 48–53.
7. Ефименко Л. А., Шкапенко А. А., Стеклова Е. О. Исследование изменения структуры и свойств в зоне термического влияния высокопрочных трубных сталей. Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «Газпром». 14–15 ноября 2013.

8. Науменко В. В., Мунтин А. В., Баранова О. А., Сметанин К. С. Исследование влияния термической обработки на механические свойства и стойкость к растрескиванию в среде водорода конструкционной стали // Черные металлы. 2020. № 6.
9. Урцев В. Н., Корнилов В. Л., Шмаков А. В., и др. Формирование структурного состояния высокопрочной низколегированной стали при горячей прокатке и контролируемом охлаждении // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120. № 12. С. 1335–1344.
10. Амежнов А. В., Родионова И. Г. Влияние химического и фазового состава неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей в водных средах, характерных для условий эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов // Металлург. 2019. № 7. С. 45–52.
11. Троцан А. И., Позняк Л. А., Ершов Е. С., и др. Упрочняющее и охрупчивающее действия малых добавок тугоплавких элементов в низкоуглеродистой конструкционной стали // Металл и литье Украины. 2001. № 1–2. С. 12–16.
12. Курочкин В. В., Малюшин Н. А., Степанов О. А., Мороз А. А. Эксплуатационная долговечность нефтепроводов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2021. 231 с.
13. Завьялов В. В. Проблемы эксплуатационной надежности трубопроводов на поздней стадии разработки месторождений. М.: ОАО «ВНИИО-ЭНГ», 2015. 321 с.
14. Ткач Е. В., Семенов В. С., Базанов С. В. Огнезащитные материалы для обеспечения огнестойкости металлических конструкций. М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2022. С. 221–226.
15. Голованов В. И., Пехотиков А. В., Крючков Г. И., и др. Особенности расчета предела огнестойкости балок из строительных сталей // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 3. С. 7–13.
16. Голиков А. Д., Голдобина Л. А., Козлов Д. Ю. Оценка пределов огнестойкости несущих конструкций пространственного металлического каркаса // Сибирский пожаро-спасательный вестник. 2021. № 3 (22). С. 8–20.
17. Кудашов Д. В., Волкова Е. А., Эфрон Л. И., Сметанин К. С. Особенности структуры сталей различных композиций для изготовления труб, транспортирующих сероводородсодержащий природный газ // Черные металлы. 2022. № 11.
18. Науменко В. В., Мунтин А. В., Баранова О. А., Сметанин К. С. Исследование влияния термической обработки на механические свойства и стойкость к растрескиванию в среде водорода конструкционной стали // Черные металлы. 2020. № 6. С. 50–56.

- 19.** Конищев К. Б., Семенов А. М., Чабан А. С., Лобанова Н. А., Кашковский Р. В. Особенности механизма коррозионного растрескивания под напряжением металла труб в средах, содержащих сероводород и диоксид углерода // Вести газовой науки. – 2019. – № 3 (40). – С. 60–66.
- 20.** Усков Д.П., Пышминцев И.Ю., Мальцева А.Н., Смирнов М.А., Гойхенберг Ю.Н., Тарасова Е.А. / Влияние легирования на свойства высокоотпущенных сталей, применяемых для производства обсадных труб // Металловедение и термическая обработка. №7. 2017. С.41-46.
- 21.** Борисенкова Е. А. Разработка и применение методов исследования влияния состава и структуры материалов стальных труб на коррозионную стойкость в нефтяных средах: дисс. канд. техн. наук: 05.16.09. Самара: Самарский государственный технический университет, 2012.
- 22.** Арзамасов Б. Н., Сидорин И. И., Косолапов Г. Ф., и др. Металловедение: учебник для высших технических учебных заведений / под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 384 с.
- 23.** Фарбер В. М., Хотинов В. А., Селиванова О. В., и др. Эволюция структуры и механических свойств при высокотемпературном отпуске среднеуглеродистой микролегированной стали // Физика металлов и металловедение. 2023. Т. 124. № 8. С. 756–762.
- 24.** Степанов П. П., Зикеев В. Н., Эфрон Л. И., и др. Улучшение свариваемости для толстостенных газопроводных труб большого диаметра путем оптимизации химического состава // Металлург. 2010. № 11. С. 62–67.
- 25.** Эфрон Л. И. Металловедение большой металлургии. М.: Металлургиздат, 2012. 694 с.
- 26.** Кантюков Р. Р., Запевалов Д. Н., Вагапов Р. К. Исследование влияния водорода на стали в сероводородсодержащих и других средах на газовых объектах // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2024. Т. 67. № 1. С. 53–64.
- 27.** Ющук В. В., Комиссаров А. А., Цветков А. С., и др. Исследование стойкости сталей с содержанием хрома до 1 % к водородному воздействию // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2024. № 3. С. 54–67.
- 28.** Комиссаров А. А., Ожерелков Д. Ю., Сазонов Ю. Б., и др. Исследование причин разрушения высокопрочных бурильных труб // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 10. С. 29–33.

**29.** Карасев А., Jönsson P. G., Сидорова Е. П., и др. Опыт использования метода объемного исследования неметаллических включений для оценки коррозионной стойкости трубного проката // Сталь. 2019. № 2. С. 49–53.

**30.** Амежнов А. В., Родионова И. Г., Кузнецов Д. В., и др. Влияние термической обработки на коррозионную активность комплексных неметаллических включений и коррозионную стойкость сталей в водных средах // Metallurg. 2018. № 12. С. 33–38.

**31.** Комиссаров А. А., Соколов П. Ю., Тихонов С. М., и др. Металлофизические особенности производства малоуглеродистого проката для нефтепромысловых труб // Сталь. 2018. № 11. С. 57–62.

**32.** Бекенов Д. К., Масакбаева С. Р. Влияние вводимого ванадия на свойства стали // Наука и техника Казахстана. 2020. Вып. №3. С. 67–73.