

*На правах рукописи*



**Маслякова Анастасия Алексеевна**

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА  
ПРОЧНОСТЬ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СТАЛЕЙ Fe-Mn-Si  
В СО<sub>2</sub>-СОДЕРЖАЩИХ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ СРЕДАХ**

2.6.17. Материаловедение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»

Научный руководитель: **Амосов Александр Петрович**  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Латыпов Олег Ренатович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Материаловедение и защита от коррозии» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»  
**Петров Сергей Степанович**, кандидат физико-математических наук, начальник аналитического отдела ООО «Научно-производственный центр «Самара»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»**

Защита состоится «14» октября 2022 г. в 11:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» и на сайте <https://samgtu.ru/>.

Отзывы на автореферат просьба выслать по адресу:  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, главный корпус.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Альфия Расимовна Луц

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы:** Большинство нефтяных месторождений России (Западная, Восточная Сибирь, Поволжье, Урал и др.) характеризуются высокой коррозионной активностью добываемых нефтепромысловых сред. Высокая агрессивность сред связана с повышенной концентрацией в них  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , хлоридов, а также биозараженностью. В связи с этим, актуальной является проблема разработки и выбора материалов для производства труб, обладающих достаточной коррозионной стойкостью. Следует отметить, что ввиду большой протяженности трубопроводов, использование нержавеющей сталей, как правило, экономически не оправдано, поэтому для изготовления нефтепроводных труб используются низколегированные стали.

Существенный вклад в изучение коррозионного разрушения конструкционных сталей различных систем легирования в нефтепромысловых средах внесли В. И. Астафьев, Л. Р. Ботвина, Д.Е. Бугай, М.А. Выбойщик, А.Г. Гареев, П. В. Гельд, А. Дугстад, Е.Е. Зорин, А. Икеде, А.В. Иоффе, Г. В. Карпенко, А.Н.Коваленко, Ж. Кроле, И.Р. Кузеев, В. И. Кушнарченко, О.Р. Латыпов, И.С. Лось, А. Н. Маркин, С. Нешич, И. Робертсон, Р.Г. Ризванов, А.Е. Розен, Л. С. Саакян, О. И. Стеклов, Т. В. Тетюева, А. В. Шрейдер, Л. И. Эфрон, У. Эванс и другие отечественные и зарубежные ученые, которые обобщили богатый научный и практический материал и определили направление проводимых исследований.

Так как одним из основных превалирующих механизмов разрушения нефтепромысловых труб является углекислотная коррозия, вопрос корректного подбора марки стали и режимов ее термической обработки для повышения долговечности нефтедобывающего оборудования в средах, содержащих  $\text{CO}_2$ , является актуальным. Одним из подходов решения проблемы повышения работоспособности оборудования является разработка и создание новых сталей повышенной стойкости к коррозионно-механическому разрушению в нефтепромысловых  $\text{CO}_2$ -содержащих средах. При этом химический состав, механические и специальные свойства

разрабатываемых марок сталей для производства нефтяных труб должны соответствовать требованиям действующей нормативно-технической документации, как нефтяных компаний, так и заводов – изготовителей.

В настоящее время одной из широко используемых марок сталей для производства бесшовных нефтепромысловых труб, является сталь 09Г2С с системой легирования «Fe - Mn - Si», основными преимуществами которой являются повышенные параметры хладостойкости и прочности, а также низкая себестоимость, по сравнению с легированными хромсодержащими марками стали. К основным недостаткам стали 09Г2С стоит отнести ее низкую коррозионную стойкость в CO<sub>2</sub>-содержащих средах.

Поскольку в настоящее время ПАО «НК «Роснефть» является лидером Российской нефтедобывающей отрасли, актуальным является разработка перспективного химического состава, соответствующего требованиям действующих методических указаний № П4-06 М-0111 этой компании, для производства бесшовных нефтепромысловых труб, стойких в CO<sub>2</sub>-содержащих средах. Очевидно, наименее затратный путь решения проблемы разрушения нефтяных труб в CO<sub>2</sub>-содержащих средах состоит в повышении коррозионной стойкости широко применяемой марки стали 09Г2С системы легирования «Fe - Mn - Si» путем усовершенствования ее химического состава и последующей термической обработки.

**Основная цель работы:** Повышение коррозионной стойкости бесшовных нефтепромысловых труб из широко применяемой марки стали 09Г2С системы легирования «Fe - Mn - Si» в CO<sub>2</sub>-содержащих средах путем усовершенствования ее химического состава и последующей термической обработки.

Для достижения этой цели в диссертационной работе решались следующие **основные задачи:**

1. Анализ нормативно-технической документации на наличие требований к материалу бесшовных нефтепромысловых труб, работающих в агрессивных средах.

2. Поиск информации о химическом составе сталей, стойких в средах с повышенной концентрацией  $\text{CO}_2$ , а также о методиках оценки стойкости стали в  $\text{CO}_2$ -содержащей среде.

3. Анализ влияния легирующих элементов и режимов термической обработки стали системы «Fe-Mn-Si» на прочностные характеристики и на ее коррозионную стойкость в  $\text{CO}_2$ -содержащей среде.

4. Разработка усовершенствованного химического состава стали 09Г2С, в соответствии с требованиями действующих методических указаний №П4-06 М-0111 ПАО «НК «Роснефть», и режимов термической обработки для производства бесшовных нефтепромысловых труб, с повышенной стойкостью в  $\text{CO}_2$ -содержащей среде.

#### **Научная новизна:**

1. Установлено, что причиной развития язвенных поражений трубной стали системы легирования «Fe-Mn-Si» является углекислотная коррозия даже при низком парциальном значении  $\text{CO}_2$ .

2. Предложено использовать комплексное легирование стали, которое за счет синергетического эффекта позволяет заменить дорогостоящие легирующие элементы, снизить себестоимость стали, повысить механические и коррозионные свойства.

3. Установлено, что незначительные добавки хрома (0,4 масс %) и циркония (0,02 масс %), а также снижение концентрации углерода (до 0,06 масс %) и марганца (до 0,4 масс %) для сталей системы легирования «Fe-Mn-Si» позволяют получить материалы со стойкостью к общей коррозии в  $\text{CO}_2$ -содержащей среде на уровне материалов с содержанием Cr ~ 1% (системы легирования «Fe-Cr-V»). На основе этих результатов обоснован усовершенствованный марочный состав стали 09Г2С с повышенной коррозионной стойкостью в  $\text{CO}_2$ -содержащей среде.

4. Показано, что стойкость к общей коррозии в  $\text{CO}_2$ -содержащей среде зависит также от вида термической обработки трубной стали. Осуществлен выбор оптимального вида термической обработки стали

усовершенствованного марочного состава, обеспечивающего сталь необходимыми прочностными и коррозионными характеристиками.

**Практическая значимость:**

1. На основании результатов проведенных исследований предложен усовершенствованный марочный состав стали 09Г2С, соответствующий требованиям действующих методических указаний №П4-06 М-0111 ПАО «НК «Роснефть», для производства бесшовных нефтепромысловых труб с повышенной стойкостью в CO<sub>2</sub>-содержащих средах.

2. Для предложенного усовершенствованного марочного состава стали рассмотрены варианты режимов термической обработки и выбран оптимальный режим для производства бесшовных нефтепромысловых труб с повышенной стойкостью в CO<sub>2</sub>-содержащей среде.

**Объект исследования:** Стали систем легирования «Fe-Mn-Si» и «Fe-Cr-V» нефтепромысловых бесшовных труб, эксплуатирующихся в CO<sub>2</sub>-содержащих средах.

**Предмет исследования:** Коррозионная стойкость и прочностные свойства трубных сталей, эксплуатирующихся в CO<sub>2</sub>-содержащих средах, зависимость свойств от химического состава и термической обработки стали.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты сравнительного анализа причин и механизма разрушения нефтепромысловых труб из сталей систем легирования «Fe-Mn-Si» и «Fe-Cr-V» после эксплуатации в CO<sub>2</sub>-содержащих средах.

2. Результаты обоснования и экспериментального подтверждения влияния легирования при усовершенствовании химического состава базовой стали 09Г2С системы «Fe-Mn-Si» на прочностные характеристики и коррозионную стойкость в CO<sub>2</sub>-содержащей среде.

3. Выбор оптимального режима термической обработки усовершенствованного марочного состава стали 09Г2С с повышенной стойкостью в CO<sub>2</sub>-содержащих средах.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности:**

Содержание диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 2.6.17. Материаловедение (05.16.09 - Материаловедение (машиностроение) по пунктам: 1. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий. 9. Разработка способов повышения коррозионной стойкости материалов в различных условиях эксплуатации.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных и применением статических методов обработки результатов, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: 3-я Международная научно-техническая конференция «Коррозия в нефтяной и газовой промышленности» 5-7 сентября 2018 г. (г. Самара); 4-ая Международная научно-техническая конференция «Коррозия в нефтяной и газовой промышленности» 4-6 сентября 2019 г. (г. Самара); 4-ая Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и системная модернизация страны» 21-22 мая 2019 г. (г. Курск), 4-ая Международная научно-практическая конференция «Современные материалы, техника и технологии» 30 октября 2020 г. (г. Курск); 2-я Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Современные проблемы материаловедения» 18 февраля 2021 г. (г. Липецк); 16-я Международная научно-техническая конференция «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» 18-19 марта 2021 год

(г. Курск); Международная научно-техническая конференция «International conference on Industrial Engineering» 17-21 мая 2021 г. (г. Сочи).

**Личный вклад автора в диссертационную работу** состоит в постановке целей и задач, разработке методологии исследования, интерпретации результатов и формулировке всех основных положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы. Основные эксперименты автор выполнил в творческих коллективах, что отражено в составе авторов опубликованных работ.

**Публикации.** Результаты диссертации опубликованы в 7 работах, из них 1 статья в журнале, входящем в базы данных Scopus, 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных источников, включающего 129 наименований, содержит 120 страниц машинописного текста, 24 рисунка, 26 таблиц и 1 приложение.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** содержится обоснование актуальности диссертационной работы, цель и задачи исследований, обоснование практической значимости работы.

**В первой главе** рассмотрены основные виды коррозионного разрушения металла нефтепромысловых труб в процессе эксплуатации и основные способы их защиты.

Установлено, что  $\text{CO}_2$ -коррозия является одним из основных видов коррозии нефтяного оборудования. Проблема выхода из строя нефтепромысловых труб в результате углекислотной коррозии в настоящее время является актуальной и требует разработки мер по ее предотвращению. Отмечено, что одним из способов защиты металла труб в  $\text{CO}_2$ -содержащих средах является применение коррозионностойких марок сталей для их производства. Для решения проблемы низкой долговечности труб при



эксплуатации в средах, содержащих углекислый газ, ранее были разработаны легированные хромсодержащие марки стали 13ХФЧА, 08ХМФА, 08ХМФБЧА, 15Х5МФБЧ, обладающие повышенной прочностью и коррозионной стойкостью в нефтепромысловых средах. Однако, применение данных сталей может быть ограничено в связи с их высокой стоимостью из-за повышенного содержания хрома и других дорогостоящих легирующих элементов.

В настоящее время широко распространенным материалом для их изготовления остаются стали с системой легирования «Fe-Mn-Si» - 09Г2С, 17Г1С. Данный материал соответствует требованиям действующих методических указаний №П4-06 М-0111 ПАО «НК «Роснефть», а также обладает необходимым уровнем механических характеристик, однако характеризуются низкой коррозионной стойкостью в CO<sub>2</sub> – содержащих средах.

Результаты анализа литературных данных свидетельствуют о необходимости в разработке новых марок стали, соответствующих требованиям методических указаний №П4-06 М-0111 ПАО «НК «Роснефть», которые будут иметь достаточную коррозионную стойкость в CO<sub>2</sub>-содержащих средах. Интерес представляет комплексное легирование стали, включающее синергетический эффект, который позволит заменить дорогостоящие легирующие элементы, снизит себестоимость, повысит механические и коррозионные свойства.

**Во второй главе** описаны методология, методы исследования и характеристики объектов исследования, используемых в диссертационной работе. В качестве объектов исследования использовались стали марок – 09Г2С и 13ХФА.

Выбор данных марок связан со следующими факторами:

1. Необходимостью усовершенствования химического состава базовой стали 09Г2С системы легирования «Fe-Mn-Si» для повышения ее коррозионной стойкости в CO<sub>2</sub>-содержащих нефтепромысловых средах.

2. Сталь 13ХФА является эталонной сталью, необходимая для проведения сравнительного анализа коррозионной стойкости в CO<sub>2</sub>-содержащих нефтепромысловых средах с экспериментальной сталью усовершенствованного состава, рассматриваемой в данной работе.

Для проведения исследований привлечены следующие качественные и количественные методы: металлографический анализ, включающий световую и растровую электронную микроскопию; рентгеноструктурный фазовый анализ; локальный энергодисперсионный химический анализ; гравиметрический анализ; анализ морфологии продуктов коррозии; анализ продуктов коррозии в характеристическом рентгеновском излучении; измерение механических свойств металла, определение прокаливаемости, испытание на стойкость к углекислотной коррозии.

Результаты выбранных методов испытаний позволяют получить полную и надежную информацию о влиянии химического состава и структурного состояния сталей после термической обработки на эксплуатационные свойства нефтепромысловых труб, что необходимо для решения в поставленной в работе задачи по разработке стали системы легирования «Fe-Mn-Si» с усовершенствованными химическим составом и режимами термообработки для обеспечения требуемых механических свойств и повышенной коррозионной стойкостью в CO<sub>2</sub>-содержащей среде.

**Третья глава** посвящена анализу нормативно-технической документации и материалов, применяемых в настоящее время нефтяными компаниями для производства бесшовных нефтепромысловых труб.

Проведен анализ технических требований, предъявляемых двумя крупными отечественными нефтяными компаниями – ПАО «Газпром Нефть» и ПАО «НК «Роснефть», а также технических условий двух наиболее крупных изготовителей бесшовных труб: ПАО «ТМК» и ПАО «Группа ЧТПЗ». Для сравнения рассмотрен международный стандарт на нефтегазопроводные трубы – API Spec 5L. Установлено, что в нормативных документах ПАО «Газпром Нефть» и ПАО «НК «Роснефть» приведено

ранжирование нефтепромысловых сред по степени коррозионной агрессивности. Приведенное ранжирование отличается от данных международного стандарта ИСО 15156. Используя международный стандарт ИСО 15156, можно оценить способность нефтепромысловых сред вызывать коррозионное растрескивание и осуществить подбор подходящей марки стали для труб.

Отмечается, что в настоящее время не существует стандартных методов выбора материала труб, стойкого к другим видам коррозии, характерным для нефтепромысловых сред, таким как язвенная коррозия в  $\text{CO}_2$ - и  $\text{H}_2\text{S}$ -содержащих, микробиологическая коррозия, коррозионно-эрозионный износ и др. Рассмотренные нормативные документы предъявляют требования к стойкости стали к коррозионному растрескиванию НИС (ВР) и SSC (СКРН) со ссылкой на соответствующие стандартные методы испытаний. Во всех нормативных документах отсутствуют сведения о методиках оценки стойкости в  $\text{CO}_2$ -содержащих средах. Нет указаний о допустимых значениях общей локальной коррозии.

Предварительный анализ стандартов нефтяных компаний показывает, что трубы в сероводородостойком исполнении востребованы как в ПАО «НК «Роснефть», так и в ПАО «Газпром Нефть». Отсюда возникает задача – разработать подобные трубы класса прочности K52 за счет правильного подбора химического состава и режима термической обработки стали этих труб с повышенной стойкостью в  $\text{CO}_2$ -содержащих средах.

**Четвертая глава** посвящена исследованию основных причин и механизмов разрушения нефтепромысловых труб из широко применяемых марок сталей 09Г2С и 13ХФА в условиях эксплуатации.

Для более точного анализа причин разрушения были предоставлены данные по составу транспортируемой среды (таблица 1), содержащие значения парциального давления углекислого газа.

Анализ показал, что характер коррозионного разрушения нефтепромысловых труб из сталей 09Г2С (рисунок 1) и 13ХФА (рисунок 2)

идентичен, идет преимущественно по нижней образующей с образованием глубоких борозд и сквозных язв, что характерно для углекислотной коррозии.

Таблица 1 - Химический состав транспортируемой среды

Объект исследования	Обводненность, %	Температура, °С	Давление, атм	Характеристика газа	
				Парциальное давление H <sub>2</sub> S, Па	Парциальное давление CO <sub>2</sub> , Па
Нефтесборный коллектор (09Г2С) (Ø 273x18)	56	25	14	0	<b>10400</b>
Нефтепровод (13ХФА) (Ø273×8)	81	20	12	1800	<b>6500</b>
Данные действующих методических указаний №П4-06 М-0111	-	-	-	< 300	<b>≥ 50000</b>

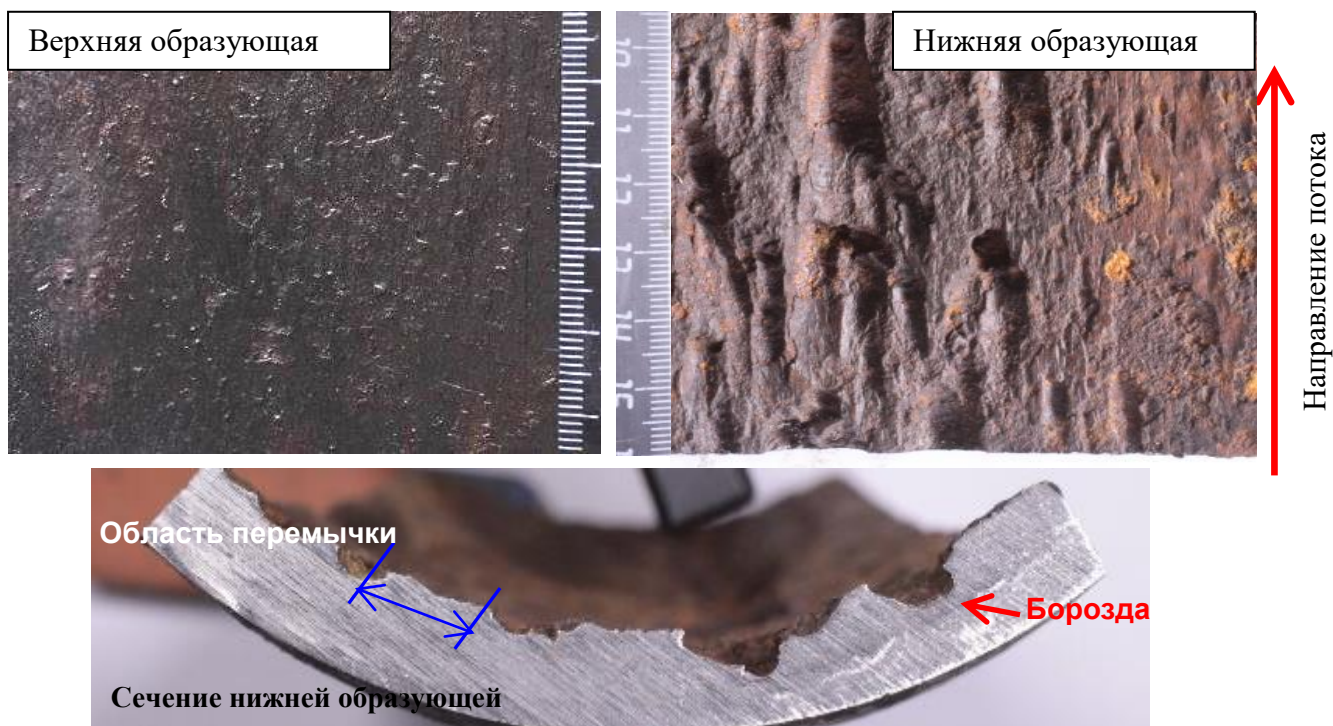


Рисунок 1 - Вид коррозионного повреждения внутренней поверхности нефтесборного коллектора из стали 09Г2С в CO<sub>2</sub>-содержащей среде



Рисунок 2 - Внешний вид фрагмента трубы из стали марки 13ХФА после эксплуатации

Отмечается, что данное коррозионное разрушение начинается при значительно более низком парциальном давлении углекислого газа 6500 – 10400 Па, по сравнению с парциальным давлением 50000 Па, указанным в действующих методических указаниях №П4-06 М-0111.

Полученные результаты говорят о том, что для корректного подбора материала нефтепромысловых труб необходимо:

- проводить предварительный анализ транспортируемой среды;
- даже при низком парциальном давлении углекислого газа в транспортируемой среде использовать стали с повышенной коррозионной стойкостью.

**В пятой главе** рассмотрена возможность повышения коррозионной стойкости в средах с повышенной концентрацией  $\text{CO}_2$  базовой стали 09Г2С путем изменения химического состава данной марки и последующей ее термической обработки. Работа включала следующие этапы:

1. Проведен анализ литературных данных о влиянии режимов термической обработки стали 09Г2С на ее коррозионную стойкость в  $\text{CO}_2$ -содержащей среде. Установлено, что режим термической обработки оказывает существенное влияние на стойкость стали 09Г2С в  $\text{CO}_2$ -содержащих средах. Скорость коррозии после нормализации с прокатного нагрева в 2 раза выше, чем после термической обработки закалка + отпуск.

Однако, данный факт не исключает низкую долговечность труб из стали 09Г2С в CO<sub>2</sub>-содержащих средах.

2. Проведен анализ литературных данных о влиянии легирующих элементов на микроструктурные, механические параметры, а также на коррозионные свойства стали.

3. На основании полученных данных в вышеперечисленных пунктах был обоснован и предложен усовершенствованный химический состав экспериментальной стали (таблица 2), проведена ее выплавка, подобран режим термической обработки, а также проведена оценка ее коррозионной стойкости в модельной CO<sub>2</sub>-содержащей среде.

Таблица 2 – Химический состав исследуемых сталей для производства бесшовных нефтепромысловых труб

Марка стали	Концентрация химических элементов, %										
	C	Si	Mn	Al	Cr	V	Ni	Cu	P	S	Zr
09Г2С (ГОСТ 19281 – 2014)	Не более 0,12	0,50-0,80	1,30-1,70	0,02-0,06	Не более						-
					0,30	0,12	0,30	0,30	0,030	0,035	
13ХФА (ТУ 1380-075- 05757848-2013)	0,04-0,13	0,17-0,37	Не более 0,7	0,02-0,05	0,5-0,7	0,04- 0,09	Не более				-
						0,3	0,3	0,015	0,005		
<b>Экспериментальная сталь</b>	<b>0,06</b>	<b>0,60</b>	<b>0,40</b>	<b>0,025</b>	<b>0,40</b>	<b>0,07</b>	<b>0,10</b>	<b>0,20</b>	<b>0,003</b>	<b>0,004</b>	<b>0,02</b>
Допустимые отклонения в экспериментальной стали	± 0,01	±0,05	±0,05	±0,005	±0,05	±0,01	±0,03	±0,05	±0,002	±0,002	±0,003

Выплавка экспериментальной стали проводилась методом вакуумно-индукционного переплава в вакуумной печи в лабораторных условиях. Данный способ соответствует достаточно жестким требованиям по максимально допустимому содержанию газов и малым допускам к химическому составу.

Лабораторная термическая обработка проводилась на образцах проката размером 120×20×10 мм. Режимы термической обработки включали закалку в воду из аустенитной области и последующий отпуск при температурах 400, 525 и 600 °С. Выдержка при аустенитизации и отпуске составляла 30 минут.

Температура аустенитизации стали составляла 920 °С. После термической обработки образцы металла испытывались на одноосное растяжение, также проводился металлографический анализ. Результаты механических испытаний для исследуемой стали приведен в таблице 3.

Таблица 3 - Механические свойства экспериментальной стали после различных режимов термической обработки, включающих закалку в воду

Режим ТО	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	$\delta_5$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Твердость
закалка 920 °С (30мин) в воду	710 730	600 615	0,85 0,84	22,0	-	25,0 23,0 22,0 HRC
закалка 920 °С (30мин) в воду + отпуск 400 °С (30мин)	610	530	0,86	23,0	81,0	32,0 28,5 32,0 28,5 HRC
закалка 920 °С (30мин) в воду + отпуск 525 °С (30мин)	660	550	0,83	19,0	80,0	24,0 24,5 23,0 23,5 HRC
закалка 920 °С (30мин) в воду + отпуск 600 °С (30мин)	600 610	510 520	0,85 0,85	24,0 22,5	82,0 81,0	89,5 92,0 91,0 HRB

Сформировавшийся тип структуры после отпуска при 400 °С и 600 °С обеспечивает высокий уровень как прочностных, так и пластических свойств: предел прочности 610 МПа, предел текучести 520 - 530 МПа, относительное удлинение 22,5 – 24,0 %.

Можно сделать вывод, что наиболее оптимальными режимами термической обработки исследуемой стали является закалка с охлаждением в воду с последующим отпуском при 400 °С или 600 °С

Далее был проведен сравнительный анализ коррозионной стойкости стали 13ХФА и экспериментальной стали с усовершенствованным химическим составом в СО<sub>2</sub>-содержащей среде. С целью исследования влияния структурного фактора на стойкость к углекислотной коррозии, перед проведением испытаний образцы всех исследуемых сталей были подвергнуты термической обработке по 2 режимам:

1. Закалка от 920 °С с охлаждением в воду и последующий отпуск при 400 °С.

2. Закалка от 920 °С с охлаждением в воду и последующий отпуск при 600 °С.

Также было проведено сравнение коррозионной стойкости экспериментальной стали со сталью 09Г2С. Структура стали 09Г2С соответствовала термической обработке - закалка + высокотемпературный отпуск (600 °С). Время выдержки всех марок сталей в модельной СО<sub>2</sub>-содержащей среде составляла 740 часов. Результаты оценки скорости коррозии в модельной СО<sub>2</sub>-содержащей среде приведены в таблице 4.

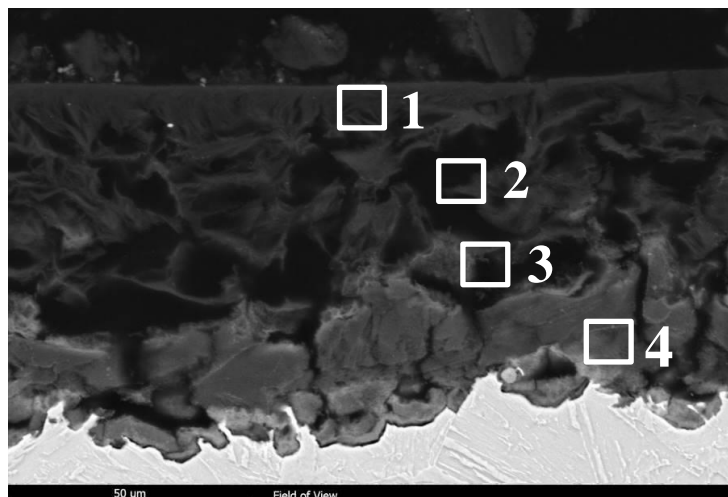
Таблица 4 - Скорость общей коррозии исследуемых сталей в модельной СО<sub>2</sub>-содержащей среде

Марка стали	Режим термической обработки	Скорость коррозии, мм/год (с продуктами коррозии)	Скорость коррозии, мм/год (после очистки от продуктов коррозии)
13ХФА	Закалка 920 + отпуск 400	1,33	1,36
	Закалка 920 + отпуск 600	1,17	1,29
Экспериментальная сталь	Закалка 920 + отпуск 400	1,55	1,66
	Закалка 920 + отпуск 600	1,59	1,69
09Г2С	Закалка 920 + отпуск 600	1,74	1,94

После испытания образцов в СО<sub>2</sub>-содержащей среде были изготовлены шлифы для исследования образовавшего слоя продуктов коррозии на поверхности металла.

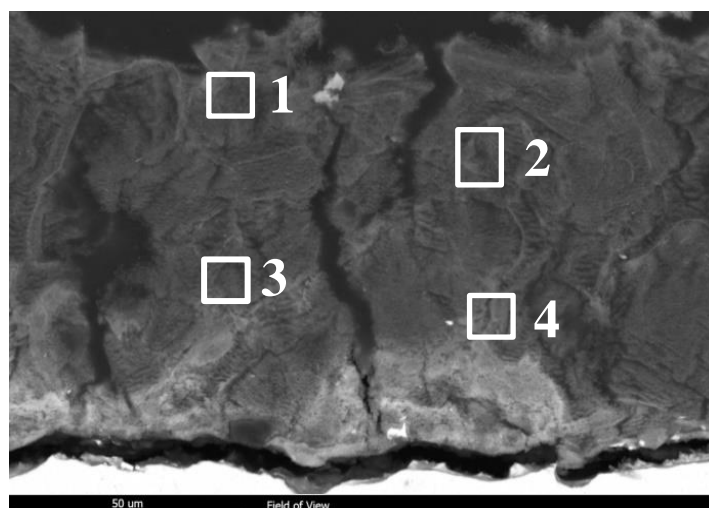
Микрорентгеноспектральным химическим анализом установлено, что после вышеописанных режимов термической обработки образцов из двух сталей – экспериментальной и 13ХФА, в процессе их выдержки в СО<sub>2</sub>-содержащей среде, на их поверхности образуется защитный коррозионный слой с повышенной концентрацией (на порядок выше, относительно основного металла) таких элементов, как хром и ванадий (рисунок 3). В коррозионном слое у экспериментальной стали также наблюдается повышенная (на порядок выше, относительно основного металла) концентрация хрома, ванадия и циркония (рисунок 4).





	<b>O</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>V</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Fe</b>
Обл. 1.	19,02	00,71	00,41	00,74	-	12,74	ост
Обл. 2	17,82	00,67	00,41	00,70	-	08,80	ост
Обл. 3	16,94	00,54	00,42	00,55	-	07,14	ост
Обл. 4	-	-	00,78	-	00,41	01,46	ост

Рисунок 3 - Вид и химический состав продуктов коррозии в сечении образца из стали 13ХФА после лабораторных испытаний на стойкость к  $\text{CO}_2$ -коррозии



	<b>O</b>	<b>Zr</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>
Обл. 1.	08,48	39,67	-	-	-	-	00,13	ост
Обл. 2	16,34	-	01,05	00,25	00,79	00,56	00,49	ост
Обл. 3	08,23	00,69	00,48	00,79	-	02,89	00,64	ост
Обл. 4	17,11	-	00,81	00,28	00,66	01,23	00,24	ост

Рисунок 4 - Вид и химический состав продуктов коррозии в сечении образца из экспериментальной стали после лабораторных испытаний на стойкость к  $\text{CO}_2$ -коррозии

По результатам сравнительного анализа коррозионной стойкости рассматриваемых марок сталей можно сделать следующие выводы:

1. Минимальные значения скорости коррозии соответствуют образцам из стали 13ХФА. Данная сталь характеризуется пониженным содержанием углерода (0,06 масс %) и повышенной концентрацией хрома (0,7 масс %). В составе стали наблюдается низкая концентрация марганца (0,4 масс %).

2. Скорость коррозии экспериментальной стали ниже, чем у базовой стали системы легирования «Fe-Mn-Si» 09Г2С.

3. Незначительные добавки хрома (0,4 масс %) и циркония (0,02 масс %), а также снижение концентрации углерода (до 0,06 масс %) и марганца (до 0,4 масс %) оказало положительное влияние на стойкость стали системы легирования «Fe-Mn-Si» к общей коррозии в CO<sub>2</sub>-содержащей среде.

4. Температура выдержки при отпуске, после закалки с охлаждением в воду, оказывает влияние на стойкость экспериментальной стали к общей коррозии в CO<sub>2</sub>-содержащей среде. Минимальная скорость коррозии наблюдается после отпуска при 400 °С. После данного режима термической обработки скорость коррозии усовершенствованной экспериментальной стали на 12-17% меньше, чем у базовой стали 09Г2С.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Анализом литературных данных подтверждено, что в настоящее время CO<sub>2</sub>-коррозия является одним из основных видов коррозии нефтепромыслового оборудования. Широко распространенным материалом для изготовления нефтепромысловых труб в настоящее время остаются стали с системой легирования «Fe-Mn-Si» - 09Г2С и 17Г1С, которые обладают необходимым уровнем механических характеристик, однако характеризуются низкой коррозионной стойкостью в CO<sub>2</sub> – содержащих средах. Применение легированных хромсодержащих марок сталей 13ХФЧА, 08ХМФА, 08ХМФБЧА, 15Х5МФБЧ, обладающие повышенной прочностью и коррозионной стойкостью в нефтепромысловых средах, может быть

ограничено в связи с их высокой стоимостью из-за повышенного содержания хрома и других дорогостоящих легирующих элементов. Наименее затратный путь решения проблемы разрушения нефтяных труб в CO<sub>2</sub>-содержащих средах состоит в повышении коррозионной стойкости широко применяемой марки стали 09Г2С системы легирования «Fe - Mn - Si» путем изменения ее химического состава с соблюдением требований методических указаний №П4-06 М-0111 ПАО «НК «Роснефть», а также изменения ее последующей термической обработки.

2. Результаты промышленных испытаний труб из сталей 09Г2С и стали 13ХФА показали, что заметное коррозионное разрушение металла происходит уже при более низких концентрациях углекислого газа в транспортируемой среде (6500 – 10400 Па) по сравнению с парциальным давлением 50000 Па, указанным в действующих методических указаниях №П4-06 М-0111.

3. Исследована возможность повышения коррозионной стойкости стали 09Г2С в средах с повышенной концентрацией CO<sub>2</sub> путем усовершенствования ее химического состава и последующей термической обработки.

4. Показано, что незначительные добавки хрома (0,4 масс %) и циркония (0,02 масс %), а также снижение концентрации углерода (до 0,06 масс %) и марганца (до 0,4 масс %) оказывают синергетический эффект, положительно влияют на стойкость стали системы легирования «Fe-Mn-Si» к общей коррозии в CO<sub>2</sub>-содержащей среде и позволяют обосновать и предложить усовершенствованный экспериментальный состав стали 09Г2С с повышенной стойкостью в CO<sub>2</sub>-содержащей среде.

5. Произведена выплавка экспериментальной стали с усовершенствованным составом и подтверждена ее повышенная коррозионная стойкость в CO<sub>2</sub>-содержащей среде.

6. Установлено, что температура выдержки при отпуске, после закалки при 920 °С с охлаждением в воду, также оказывает влияние на стойкость

экспериментальной стали к общей коррозии в CO<sub>2</sub>-содержащей среде. Минимальная скорость коррозии наблюдается после отпуска при 400 °С, и она меньше на 12-17% скорости коррозии базовой стали 09Г2С, что позволяет обосновать и предложить режим термической обработки экспериментальной стали с усовершенствованным химическим составом.

7. Предложенная экспериментальная усовершенствованная марка стали может служить материалом для производства бесшовных нефтепромысловых труб, работоспособных в CO<sub>2</sub>-содержащих средах. Химический состав и механические свойства экспериментальной стали соответствуют требованиям действующих методических указаний № П4-06 М-0111 ПАО «НК «Роснефть».

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

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Кощеева (Маслякова), А. А. Влияние режимов термической обработки на стойкость стали 09Г2С в средах с повышенным значением CO<sub>2</sub> / А. А. Кощеева (Маслякова), В. А. Ревякин, А. В. Иоффе // Научные технологии в машиностроении. – 2020. - № 2. - С. 3-9.

2. Кощеева (Маслякова), А. А. Влияние легирующих элементов Cr и V на коррозионную стойкость бесшовных нефтепромысловых труб из стали 13ХФА при эксплуатации в средах с повышенной концентрацией CO<sub>2</sub> / А. А. Кощеева (Маслякова) // Научные технологии в машиностроении. – 2020. - № 5. – С. 33-41

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и входящих в базы данных SCOPUS:*

3. Maslyakova, A. A. Recommendations for Increasing the Durability of Oilfield Pipes Working in aggressive CO<sub>2</sub> - Containing Environment / A. A. Maslyakova, A.P. Amosov, T.V Tetyueva // Lecture Notes in Mechanical Engineering. - 2022. - P. 482 – 488.

*Публикации в других изданиях:*

4. Кощеева (Маслякова), А. А. Исследование особенностей коррозионного повреждения труб из стали 09Г2С с применением методов лабораторного моделирования в нефтепромысловых средах с повышенным содержанием CO<sub>2</sub> / А. А. Кощеева (Маслякова) // Молодежь и системная модернизация страны: сборник научных статей 4-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых (21-22 мая 2019 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т.- 2019. - С. 288 - 292.

5. Амосов, А. П. Исследование влияния эксплуатационных факторов на коррозионную повреждаемость нефтепромыслового оборудования из стали 13ХФА / А. П. Амосов, А. А. Маслякова // Научно-практический рецензируемый журнал «Современные материалы, техника и технологии». – №4 (35). – 2020 г. – ISSN 2411-9792. - С. 5 - 11.

6. Маслякова, А. А. Сравнительный анализ коррозионной стойкости сталей 13ХФА и 06ГСФЦ в CO<sub>2</sub>-содержащей среде / А. А. Маслякова // Современные проблемы материаловедения: сборник трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ, Липецк, 18 февраля 2021 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2021. - С. 115-120.

7. Амосов, Е. А. Выбор марки стали нефтепромысловой трубы для эксплуатации в условиях отрицательных температур / Е. А. Амосов, А. А. Маслякова, В. А. Дубовицкая // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных статей 16-й Международной научно-технической конференции (17-18 марта) / редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2021. - С. 48 - 51.

*Научное издание*

Маслякова Анастасия Алексеевна

## АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук на тему:  
Влияние легирования и термической обработки на прочность и  
коррозионную стойкость сталей Fe-Mn-Si  
в CO<sub>2</sub>-содержащих нефтепромысловых средах

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного  
совета  
99.2.039.02 (Д 999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный  
исследовательский университет имени академика  
С.П. Королева»  
(протокол № 5 от «27» июня 2022 г.).

Формат 60 x 84 1/16. Набор компьютерный.  
Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ №xxx.  
Отпечатано на ризографе.  
ФГБОУ ВО «СамГТУ»  
Отдел типографии и оперативной печати  
443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244