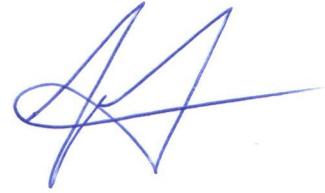


На правах рукописи

УДК 620.194.2: 669.14.018.295

ГРНТИ 81.33.07



КОСТИН СТАНИСЛАВ КОНСТАНТИНОВИЧ

**КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ В МОРСКОЙ ВОДЕ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ
РАЗЛИЧНОГО СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2018 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель: кандидат технических наук
Мушникова Светлана Юрьевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с.
Яковлева Ирина Леонидовна,
главный научный сотрудник лаборатории
физического металловедения ФГБУН Институт
физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

кандидат технических наук, с.н.с.

Харина Ирина Лазаревна
главный научный сотрудник
института материаловедения
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

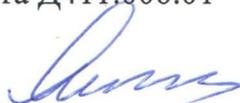
Ведущее предприятие: **Федеральное государственное унитарное
предприятие «Центральный научно-
исследовательский институт черной металлургии
им. И. П. Бардина»**

Защита состоится 25 апреля 2018 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета Д411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке НИЦ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте: <http://dissovet.crismprometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=22>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д411.006.01
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор



Малышевский В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Коррозионное растрескивание (КР) является одним из самых трудно предсказуемых и наиболее опасных видов разрушения, проявляющихся при эксплуатации высокопрочных сталей в морской воде.

Основной объем применяемых в судостроении металлических материалов составляют низко- и среднелегированные стали. При создании и внедрении сталей в 1960-1980-е гг. для строительства объектов морской техники в ходе длительных (до 10 тыс. часов) коррозионно-механических испытаний с постоянной нагрузкой или деформацией были получены данные, позволяющие прогнозировать их сопротивляемость коррозионному растрескиванию в морской воде. Однако, несмотря на разработку специальных мероприятий по предотвращению КР (ограничение уровня прочности сталей, применение технологий переплава и рафинирования стали, создание сжимающих напряжений поверхностной деформацией, контроль уровня катодной поляризации, применение защитных лакокрасочных покрытий), проблема КР и в настоящее время остается актуальной. С одной стороны, это связано с расширением области применения: длительной эксплуатацией судокорпусных конструкций в условиях морского тропического климата с интенсивным биообрастанием и использованием сталей для строительства морских нефтегазодобывающих объектов, потенциально опасных с точки зрения сероводородного растрескивания (СВР). С другой стороны, в последние годы созданы и в настоящее время разрабатываются новые марки судостроительных сталей, отличающиеся от применяемых ранее по химическому составу и усовершенствованной технологией изготовления (переходом от электрошлакового переплава к открытой выплавке с внепечной обработкой, заменой традиционного термоулучшения закалкой с прокатного нагрева или термомеханической обработкой). В связи с этим задача прогнозирования сопротивляемости КР новых материалов на базе применения современных ускоренных методов испытаний требует решения.

Актуальным является и вопрос обеспечения стойкости к КР создаваемой в НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» нержавеющей азотсодержащей аустенитной стали марки 04X20H6Г11M2АФБ судостроительного назначения. Во-первых, это обусловлено склонностью к КР в морской воде разработанных ранее высокомарганцевых сталей аустенитного класса 45Г17Ю3 и 08Г20С2Т. Во-вторых, из анализа научных публикаций известны случаи разрушения вследствие КР конструкций из нержавеющей аустенитных сталей в хлоридных средах при температурах 30÷50 °С, противоречащие общепринятому мнению, что данные стали подвергаются коррозионному растрескиванию только в горячих (более 60 °С), концентрированных растворах хлоридов. Для обеспечения надежной эксплуатации новой азотсодержащей стали необходима не только оценка

сопротивляемости КР в состоянии поставки (после закалки с прокатного нагрева), но и исследование влияния изменения структурно-фазового состава, возникающего при отклонении от заданного химического состава, некорректных режимах термической обработки и дополнительной холодной деформации.

Необходимо также учитывать, что адекватная оценка склонности к КР сталей различных классов применительно к морской среде возможна при создании эффективных методик испытаний, моделирующих критические условия эксплуатации и включающих различные варианты геометрии образцов и схем нагружения.

В связи с изложенным, **целью диссертационной работы** являлась количественная оценка сопротивляемости коррозионному растрескиванию в морской воде высокопрочных сталей различных структурных классов на основе разработки методик ускоренных испытаний.

В соответствии с целью поставлены следующие **основные задачи**:

- исследовать влияние уровня прочности (в интервале $\sigma_{0,2}=370-1200$ МПа) низко- и среднелегированных сталей с различной структурой на сопротивляемость КР в 3,5% NaCl в условиях свободной коррозии и наводораживания при катодной поляризации, а также в сероводородной среде;
- исследовать влияние структурно-фазового состава азотсодержащей стали типа 04X20H6Г11M2АФБ (с δ -ферритом; деформационной структурой, полученной при холодной прокатке; выделениями вторичных фаз после старения) на КР в 3,5 % NaCl (в условиях свободной коррозии и наводораживания при катодной поляризации) и в сероводородной среде, а также поиск среды для выявления склонности к хлоридному КР нержавеющей сталей;
- разработать методики ускоренных испытаний с использованием принципа медленного деформирования в коррозионной среде, эффективно выявляющие склонность к КР;
- разработать рекомендации по выбору схемы нагружения и геометрии образцов при оценке сопротивляемости КР за счет сопоставления результатов испытаний высокопрочных сталей различных структурных классов, проведенных различными методами;
- разработать рекомендации по предотвращению КР высокопрочных сталей в морской воде на основании выявления неблагоприятных структурных состояний и определения пороговой величины уровня предела текучести.

Объектом исследования являлись низко- и среднелегированные судостроительные стали разных классов с пределом текучести 370-1200 МПа, а также азотсодержащая аустенитная нержавеющая сталь типа 04X20H6Г11M2АФБ различного структурно-фазового состава.

В ходе работы автором получены результаты, обладающие **научной новизной**:

1. На основании комплексных исследований стойкости к коррозионному растрескиванию низко- и среднелегированных судостроительных сталей, изготовленных по современным

металлургическим технологиям, в 3,5 % NaCl определены пороговые значения предела текучести, выше которых возникает склонность к КР: 1000 МПа – в условиях свободной коррозии и 750 МПа – в условиях наводораживания при катодной поляризации (потенциал $E=-1,0$ В по нормальному водородному электроду) в области «перезащиты».

2. Установлено, что наличие в азотсодержащей стали аустенитного класса до 30 % δ -феррита или деформационной структуры (без мартенситного превращения), полученной при холодной прокатке (со степенью до 47 %), не вызывает КР в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии. В условиях наводораживания при значительной катодной поляризации присутствие более 0,5 % δ -феррита или деформационной структуры (при степени холодной деформации 26 % и более), а также зернограницных выделений карбонитридов приводит к КР.

3. Разработана методика испытаний на КР при консольном изгибе образцов с трещиной со ступенчато возрастающей нагрузкой, включающая: требования к вырезке и геометрии образцов с учетом расположения надреза для исследования анизотропных материалов; процедуру выращивания усталостных трещин; процедуру проведения испытаний со ступенчато возрастающей нагрузкой; расчет показателя склонности к КР β , в т.ч. при ветвлении трещины в структурно-анизотропном материале; способ наложения катодной поляризации с помощью протекторов различных марок; для нержавеющей сталей предложены испытания в 25 % CaCl₂, как в среде, наиболее эффективно выявляющей склонность к хлоридному КР нержавеющей сталей.

Применяемая в методике критериальная оценка по показателю β подтверждена сопоставлением результатов лабораторных испытаний и исследованием случаев коррозионно-механического разрушения судостроительных конструкций в реальных условиях эксплуатации.

4. Разработана методика оценки склонности к КР при медленном одноосном растяжении гладких цилиндрических образцов, включающая новый подход: определение пороговой температуры хлоридного КР при испытаниях в горячем концентрированном растворе 25 % CaCl₂, а также испытания в условиях наводораживания при катодной поляризации, задаваемой с помощью протекторов. Определены величины скорости деформирования для проведения испытаний: $1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ – для низко- и среднелегированных сталей и $2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ – для нержавеющей сталей.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты исследования влияния уровня прочности низко- и среднелегированных судостроительных сталей различных структурных классов на склонность к КР в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии, наводораживания при катодной поляризации, а также в сероводородной среде;
- результаты исследования взаимосвязи структурно-фазового состава азотсодержащей стали

аустенитного класса (включая наличие δ -феррита, зернограничных карбонитридных включений, деформационной структуры при холодной прокатке) и сопротивляемости КР в 3,5% растворе NaCl в условиях свободной коррозии и наводораживания при катодной поляризации, в концентрированном хлоридном растворе при повышенных температурах, а также в сероводородной среде;

- методики испытаний на КР при консольном изгибе образцов с трещиной при ступенчато возрастающей нагрузке и при медленном растяжении гладких цилиндрических образцов, рекомендации по выбору схемы нагружения и геометрии образцов;
- новый подход определения пороговой температуры хлоридного КР при проведении коррозионно-механических испытаний нержавеющей сталей для морского применения, основанный на одноосном растяжении гладких образцов с малой постоянной скоростью деформации в горячем концентрированном растворе CaCl₂;
- сопоставление результатов испытаний сталей различного уровня прочности и структуры методами консольного изгиба и медленного растяжения.

Практическая значимость:

- создана база экспериментальных данных по влиянию механических свойств судостроительных сталей с различной структурой на стойкость к КР в 3,5 % растворе NaCl и сероводородсодержащей среде, которая может применяться при разработке новых и выборе существующих конструкционных материалов для проектирования и строительства судов и морских сооружений, использовании судостроительных сталей в нефтегазодобывающей промышленности, оценке возможности продления ресурса морской техники с длительным сроком эксплуатации;
- разработанная методика испытаний консольным изгибом при ступенчатом весовом нагружении позволяет значительно сократить трудоемкость и стоимость исследований стойкости к КР за счет использования дешёвых и простых в обслуживании испытательных установок и легко реализуемой процедуры проведения работ по сравнению с методами медленного деформирования образцов с трещиной при непрерывно возрастающей нагрузке. Это обеспечивает проведение большего объема испытаний с получением значительного количества данных о стойкости к КР;
- разработанные в работе методики испытаний на коррозионное растрескивание выпущены в виде нормативно-технической документации (НТД):
 - Руководящий документ РД5.АЕИШ.3635-2013 «Определение склонности сталей и сварных соединений к коррозионному растрескиванию методом консольного изгиба при ступенчатом нагружении. Методика»;
 - Руководящий документ РД5.АЕИШ.3637-2013 «Определение склонности сталей к

коррозионному растрескиванию методом одноосного растяжения при медленном деформировании. Методика».

Методики определения стойкости к КР рекомендованы и внедрены в практику проведения сдаточных и исследовательских испытаний. Разработанная НТД включена в перечень применяемых методик ФГУП «Крыловский государственный научный центр» для проведения аттестационных испытаний (РД5.ИМЯН.218-2014 «Технология проведения аттестационных испытаний металлических корпусных материалов»).

Достоверность результатов обеспечивается большим объемом проведенных экспериментов, результаты которых согласуются с известными данными других исследователей; использованием современного оборудования и актуальных методов исследований; корреляцией результатов ускоренных лабораторных испытаний на КР с коррозионно-механическим разрушением нагруженных судостроительных конструкций, эксплуатирующихся в естественной морской воде.

Личный вклад автора заключается в проведении испытаний методами ступенчатого консольного изгиба и медленного растяжения, включая подготовку образцов и обработку результатов. Автором получена зависимость склонности к КР низко- и среднелегированных сталей различного структурно-фазового состава от уровня прочности с определением порогового значения предела текучести, при котором появляется КР в условиях свободной коррозии и наводораживания при катодной поляризации.

Автором и научным руководителем установлено влияние структурно-фазового состава азотсодержащей стали типа 04X20H6Г11M2АФБ на сопротивляемость КР в различных средах, в т.ч. определены пороговые температуры хлоридного КР. Разработаны методики испытаний на коррозионное растрескивание при консольном изгибе и медленном растяжении и рекомендации по их применению, а также рекомендации по предотвращению КР сталей различного структурно-фазового состава.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: международной научно-практической конференции «Неделя Науки СПбГПУ», 2011 г., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; III международной конференции «Современные требования и металлургические аспекты повышения коррозионной стойкости и других служебных свойств углеродистых и низколегированных сталей», 2012 г., ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», г. Москва; 11, 12 и 13-й конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии», 2012, 2013, 2014г., ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург; II всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТЕСТМАТ-2013», 2013 г., ФГУП «ВИАМ», г. Москва; X российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и

технология неорганических материалов», 2013 г., ИМЕТ РАН, г. Москва; 54-й международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 2013 г., ФГБУН ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург; V конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий», 2014 г., ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», г. Москва; X международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», 2016 г., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург; LVII международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 2016 г., СевГУ, г. Севастополь; XX Менделеевском съезде по общей и прикладной химии, 2016 г., Екатеринбург.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 15 печатных работах, из них 4 статьи в журналах из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 223 страницах машинописного текста, содержит 163 рисунка и 23 таблицы. Список использованной литературы отечественных и зарубежных авторов включает 236 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены сведения об апробации, публикациях, структуре и объеме диссертации, а также о личном вкладе автора.

В первой главе приводится литературный обзор. Обоснована актуальность определения условий возникновения коррозионного растрескивания. Изложены известные представления о механизмах КР. Рассмотрены используемые в настоящее время стали морского применения, как низко- и среднелегированные, так и нержавеющие аустенитные. Рассматривается влияние на сопротивляемость КР структурно-фазового состава стали, формируемого за счет легирования, термической и деформационной обработки, а также внешних параметров среды, таких как температура, кислотность, концентрация раствора и наличие поляризации.

Вторая глава содержит данные об исследуемых в работе сталях. Первая группа материалов включает низко- и среднелегированные стали в состоянии поставки с пределом текучести от 370 до 1200 МПа с ферритно-бейнитной, бейнитно-мартенситной и мартенситной структурой (таблица 1), производимые на российских металлургических предприятиях по современным технологиям и применяемые в отечественном судостроении.

Таблица 1 – Исследуемые в работе низко- и среднелегированные стали

№ п/п	Марка стали	Композиция легирования	Базовые технологии изготовления	$\sigma_{0,2}$, МПа	Структурное состояние	НТД	
1	D40S	10XCHD	Открытая выплавка, ТМО	370	Ферритно-бейнитная структура	ГОСТ Р 52927–2015	
2	E36			390			
3	F40W ^{arc}			480			
4	F40SW	10ГНБ	Открытая выплавка, прокатка, нормализация	430			
5			Открытая выплавка, прокатка, закалка с отпуском	450			
6	X70	10ГБ	Открытая выплавка, ТМО	520	Бейнитно-ферритная структура	Патент 2383633 РФ	
7				540			
8	X80	10Г2Б		570			
9	K70	07Г2		610	Бейнитно-мартенситная структура	Патент 2385350 РФ	
10	X100	07Г2М		615			
11	F500W	10XH2MD	Открытая выплавка, прокатка, закалка с отпуском	500	Отпущенная бейнитно-мартенситная структура	ГОСТ Р 52927–2015	
12				660			
13	F620W	10XH3MD		620			
14	F690W			660			
15	АБ2-III2			680			
16	АБ2-1	09XH2MD		680	Патент 1676276 СССР		
17	АБ2-2	10XH3MD		780		Патент 1676277 РФ	
18	750W	09XH2MD		Открытая выплавка, прокатка, ЗПН с отпуском		750	Патент 2507295 РФ
19	АБ3	09XH3MD		Открытая выплавка, прокатка, закалка с отпуском	800	Отпущенная мартенситная структура	Патент 2397269 РФ
20					900		
21	АБ3К	09XH3MДФ			900		
22					950		
23	АБ3KM	09XH4MДФ			900		
24					950		
25					1000		
26	–	12XH3MДФ	ЭШП, прокатка, закалка с отпуском		1000	–	
27		12XH4MДФ			1000		
28		12XH5MДФ			1060		
29		16XH5MДФ		1200			
30	34XH1MA	Открытая выплавка, горячая деформация, закалка с отпуском	Отпущенная бейнитно-мартенситная структура	600	ГОСТ 4543-2016 ГОСТ 8479-70 ТУ 108.1029-81		
31	38XH3MФА			800			
32	38XA			880			
33	35XH3MФА			880			
34				1030			
35	38XH3MФА			1050		Отпущенная мартенситная структура	
36				1100			
37				1200			
38	25XГСА			1080			

Вторую группу материалов составляют нержавеющие стали с композицией легирования

20%Cr-6%Ni-11%Mn-1,5%Mo-N-V-Nb и различным структурно-фазовым составом (на основе азотсодержащей стали марки 04X20H6Г11М2АФБ, разрабатываемой в НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» для судостроения, патент РФ № 2392348):

- аустенитная сталь со смешанной структурой из фрагментированных и рекристаллизованных областей с пределом текучести $\sigma_{0,2}=755$ МПа, полученная с применением высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО);
- аустенитная сталь с рекристаллизованной структурой и пределом текучести $\sigma_{0,2}=460$ МПа, после аустенитизации;
- аустенитная сталь с δ -ферритом в количестве от 0 до 30 % и пределом текучести $\sigma_{0,2}=390-450$ МПа, полученная при экспериментальных плавках с варьированием концентрации азота от 0,01 до 0,50 % (масс.) на основе базового состава стали марки 04X20H6Г11М2АФБ;
- сенсibilизированная аустенитная сталь с содержанием углерода, вдвое превышающим марочный (0,09 %), с большим количеством зернограницных карбидов и нитридов и пределом текучести $\sigma_{0,2}=468-477$ МПа после старения при 700 °С в течение 2 и 10 часов;
- аустенитная сталь с деформационной структурой и пределом текучести $\sigma_{0,2}=950-1330$ МПа, полученная при холодной прокатке со степенью обжатия от 15 до 47 %.

Структуру, фазовый состав сталей изучали следующими методами: металлографический анализ осуществлялся с применением светового инвертированного металлографического микроскопа AxioObserver (Zeiss), электронно-микроструктурные исследования – на просвечивающем микроскопе Tescan G2 30 S-TWIN с ускоряющим напряжением 200 кВ, фраттографические исследования проводили на растровых электронных микроскопах Quanta 200 с системой PEGASUS, Philips SEM-535 и Stereoscan-150 при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Определение стандартных механических свойств при растяжении проводили в соответствии с рекомендациями ГОСТ 1497-84 на электромеханической универсальной испытательной машине ZWICK/ROELL Z250. Определение ударной вязкости осуществлялось на маятниковом копре «Требел», 2123 КМК по ГОСТ 9454-78. Измерение содержания ферритной фазы в нержавеющей аустенитных сталях проводилось магнитным методом с помощью ферритометра объемного типа МК-1Ф и рентгеноструктурным анализом на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV.

В качестве основных методов испытаний на коррозионное растрескивание были выбраны: испытания при консольном изгибе со ступенчато возрастающей нагрузкой образцов с предварительно выращенной трещиной и одноосное растяжение гладких цилиндрических образцов с малой постоянной скоростью деформирования, с помощью которых выполнена оценка сопротивляемости КР практически всех исследуемых сталей.

1. Разработка методики испытаний при консольном изгибе. Первоначально подход, основанный на принципах линейной механики разрушения и предусматривающий последовательное ступенчатое нагружение малогабаритных образцов типа Шарпи (10x11x60 мм) с трещиной при консольном изгибе, был предложен коллективом коррозионистов ЦНИИ КМ «Прометей» под руководством А.А. Харькова для высокопрочных судостроительных сталей с пределом текучести более 800 МПа. Для адаптации подхода к вязким сталям в части получения на образцах острых усталостных трещин, радиус закругления у вершины надреза был уменьшен с 0,25 мм до 0,10 мм. Усовершенствована процедура выращивания усталостных трещин на вибрационной машине RUMUL Cracktronic для сталей различных классов. Процесс контролировался двумя параметрами: изгибающим моментом M и падением рабочей частоты Δf в процессе снижения собственной частоты колебаний образца из-за увеличения его податливости. Трещина выращивалась по программе, со ступенчато уменьшающейся на каждом шаге величиной изгибающего момента. Также для распространения испытаний консольным изгибом на более вязкие материалы были модернизированы рычажные установки, обеспечивающие достижение больших значений прогиба образца в ходе эксперимента.

Последовательное ступенчатое нагружение образцов консольным изгибом осуществлялось на рычажных установках приращением груза весом 1 кг. Каждое очередное догружение осуществлялось при условии, что в течение часа не происходило увеличения прогиба в результате предыдущего нагружения, т.е. после полного затухания процессов ползучести. Таким образом, на каждой ступени нагружения этап собственно нагружения являлся только моментом прироста напряжения в образце, а накопление повреждений, в основном, происходило при постоянной нагрузке. В ходе испытаний записывалась нагрузка P и установившийся прогиб образца f , на основании которых строилась диаграмма « $P - f$ ». Временная база испытаний составляла 720 часов.

В качестве основной испытательной среды выбран 3,5 % раствор NaCl – модель морской воды, по солености соответствующий среднему составу вод Мирового Океана. Для моделирования условий интенсивного наводораживания при катодной поляризации в области «перезащиты» взамен ранее применяемого и постоянно работающего потенциостата устанавливался протектор из магниевых сплавов марки «МП», соединяемый с образцом через элемент сопротивления и обеспечивающий значение потенциала минус 1,00 В по нормальному водородному электроду (н.в.э.), а также наличие продуктов коррозии протекторного сплава в испытательной ячейке подобно реальным условиям эксплуатации. Для сравнения испытания проводили и в инертной среде – на воздухе. После разрушения образца производился расчет разрушающих напряжений в среде σ_{SCC} и на воздухе σ_C в соответствии со стандартом ISO 7539-6:2011. Показатель склонности к КР определялся как отношение разрушающих напряжений

$\beta = \sigma_{SCC} / \sigma_C$. Принималось, что сталь склонна к КР при значении $\beta \leq 0,85$.

2. Разработка методики испытаний на КР при одноосном растяжении гладких цилиндрических образцов с малой постоянной скоростью деформирования (SSRT). Разработка проводилась в соответствии с зарубежными и отечественными стандартами (ГОСТ 9.901.4-89, ISO 7539-7, ASTM G 129-00) и согласно известным данным из научных публикаций Паркинса и Скалли. По результатам экспериментов выбраны рациональные значения относительной скорости деформации, позволяющие полноценно развиваться и протекать коррозионным процессам: для низко- и среднелегированных сталей, подвергающихся общей коррозии – $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ и для нержавеющей сталей, обладающих способностью пассивироваться – в 5 раз медленнее, $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$.

Для оценки склонности к КР выбран комплексный подход, учитывающий: изменение характеристик пластичности в среде по отношению к воздуху ψ_{SCC} / ψ_C и δ_{SCC} / δ_C , различия хода кривых диаграмм деформирования в коррозионной среде и на воздухе, наличие визуально наблюдаемых трещин, изменение вида излома образца после испытаний в коррозионной среде.

С учетом случаев коррозионно-механического разрушения конструкций крытых бассейнов и аквапарков, изготовленных из нержавеющей аустенитных хромоникелевых сталей и подвергающихся воздействию концентрированных хлорсодержащих растворов при повышенных температурах, актуальной является оценка стойкости к КР в подобных условиях. Кроме того, известно о фактах хлоридного коррозионного растрескивания нержавеющей сталей, применяемых в еще более жестких условиях эксплуатации – в опреснительных установках и теплообменниках. Поэтому предложено проведение испытаний при повышенных температурах с определением пороговой температуры для выявления чувствительности к КР различных вариантов исследуемой азотсодержащей нержавеющей стали. Для таких высокотемпературных коррозионно-механических испытаний по результатам предварительных экспериментов при температуре $90 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ в концентрированных растворах (20, 25, 35 %) хлоридов натрия, кальция и магния (NaCl , CaCl_2 и MgCl_2) осуществлен выбор наиболее подходящей испытательной среды – 25 % CaCl_2 . Показано, что раствор хлорида кальция выбранной концентрации достаточно эффективно выявляет склонность к КР стали типа 04X20H6Г11М2АФБ с различным структурно-фазовым составом, т.к. соль CaCl_2 обладает большей растворимостью в воде при температурах от комнатной до $100 \text{ }^\circ\text{C}$, чем NaCl и MgCl_2 , т.е. способна образовывать более концентрированные растворы хлоридов, потенциально опасные для КР. Кроме того, благодаря гидролизу хлорида кальция значение pH снижается, т.е. наблюдается подкисление раствора, также способствующее растрескиванию. Разработанные в работе методики испытаний оформлены в виде нормативно-технической документации.

Дополнительно (для сравнения) при испытаниях на КР применялись следующие схемы нагружения и типы образцов: консольный изгиб малогабаритных образцов с трещиной с постоянной нагрузкой; трехточечный изгиб полнотолщинных образцов с трещиной; растяжение с постоянной нагрузкой и с медленным деформированием полнотолщинных образцов с трещиной; растяжение с постоянной нагрузкой гладких цилиндрических образцов. В зависимости от коррозионно-механических свойств сталей, способа нагружения, вида образцов, применяемых сред и испытательного оборудования продолжительность испытаний составляла от 8 до 3000 тыс. часов. Испытания на сероводородное (или сульфидное) растрескивание (СВР) проводились в соответствии со стандартом NACE TM 0177-2016, методом А.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований склонности низко- и среднелегированных сталей к КР в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии, наводораживании при катодной поляризации и в сероводородной среде. При испытаниях методом консольного изгиба при ступенчато возрастающей нагрузке 38-ми вариантов сталей (рисунок 1) установлено, что исследуемые стали с ферритно-бейнитной, бейнитно-мартенситной и мартенситной структурой и соответствующими значениями предела текучести в интервале от 370 до 1000 МПа устойчивы к КР в 3,5 % NaCl (области «1-3» на рисунке 1).

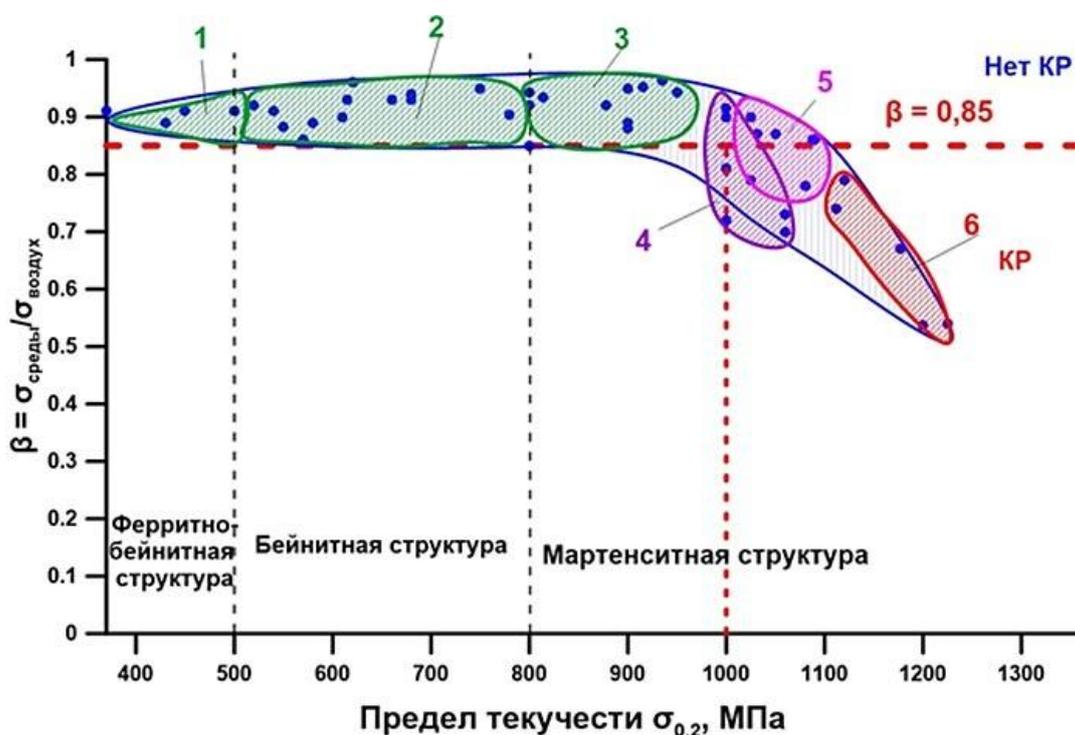


Рисунок 1 – Зависимость показателя склонности к КР β , полученного при испытании в 3,5% NaCl методом ступенчатого консольного изгиба, от предела текучести:

1–ферритно-бейнитные низколегированные стали, 2–бейнитно-мартенситные среднелегированные стали; 3, 6–мартенситные легированные стали; 4–низкоуглеродистые мартенситные стали; 5–среднеуглеродистые мартенситные стали

Появление склонности к КР в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии обнаружено в

мартенситных сталях. При этом в низкоуглеродистых среднелегированных сталях с мартенситной структурой значение β может снижаться до $\beta=0,70-0,81$ при достижении величины предела текучести 1000 МПа и выше (в области «4» на рисунке 1, рисунок 2 б). Среднеуглеродистые мартенситные стали типа 38ХНЗМФА начинают подвергаться КР ($\beta=0,79$) также при превышении значения предела текучести $\sigma_{0,2}=1000$ МПа (область «5» на рисунке 1). Наибольшую склонность к коррозионному растрескиванию ($\beta=0,40-0,50$) показали мартенситные низко- и среднеуглеродистые легированные стали с пределом текучести 1200 МПа (область «б» на рисунке 1).

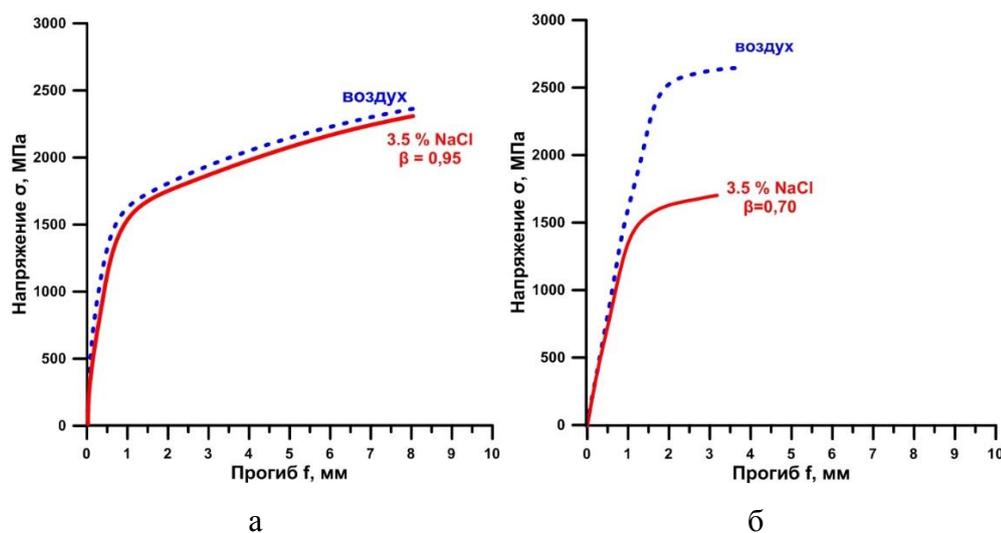


Рисунок 2 –
 Диаграммы деформирования при консольном изгибе мартенситных сталей 09ХН4МДФ с $\sigma_{0,2}=950$ МПа (а) 12ХН5МДФ с $\sigma_{0,2}=1060$ МПа (б)

Фрактографическими исследованиями показано, что характер изломов образцов мартенситных сталей, подвергающихся КР в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии, зависит от уровня прочности: при $\sigma_{0,2}=1000-1100$ МПа разрушение смешанное, с присутствием участков транскристаллитного квазискола и зернограничного разрушения. При достижении $\sigma_{0,2}=1200$ МПа для низкоуглеродистой мартенситной стали 16ХН5МДФ характер разрушения остается смешанным, а для среднеуглеродистой стали 38ХНЗМФА характерно хрупкое зернограничное разрушение (рисунок 3).

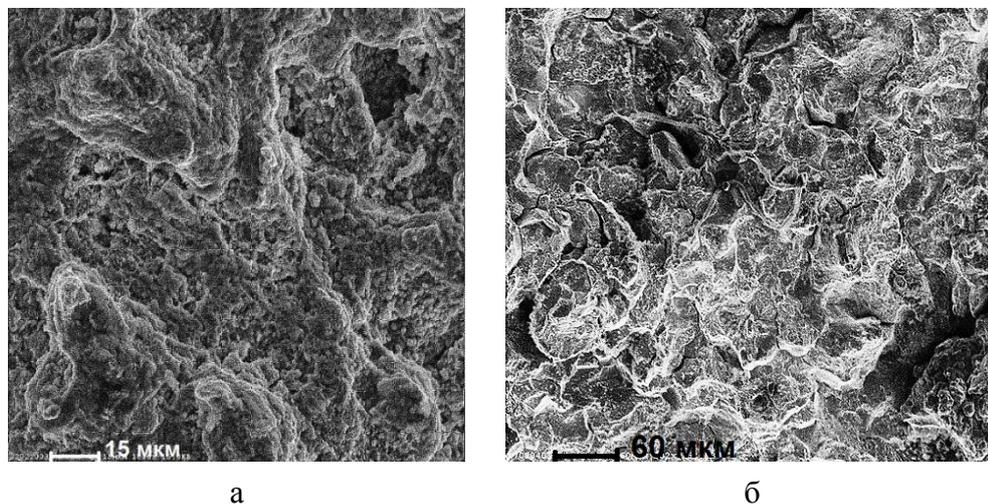
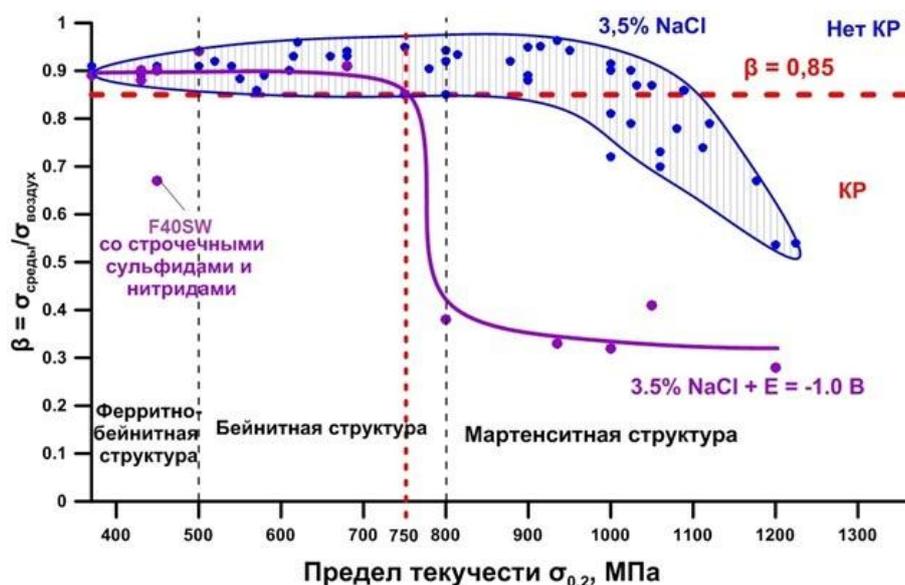


Рисунок 3 –
 Фрактографические изображения изломов после испытаний в 3,5 % NaCl образцов стали 16ХН5МДФ (а) и 38ХНЗМФА (б) с $\sigma_{0,2}=1200$ МПа

Установлено, что в условиях наводораживания при катодной поляризации ($E = -1,0$ В по н.в.э.) участок кривой, характерный появлению склонности к КР ($\beta = 0,30-0,40$), сдвигается в область сталей с бейнитно-мартенситной структурой, содержащих 15-20 % мартенсита, и меньшими значениями предела текучести (750-800 МПа) (рисунок 4). В низкоуглеродистых среднелегированных сталях со структурой реечного мартенсита при значении предела текучести 1200 МПа характер разрушения остается смешанным с присутствием участков транскристаллитного квазискола и зернограничного разрушения. Для среднеуглеродистых мартенситных сталей с пределом текучести 1050-1200 МПа характерно преимущественно зернограничное разрушение с элементами микроскола.



Выявлено снижение сопротивляемости КР в условиях наводораживания при катодной поляризации ($E = -1,0$ В) судостроительной стали среднего уровня прочности ($\sigma_{0,2} = 450$ МПа), относящейся к группе устойчивых к КР материалов с ферритно-бейнитной структурой, но отличающейся наличием полосчатости из строчечных сульфидов и нитридов (рисунок 4).

В связи с более жесткими условиями испытаний в сероводородной среде при наводораживании по сравнению с испытаниями при катодной поляризации за счет интенсификации анодного растворения склонность к СВР проявляется при меньшем уровне прочности ($\sigma_{0,2} = 600$ МПа) для среднеуглеродистой стали 34ХН1МА с бейнитно-мартенситной структурой (рисунок 5). Разрушение при этом хрупкое межзеренное. Низкоуглеродистые среднелегированные стали начинают подвергаться СВР при достижении предела текучести 740 МПа и формировании бейнитно-мартенситной структуры.

Четвертая глава содержит результаты исследований стойкости к КР аустенитной азотсодержащей стали типа 04Х20Н6Г11М2АФБ в различном структурно-фазовом состоянии.

Показано, что указанная сталь с содержанием азота 0,43-0,47 % после

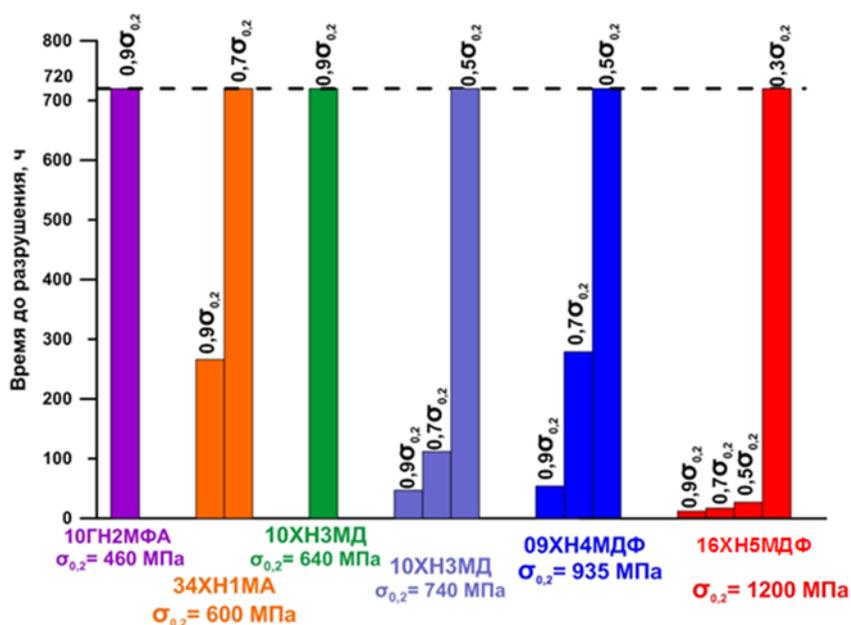


Рисунок 5 – Диаграмма сероводородного растрескивания низко- и среднелегированных сталей

незначительное снижение пластичности. Сталь после ВТМО обладает структурой, из рекристаллизованных и деформированных аустенитных зерен, дислокационные скопления и нитридные фазы которой восприимчивы к наводороживанию, а также могут служить очагами локальной коррозии. Это приводит к незначительной склонности стали после ВТМО к КР в 3,5 % NaCl в условиях наводороживания при катодной поляризации (рисунок 6). В 25 % растворе CaCl₂ сталь со смешанной структурой склонна к КР только при температуре 90°C.

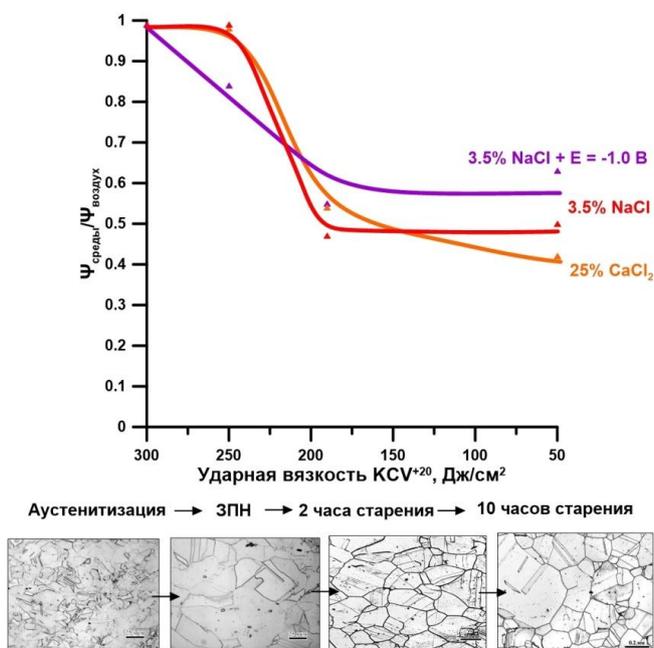


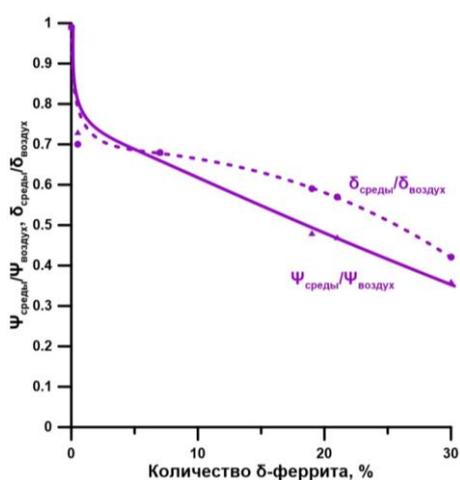
Рисунок 6 – Взаимосвязь ударной вязкости азотсодержащей стали после различных вариантов термической обработки со стойкостью к КР в различных средах при медленном растяжении

высокотемпературной аустенитизации, имеющая рекристаллизованную аустенитную структуру, устойчива к КР в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии (рисунок 6), наводороживании при сильной катодной поляризации ($E = -1,0$ В), а также в концентрированном растворе CaCl₂ вплоть до температуры 90 °С, при которой наблюдается

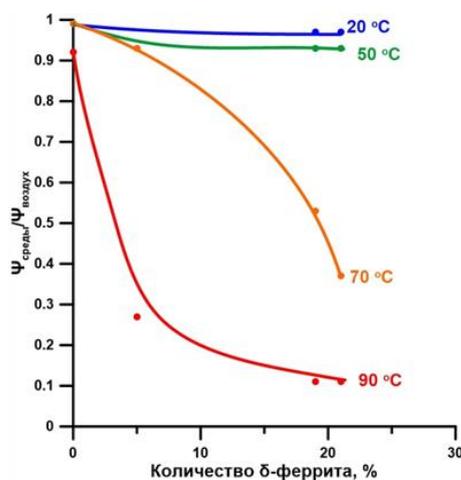
Сенсибилизированная старением при 700 °С сталь с повышенным до 0,09 % содержанием углерода проявляет склонность к межкристаллитному коррозионному растрескиванию (МККР) исследуемой стали в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии (рисунок 6), а также в 25 % CaCl₂ при комнатной температуре. Катодная поляризация с помощью применяемых в судостроении протекторов не предотвращает КР сенсибилизированных сталей, а, наоборот, ускоряет его. Трещины образуются на зернограничных скоплениях нитридов и карбонитридов и распространяются по границам зерен.

В условиях наводораживания в 3,5 % NaCl при катодной поляризации ($E = -1,0$ В) появление в структуре аустенитной азотсодержащей стали 0,5 % и более δ -феррита приводит к КР (рисунок 7 а) с транскристаллитным ростом трещин по ферритной фазе.

В 25 % CaCl₂ также проявляется отрицательное влияние ферритной фазы с зарождением коррозионных трещин в аустените: сталь с 7-30 % δ -феррита подвергается КР уже при 70 °С, а при 90 °С КР характерно для всех сплавов, содержащих от 5 до 30 % δ -феррита (рисунок 7 б). Образование и рост коррозионных трещин в аустените в двухфазных составах обусловлены пониженной стойкостью к локальной коррозии γ -фазы из-за обеднения ферритообразующими элементами – хромом и молибденом (индекс PRE снижается с 32 до ~23 единиц).



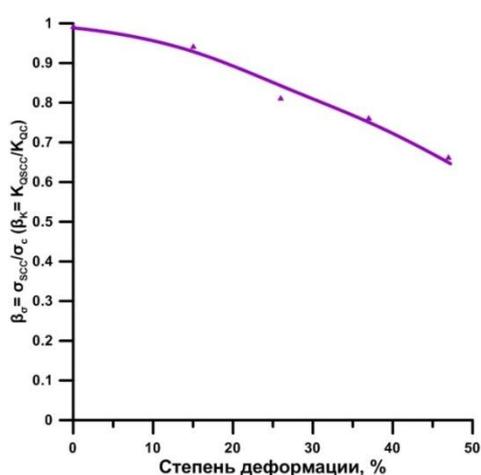
а



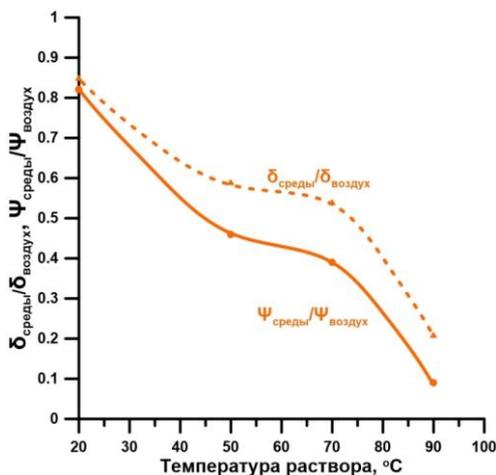
б

Рисунок 7 – Влияние содержания δ -феррита в азотсодержащей стали на сопротивляемость КР при медленном растяжении в 3,5 % NaCl в условиях наводораживания при катодной поляризации $E = -1,0$ В (а) и при повышенных температурах в 25% CaCl₂ (б)

Склонность к КР холоднокатаной азотсодержащей стали с полностью аустенитной деформационной структурой обусловлена высоким уровнем предела текучести и повышенной плотностью дислокаций, определяющей восприимчивость к проникновению и удержанию водорода при катодной поляризации (рисунок 8 а) и облегчению протекания локальной коррозии в горячих растворах (рисунок 8 б).



а



б

Рисунок 8 – Влияние степени холодной деформации на склонность к КР холоднокатаной стали в 3,5 % NaCl при $E = -1,0$ В (а) и влияние температуры раствора 25 % CaCl₂ на КР наклепанной азотсодержащей стали (б)

Установлено, что наводороживание при значительной катодной поляризации ($E=-1,0$ В) приводит к КР уже при степени холодной деформации 26 %, трещины растут транскристаллитно. Склонность к хлоридному растрескиванию в концентрированном растворе 25 % CaCl_2 холоднокатаной стали проявляется при 50 °С и выше, трещины в таких условиях появляются из питтингов и развиваются транскристаллитно.

В сероводородной среде азотсодержащая сталь разрушается в сенсibilизированном состоянии после 10 часов старения, а также при наличии деформационной структуры после холодной прокатки со степенью обжатия 47 % (рисунок 9).

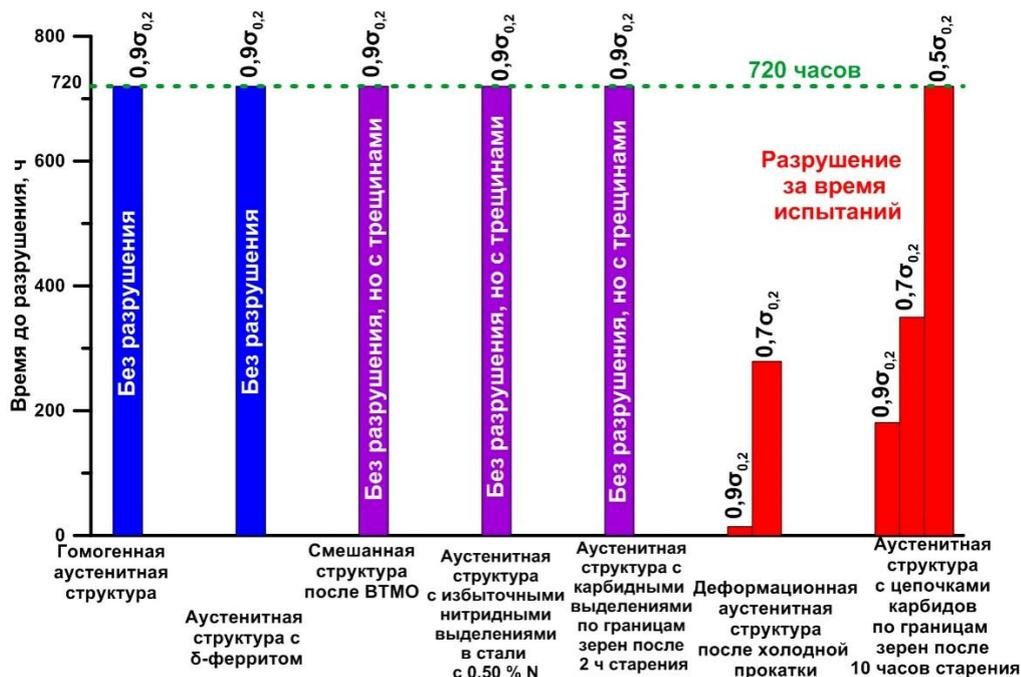


Рисунок 9 – Сульфидное растрескивание азотсодержащей стали различного структурно-фазового состава

Сенсibilизация после 2 часов старения приводит к незначительной склонности к сульфидному растрескиванию, выраженной в образовании поверхностных трещин при отсутствии разрушения за время испытаний. Аналогичная ситуация наблюдается для стали со смешанной частично рекристаллизованной структурой после VTMO. Сталь с полностью рекристаллизованной аустенитной структурой не склонна к сульфидному растрескиванию, даже при наличии δ-феррита.

В пятой главе на основе обобщения и сопоставления результатов, полученных при испытаниях на КР всех исследуемых сталей, разработаны рекомендации по выбору методов испытаний на КР и геометрии образцов с учетом структурно-фазового состава материалов.

Применительно к низко- и среднелегированным материалам на примере стали типа 16ХН5МДФ ($\sigma_{0,2}=1200$ МПа) выполнен сравнительный анализ различных методов выявления склонности к КР в 3,5 % NaCl (в условиях свободной коррозии) на временной базе от 8 до 3000 часов, продемонстрировавший:

- эффективность применения образцов с трещиной по сравнению с гладкими образцами;

- предпочтительность испытаний при изгибе (консольном или трехточечном) благодаря возможности создания более жесткого напряженного состояния в вершине трещины;
- необходимость продолжительности испытаний не менее 100 часов для осуществления протекания коррозионных реакций в вершине трещины;
- незначительность влияния размеров образцов с трещиной (полнотолщинных или малогабаритных) на оценку склонности к КР, приводящая только к изменению процедуры проведения расчета параметра β через напряжения σ , а не через коэффициенты интенсивности напряжений (КИН).

По результатам экспериментов предложен ступенчатый механизм КР высокопрочных среднелегированных сталей в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии (рисунок 10), основанный на попеременном протекании двух стадий роста трещины: электрохимической (растворения и гидролиза) и физико-механической (адсорбции водорода и разрушения наводороженного металла).

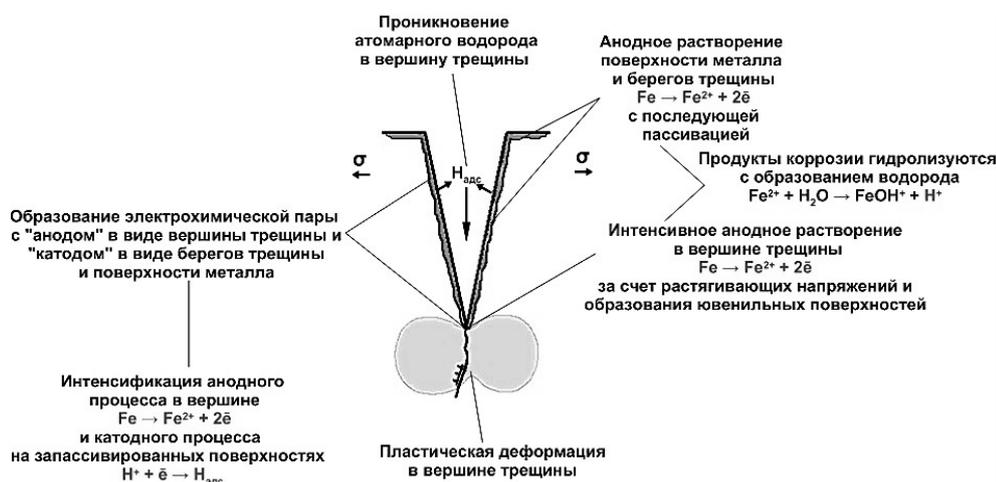


Рисунок 10 –
 Схема ступенчатого механизма КР высокопрочных низко- и среднелегированных сталей в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии

Механизм полностью согласуется с экспериментальными данными, полученными для среднелегированных сталей и свидетельствующими о большей эффективности методики консольного изгиба образцов с трещиной при ступенчато возрастающей нагрузке по сравнению с методикой медленного растяжения гладких образцов, т.к. в первом случае осуществляется реализация всех необходимых для КР условий: локализация анодного растворения с возникновением высоконапряженного состояния в вершине трещины, образование гальванической пары между вершиной и берегами трещины, протекание процессов гидролиза продуктов коррозии, вызывающего подкисление раствора в щелевом зазоре трещины и растворение металла с водородной деполяризацией, выделение и проникновение атомарного водорода в металл (рисунок 10).

Корректность результатов, получаемых при испытании методом консольного изгиба при ступенчато возрастающей нагрузке, и численное значение критерия $\beta > 0,85$ подтверждены при проведении исследований металла высокопрочных сталей, проявивших склонность к КР при

эксплуатации в составе нагруженных конструкций в естественной морской воде.

Показано, что при сильной катодной поляризации низко- и среднелегированных сталей, в отсутствие анодного растворения, происходит наводороживание напряженного металла вершины трещины, приводящее к растрескиванию по водородному механизму.

В отношении нержавеющей азотсодержащей стали аустенитного класса в зависимости от структурно-фазового состава рекомендовано оценивать склонность к КР следующим образом:

- для стали с полностью аустенитной структурой, после различных режимов термической и термомеханической обработки, наиболее применим метод медленного растяжения, как при наводороживании, так и в условиях питтингообразования в горячем 25 % CaCl_2 ;
- для стали, содержащей δ -феррит, метод консольного изгиба показателен в концентрированном хлоридном растворе при комнатной температуре, а при катодной «перезащите» с наводороживанием предпочтительно медленное растяжение;
- для холоднокатаной стали следует применять консольный изгиб образцов с трещиной, т.к. медленное растяжение не выявляет предрасположенности к данному виду разрушения независимо от среды и степени деформации.

Установлено на примере нержавеющей аустенитной стали, что при анизотропной по толщине листа структуре (вытянутых зерен ферритной фазы или деформационной структуры) (рисунок 11) для выявления склонности к КР необходимо предусматривать изготовление двух типов образцов (с трещиной по нормали и по направлению прокатки) и при ветвлении трещины выполнять формальный расчет *КИН* методом конечных элементов в упругой постановке с помощью дополнительно рассчитанной тарировочной функции.

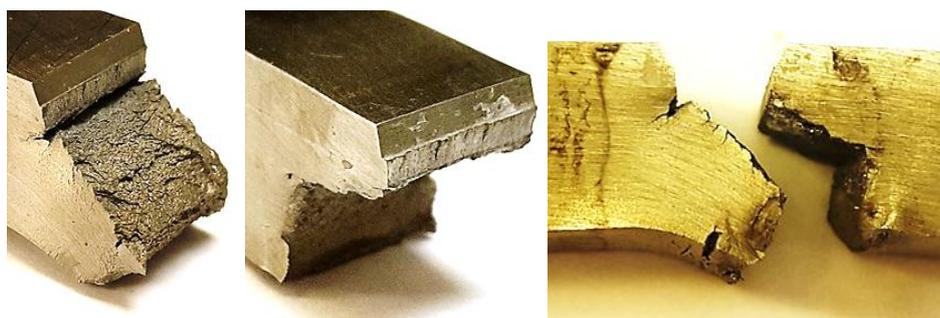


Рисунок 11 –
Ветвление трещины в образцах азотсодержащей стали с ориентированным по длине листа δ -ферритом

По результатам сравнительного анализа данных по КР в различных средах, фрактографических исследований изломов образцов, металлографического изучения шлифов вблизи коррозионных трещин предложены и экспериментально обоснованы механизмы КР азотсодержащей стали с различным структурно-фазовым составом:

- аустенитная сталь в горячем концентрированном хлоридном растворе при воздействии хлор-ионов и механического разрыва пассивной пленки подвергается питтинговой коррозии. Вершина образованного очага служит концентратором напряжений, в котором за счет

растягивающих напряжений образуется трещина, продвигающаяся на определенную глубину, оголяя металл и провоцируя образование нового питтинга;

- наводораживание при катодной поляризации приводит к образованию трещин на зернограницных включениях нитридов, присутствующих в азотсодержащей стали после ЗПН и служащих водородными «ловушками»;
- при наличии δ -феррита при катодной поляризации разрушение идет по водородному механизму с образованием и ростом коррозионных трещин в ферритной фазе, в значительно большей степени, чем аустенит, склонной к охрупчиванию при наводораживании (рисунок 12 б). В концентрированном горячем хлоридном растворе КР развивается по механизму локального анодного растворения: инициирование и рост трещин происходит в аустените, характеризующемся пониженным индексом питтингостойкости PRE по сравнению с δ -ферритом (рисунок 12 в).

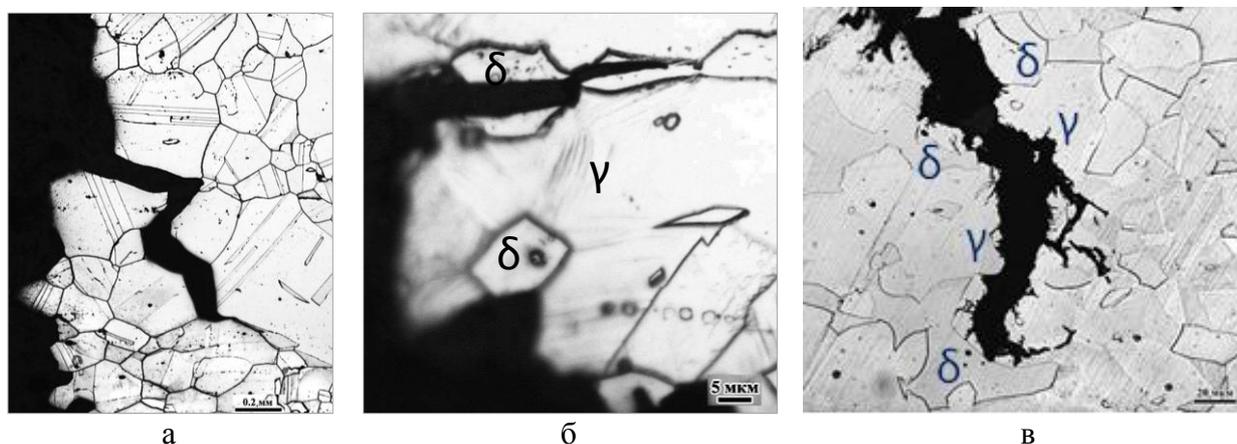


Рисунок 12 – Характер продвижения трещин в образцах азотсодержащей стали в сенсibilизированном состоянии (а) и с δ -ферритом при наводораживании (б) и в горячем концентрированном хлоридном растворе (в)

- сенсibilизированный металл разрушается за счет образования межкристаллитных трещин во всех рассматриваемых в работе условиях испытаний (рисунок 12 а).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Низко- и среднелегированные стали с ферритно-бейнитной, бейнитно-мартенситной и мартенситной структурой и пределом текучести от 370 до 1000 МПа устойчивы к КР в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии. Среднелегированные мартенситные стали с пределом текучести 1000 МПа и выше подвергаются КР.
2. Механизм КР в 3,5 % NaCl в условиях свободной коррозии низко- и среднелегированных сталей – ступенчатый, с поочередной реализацией двух стадий роста трещины: растворения металла с гидролизом коррозионных продуктов и механического разрушения

наводороженного металла. Необходимым условием возникновения КР является накопление продуктов коррозии вблизи концентратора напряжений.

3. Установлено пороговое значение предела текучести $\sigma_{0,2}^{\text{порог}}=750$ МПа, приводящее к коррозионному растрескиванию по водородному механизму при катодной поляризации в области «перезащиты» ($E=-1,0$ В) среднелегированных бейнитно-мартенситных сталей, содержащих не менее 15-20 % отпущенного мартенсита. Наличие полосчатости из строчечных сульфидов и нитридов вызывает КР низколегированных сталей с пределом текучести $\sigma_{0,2}=450$ МПа и ферритно-бейнитной структурой.
4. Выявлены особенности структурно-фазового состава азотсодержащей стали типа 04X20H6Г11M2АФБ, отрицательно влияющие на стойкость к КР:
 - сталь с сенсibilизированной аустенитной структурой с зернограничными выделениями нитридов Cr_2N , карбонитридов и карбидов Me_{23}C_6 и $(\text{V},\text{Nb})\text{C}$ проявляет склонность к КР в 3,5 % растворе NaCl в условиях свободной коррозии, наводороживании при катодной поляризации ($E \leq -0,65$ В по н.в.э.), а также в концентрированном растворе 25 % CaCl_2 при комнатной температуре;
 - наличие 0,5 % и более δ -феррита в стали приводит к чувствительности к КР при наводороживании ($E=-1,0$ В), которая возрастает с увеличением количества ферритной фазы; сопротивляемость хлоридному КР в 25 % CaCl_2 также зависит от доли δ -феррита: при 5-7 % КР наблюдается при 90 °С, при 19-21 % – при 70 °С;
 - сталь в холоднокатаном состоянии при степени деформации 26 % и более проявляет склонность к КР в условиях наводороживании при катодной поляризации в области «перезащиты», а при степени холодной деформации 47 % подвергается КР в концентрированном растворе 25 % CaCl_2 при 50 °С;
 - сталь, полученная при ВТМО, со смешанной структурой из деформированных и рекристаллизованных зерен и включениями частиц Cr_2N по телу и границам аустенитного зерна не устойчива к КР в 25 % CaCl_2 при 90 °С и в 3,5 % NaCl при наводороживании катодной поляризацией в области «перезащиты»;
 - сталь с рекристаллизованной структурой устойчива к КР в исследованных средах (в 3,5% NaCl , при наводороживании катодной поляризацией и в горячих растворах CaCl_2).
5. Показано, что механизм КР зависит от структурно-фазового состава азотсодержащей стали и коррозионной среды:
 - для сенсibilизированной стали в хлоридных растворах характерно межкристаллитное КР, обусловленное анодным растворением обедненных хромом границ зерен;
 - в концентрированном горячем растворе CaCl_2 механизм КР связан с ростом трещин из

питтингов, первоначально образовавшихся на стали при наличии скоплений дислокаций (в холоднодеформированном состоянии), карбонитридов (в стали после ВТМО), различия в питтингостойкости отдельных фаз (в стали с δ -ферритом);

- при значительной катодной поляризации ($E=-1,0$ В) в 3,5 % растворе NaCl во всех отмеченных случаях механизм КР – водородный, причем степень чувствительности к наводораживанию зависит от насыщенности структуры «водородными ловушками» (частицами карбонитридной фазы и δ -ферритом).

6. Установлено, что сопротивляемость КР практически всех исследуемых сталей в сероводородной среде ниже, чем при испытании с наводораживанием при катодной поляризации в области «перезащиты». Сульфидному коррозионному растрескиванию подвержены среднелегированные стали, обладающие бейнитно-мартенситной структурой с пределом текучести на уровне 600-740 МПа и выше, а также азотсодержащая сталь с сенсibilизированной структурой, в холоднокатаном состоянии и после ЗПН. Повышенная склонность к КР обусловлена высокой агрессивностью подкисленного раствора сероводорода, способствующей образованию сульфидной пленки на поверхности металла и большей локализации коррозионных процессов, приводящих к трещинообразованию.
7. Разработаны методики ускоренных испытаний сталей различных классов на коррозионное растрескивание: на основе применения консольного изгиба со ступенчато возрастающей нагрузкой образцов с трещиной и медленного растяжения гладких цилиндрических образцов. Модернизировано испытательное оборудование и выпущена соответствующая нормативно-техническая документация, включенная в правила проведения аттестационных испытаний Крыловского ГНЦ. При проведении исследований металла высокопрочных сталей, показавших склонность к растрескиванию при эксплуатации конструкций в естественной морской воде, подтверждена корректность результатов, получаемых при лабораторных испытаниях методом консольного изгиба при ступенчато возрастающей нагрузке и значение критерия $\beta > 0,85$.
8. Разработаны рекомендации по выбору методик испытаний на КР, включая выбор схемы нагружения и геометрии образцов, в зависимости от структуры стали:
 - для низко- и среднелегированных сталей, а также для азотсодержащей стали в холоднокатаном состоянии рекомендуются испытания при консольном изгибе со ступенчато возрастающей нагрузкой образцов с трещиной;
 - при наличии в стали анизотропной по толщине листа структуры (ориентированные по направлению проката δ -ферритные зерна или структура вытянутых аустенитных зерен, после холодной деформации) рекомендуется проведение испытаний на КР двух типов образцов: с трещиной по нормали и по направлению прокатки.

- для азотсодержащей нержавеющей стали после ВТМО, в состаренном состоянии, а также при наличии δ -феррита целесообразны испытания при медленном одноосном растяжении гладких образцов. Исследование склонности к хлоридному КР в 25 % CaCl_2 при повышенных температурах следует проводить для нержавеющей аустенитных сталей в любом структурно-фазовом состоянии.
9. Разработаны рекомендации по предотвращению КР высокопрочных сталей в морской воде:
- для низко- и среднелегированных сталей необходимо ограничение предела текучести не более 1000 МПа, а также отсутствие полосчатости из строчечных сульфидов, нитридов и других неметаллических включений независимо от уровня прочности;
 - для азотсодержащей стали следует исключать возможность применения материала с сенсibilизированной структурой из-за возможности КР даже в условиях электрохимической защиты, а также ограничивать уровень катодной поляризации при использовании стали в холоднокатаном состоянии или с δ -ферритом;
 - в условиях воздействия концентрированного хлоридного раствора азотсодержащую сталь после ТМО не следует применять при температуре выше 70 °С, а материал в холоднокатаном или двухфазном состоянии с δ -ферритом при температуре выше 50 °С;
 - необходим контроль металла сварных соединений с целью предотвращения формирования структурных состояний, повышающих склонность к КР.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Филиппов Ю.И., Сагарадзе В.В., Завалишин В.А., Печеркина Н.Л., Катаева Н.В., Мушникова С.Ю., **Костин С.К.**, Калинин Г.Ю. Акустически регистрируемое коррозионное растрескивание под напряжением азотистых аустенитных сталей // **Физика металлов и металловедение**. – 2014. – т. 115, № 6 – с. 624-637.
2. Мушникова С.Ю., Сагарадзе В.В., Филиппов Ю.И., Катаева Н.В., Завалишин В.А., Малышевский В.А., Калинин Г.Ю., **Костин С.К.** Сравнительный анализ коррозионного растрескивания аустенитных сталей с разным содержанием азота в хлоридных и водородсодержащих средах // **Физика металлов и металловедение**. – 2015. – т. 116, № 6. – с. 663-671.
3. Сагарадзе В.В., Катаева Н.В., Мушникова С.Ю., Калинин Г.Ю., Харьков О.А., **Костин С.К.**, Парменова О.Н. Структура и свойства плакированной двухслойной стали для корпусов арктических судов // **Вопросы материаловедения**. – 2015. – т. 83, №3. – с.14-25.
4. Мушникова С.Ю., **Костин С.К.**, Сагарадзе В.В., Катаева Н.В. Структура, свойства и сопротивление коррозионному растрескиванию азотсодержащей аустенитной стали,

упрочненной термомеханической обработкой // **Физика металлов и металловедение.** – 2017. – т. 118, № 11. – с. 1223-1235.

5. **Костин С.К.**, Мушникова С.Ю. Влияние содержания азота на механические свойства и структуру аустенитной нержавеющей азотсодержащей стали / XL Неделя науки СПбГПУ: материалы межд. научно-практ. конф.. Ч. VI. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. –2011.– с.80-81.
6. **Костин С.К.** Влияние содержания азота и температуры закалки на структуру и свойства аустенитной нержавеющей стали 04X20H6Г11M2АФБ / Труды конф. молодых учёных и специалистов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» 20-22 июня 2012 г. – СПб.: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». – 2013. – с. 16.
7. **Костин С.К.**, Мушникова С.Ю. Влияние уровня прочности на сопротивляемость коррозионному растрескиванию судостроительных сталей / ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» XII Межд. конф. молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» Тезисы докладов. – 2013 г. – с. 31.
8. **Костин С.К.**, Мушникова С.Ю., Мотовилина Г. Д., Калинин Г.Ю. Влияние содержания азота на структуру, механические свойства и характер разрушения аустенитной нержавеющей стали 04X20H6Г11M2АФБ / X Российская ежегодная конф. молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов" сборник материалов. – ИМЕТ РАН Москва. – 2013. – с. 38.
9. Завалишин В.А., Филиппов Ю.И., Сагарадзе В.В., Печеркина Н.Л., Катаева Н.В., Мушникова С.Ю., **Костин С.К.**, Калинин Г.Ю. Коррозионное растрескивание азотистой аустенитной стали / 54-я Межд. конф. «Актуальные проблемы прочности» 11-15 ноября, 2013 г., тезисы докладов.– Екатеринбург: ФГБУН ИФМ УрО РАН. – с. 154.
10. **Костин С.К.** Структура и свойства коррозионно-стойкой стали марки 04X20H6Г11M2АФБ с различным содержанием азота / V конф. молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» 21-22 апреля 2014 г. Сборник тезисов. – ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина» Москва. – 2014 . – с. 22-23.
11. **Костин С.К.** Исследование структуры и свойств коррозионно-стойкой стали марки 04X20H6Г11M2АФБ с различным содержанием азота / ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» XIII Межд. конф. молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» Тезисы докладов. – 18-20 июня 2014 г. – с. 80.
12. **Костин С.К.**, Мушникова С.Ю., Харьков А.А., Альхименко А.А., Алексеева Е.Л. Исследование склонности конструкционных сталей к коррозионному растрескиванию в сероводородной среде // ИМАШ УрО РАН X межд. конф. «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» сборник материалов. – Екатеринбург. – 2016. – с. 77.

13. Мушникова С.Ю., Парменова О.Н., **Костин С.К.** Взаимосвязь химического состава и структурного состояния нержавеющей аустенитных сталей с коррозионной стойкостью и коррозионно-механической прочностью в морских условиях / Актуальные проблемы прочности: сборник тезисов LVII меж. конф., 24-27 мая, 2016 г. – СевГУ Севастополь. – 2016. – с. 160.
14. Ильин А.В., Мушникова С.Ю., **Костин С.К.** Влияние содержания азота, термической и деформационной обработки на структуру и коррозионно-механическую прочность аустенитной хромомарганцевоникелевой стали / Сборник материалов «Механические свойства современных конструкционных материалов», Научные чтения им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга. – ИМЕТ РАН Москва. – 6-7 сентября, 2016 г. – с. 70.
15. Мушникова С.Ю., **Костин С.К.**, Парменова О.Н., Карпова А.Г. Особенности коррозионного разрушения азотсодержащих аустенитных сталей в агрессивных средах / Труды XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. – Екатеринбург. – 26-30 сентября 2016 г. – с. 340.