Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

На правах рукописи

Иоффе Андрей Владиславович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ

ПРОЧНОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ СтойкоСТИ для

ПРОИЗВОДСТВА НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБ

Специальность 05.16.09- Материаловедение (машиностроение) Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант: доктор физ.-мат. наук, профессор

ВыбойщикМА.

Тольятти-2018 г.

2

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6

1 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ 17

1.1 Объекты исследований 17

1.2 Методы испытаний и исследований 18

1.2.1 Лабораторные коррозионные испытания 20

1.2.2 Промысловые испытания 32

1.2.3 Методы исследований 39

Выводы 46

2 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ В

СЕРОВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ 47

2.1 Коррозионно-механическое разрушение сталей в H2S-

содержащих средах. Состояние вопроса, методы решения и задачи

исследований 47

2.1.1 Наводороживание и нахождение водорода в сталях 47

2.1.2 Изменение механических свойств при наводороживании 52

2.1.3 Механизмы и модели развития водородного разрушения 54

2.1.4 Влияние свойств стали (микроструктура, состав, механические свойства) на развитие коррозионного растрескивания в H2S - содержащих средах 56

2.1.5 Влияние вида, количества, распределения и формы металлических включений на зарождение и развития водородного растрескивания 61

2.2 Модифицирование в производстве трубных сталей 62

2.2.1 Влияние модифицирования РЗМ на механические и коррозионные свойства сталей 63

2.2.2 Влияние комплексного (РЗМ+силикокальций) модифицирования на свойства трубных сталей 67

2.3 Влияние сульфидных включений и микролегирования ванадием

на зарождение и развитие водородной повреждаемости в H2S-

з

содержащих средах 70

2.3.1 Объекты и методики исследования 70

2.3.2 Влияние количества и геометрии сульфидов на повреждаемость

в НгБ-содержащих средах 75

2.3.3 Влияние микролегирования ванадием на повреждаемость

стали с НгБ-содержащих средах 80

2.3.4 Повреждаемость сталей с округлыми оксисульфидными включениями в сероводородсодержащих средах 81

2.3.5 Сравнение процессов развития повреждаемости при лабораторном моделировании (испытание на СКРН) и эксплуатации труб в нефтепромысловых средах с высоким содержанием H2S 88

2.4 Разработка стали с высокими механическими свойствами и

стойкостью в нефтепромысловых средах, насыщенных

2.4.1 Технология термической обработки труб из стали 13ХФА 99

2.5 Влияние комплексного модифицирования (РЗМ + кальций)

на механические и коррозионные свойства стали 13ХФА 113

2.5.1 Влияние модифицирования РЗМ на изменение структуры и свойств 116

2.5.2 Влияние модифицирования РЗМ на коррозионные свойства

стали 13ХФА 118

Выводы 120

3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ К

УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ 123

3.1 Коррозионно-механическое разрушение оборудования в

нефтепромысловых С02 -содержащих средах. Состояние

вопроса, методы решения и задачи исследований 123

3.1.1 Факторы, определяющие интенсивность углекислотной

коррозии 125

3.2 Влияние состава и структуры стали на стойкость к

4

углекислотной коррозии 139

3.2.1 Термообработка и структура исследуемых сталей 139

3.2.2 Процессы и продукты С02 - коррозии 145

3.2.3 Влияние неметаллических включений на зарождение и интенсивность углекислотной коррозии 155

3.2.4 Стойкость сталей к СКРН 159

3.2.5 Выбор состава базовой стали 159

3.3 Связь структурного состояния с механическими и коррозионными

свойствами стали 15Х5М 161

3.3.1 Фазовые и структурные превращения стали 15Х5М 162

3.3.2 Влияние термической обработки на механические свойства.... 176

3.3.3 Влияние термической обработки на коррозионные свойства... 178

Выводы 180

4 РАЗРАБОТКА СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ И

КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ В НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ

СРЕДАХ 182

4.1 Анализ состояния вопроса и задачи исследований 182

4.2 Получение сталей с высоким уровнем прочностных и пластических свойств 184

4.2.1 Влияние примесей на механические свойства 184

4.2.2 Влияние ликвационной неоднородности состава и строения трубных заготовок и готовых труб 187

4.2.3 Структурное обеспечение сочетания высоких прочностных и пластических свойств 190

4.3 Обеспечение коррозионной стойкости сталей в агрессивных

нефтепромысловых средах 208

4.3.1 Влияние H2S на коррозионную повреждаемость в С02-содержащих средах 209

4.3.2 Влияние С02 на водородное охрупчивание и сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением в H2S-содержащих

5

средах 211

4.3.3 Бактериальная коррозия нефтегазопроводных систем 212

4.4 Разработка стали повышенной прочности и коррозионной

стойкости в средах с высоким содержанием С02 216

4.4.1 Выбор состава стали 216

4.4.2 Формирование структуры и свойств стали 15Х5МФБЧ

при термообработке 218

4.4.3 Лабораторные и промысловые испытания НКТ из стали 35Г2 и ЗОХМА (объекты сравнения) в средах с высоким содержанием С02 229

4.4.4 Коррозионные свойства металла труб из стали 15Х5МФБЧ .... 239

4.4 Разработка стали повышенной прочности и коррозионной

стойкости в агрессивных нефтепромысловых средах

для изготовления нефтегазопроводных труб 247

4.4.1 Общий подход к разработке новой стали

для нефтегазопроводных труб 247

4.4.2 Базовая сталь 08ХМФА и её промысловые испытания 248

4.4.3 Разработка новой стали 08ХМФБЧА 253

4.5 Научные основы разработки сталей повышенной прочности, коррозионной стойкости и технологий производства труб 268

4.6 Основы выбора материала стальных труб, работающих

в коррозионно-активных нефтепромысловых средах 279

Выводы 283

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 284

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 288

Приложение А. Разработанные методики испытаний 315

Приложение Б. Разработанные технические условия 320

Приложение В. Акты испытаний 346

Приложение Г. Расчет экономического эффекта от внедрения 353

Приложение Д. Использование результатов работы 359

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

 Сформулированынаучныеосновысозданияиразработкисталейдляпроизводстватрубработающихвнефтепромысловыхсредахвысокойагрессивностикоторыевключаюттребованияксвойствамтрубныхсталейсучётомсоставадобываемыхсредвыборметодовиспытанийиисследованийрекомендацииподополнительномулегированиюмикролегированиюимодифицированиютребованияпозагрязненностиформеираспределениюнеметаллическихвключенийвыборструктурногосостояниясталиобеспечивающегосочетаниевысокихпрочностныхикоррозионныхсвойствсравнительнуюоценкупотребительскихсвойствтрубныхсталейнеменеепараметров

 Предложенсистемныйподходввыбореметодовисследованийииспытанийприразработкеновыхсталейсболеевысокимиэксплуатационнымисвойствами

 Разработаныметодикилабораторныхиспытанийсталейнастойкостькуглекислотнойкоррозииикнефтяномубиоценозуиметодикипромысловыхиспытанийнефтегазопроводныхтрубвбайпасныхлинияхинасоснокомпрессорныхтрубприэксплуатациивлифтовыхколоннах

 ИнтенсивностьзарожденияикинетикаразвитияводородногоразрушениясталейвсодержащихсредахвомногомопределяетсяколичествомгеометриейисоставомнеметаллическихвключенийПоказанасвязьпроцессовразрушениясталейсгеометриейнеметаллическихвключений

 Микролегированиеванадиемсобразованиемвысокодисперсныхравномернораспределенныхпообъемукарбонитридовзначительнозатрудняетзарождениеизамедляетразвитиеводородногоохрупчиваниянизкоуглеродистыхсталей

 Механизмипоследовательностьразвитияразрушениянасоснокомпрессорныхтрубприэксплуатациивсредахсповышеннымсодержанием





идентичныпроцессамразрушениянаблюдаемымприлабораторныхиспытанияхнастойкостьксульфидномукоррозионномурастрескиваниюподнапряжением

 КомплексноемодифицированиекальцийРЗМнизкоуглеродистыхнизколегированныхсталейобеспечиваетглубокуюочисткуотсерыикислородауменьшаетразмерисфероидизируетнеметаллическиевключениячтоповышаеткоррозионнуюстойкостьсталивгБсодержащихсредахисопротивлениекбактериальнойкоррозииПрисутствиевсталииоказываетзначительноебактерицидноевоздействиесреднееколичествоклетокСВБуменьшаетсянапорядок

 КинетикаразвитияиформыпроявленияуглекислотнойкоррозииопределяетсясоставомструктуройкогезионнымиадгезионнымисвойствамипродуктовкоррозиикоторыевсвоюочередьзависятотсоставаиструктурысталиатакжеусловийэксплуатацииПоказанызависимостиисвязискоростиуглекислотнойкоррозииотстроенияисоставапродуктовкоррозииисодержанияхромавстали

 ВсоставпродуктовкоррозиихромамолибденовыхсталейвходятпродукткоррозионноговзаимодействиянерастворившаясякарбиднаяфазасталииаморфныефазыОНифазасодержащаямолибден

 СтруктурареечногобейнитасталиХМсростомтемпературыотпускапереходитвболеестабильноесостояниесоследующимиизменениямикарбиднаяфаза трансформируется в следующей последовательностиззсдополнительнымвыделениемкарбидовМоСзернаферритапостепеннорекристализуютсясзарождениеммелкихзереннаграницебывшегоаустенитногозерна

 РазработаназапатентованаивведенавпроизводствостальХМФБЧдляизготовлениянасоснокомпрессорныхтрубНКТстойкихкуглекислотнойкоррозииРежимытермообработкинормализацияСотпускСобеспечивалиНКТсочетаниевысокихмеханическихсвойствавМПаМПаМДжмсвысокойкоррозионной





стойкостьюкуглекислотнойкоррозииммГОДикСКРНКіСМПамш

 НКТизсталиХМФБЧприработевнефтяныхскважинахссодержаниемСмглпоказаливремянаработкивразабольшеаскоростькоррозиивразменьшечемНКТизсталейГСиХМАранееэксплуатируемыевэтихжескважинах

 РазработаназапатентованаивведенавэксплуатациюстальХМФБЧАдляпроизводстванефтепромысловыхтрубсболеевысокимимеханическимиикоррозионнымисвойствамиТрубопроводыизсталиХМФБЧвместорожденияхсвысокойагрессивностьюнефтепромысловыхсредимеютсрокбезаварийнойэксплуатациивсреднемвтриразавышечемранееиспользуемыестали

 СтруктурноебейнитноепостроениемелкиезернаизбыточногоферританаграницахбывшегоаустенитногозернаразнонаправленныепакетыреечногобейнитавнутрибывшегоаустенитногозернаипрослойкиостаточногоаустенитапограницамреекобеспечиваетвысокиемеханическиесвойствавнизкоуглеродистыхнизколегированныхсталейДлясталиХМФБЧАпослезакалкисСвводутакаябейнитнаяструктурапозволилаполучитьсочетаниевысокихпрочностныхпластическихсвойствавМПаадМПаМДжмпривязкойсоставляющей

 ТермическаяобработкатрубизсталиХМФБЧАзакалкаСотпускСобеспечивалаполучениегрупппрочностиКиЕпоГСТивысокуюстойкостькосновнымвидамкоррозионногоразрушениявнефтепромысловыхсредахкСКРНіСМПамшашдкуглекислотнойкоррозииммгодкбактериальнойкоррозиинапорядоквышечемстальГС

 СуммарноеколичествоизготовленныхнефтегазопроводныхинасоснокомпрессорныхтрубизразработанныхсталейсоставилоболееодногомиллионатоннПорезультатамрасчетаэкономическогоэффектазаменаодногокилометрапромысловыхтрубопроводовизсталейГСГСнатрубыиз





разработанныхсталейХФАиХМФЧАдаетэкономическийэффекттысрубтоннзаменалифтовойколоннытоннизиспользуемыхсталейГСГСнаколоннуНКТизразработаннойсталиХМФБЧдаетэкономическийэффектболеемлнруб