

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Тюменский государственный нефтегазовый университет»

ОСНОВЫ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по нефтегазовому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 130501 «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» направления подготовки дипломированных специалистов 130500 «Нефтегазовое дело»

Под редакцией профессора,
доктора технических наук
В. Д. МАКАРЕНКО

Тюмень
ТюмГНГУ
2009

УДК 622.691.4
ББК 39.7.я.73
О 75

Рецензенты:

профессор, доктор технических наук Н. А. Малюшин
профессор, доктор технических наук Ю. З. Ковалев

Авторы: В. Д. Макаренко, С. П. Шатило, Ю. Д. Земенков,
М. С. Бахарев, Г. Г. Васильев, С. В. Кучеров, С. М. Дудин

Основы коррозионного разрушения трубопроводов [Текст] :
О 75 учебное пособие / под ред. В. Д. Макаренко. – Тюмень : ТюмГНГУ,
2009. – 404 с.
ISBN 978-5-9961-0140-5

В учебном пособии приведены результаты анализа влияния серы и водорода на сероводородное коррозионное разрушение под напряжением трубных сталей промысловых нефтегазопроводов. Рассмотрены теоретические концепции и гипотезы водородного охрупчивания металла в широком интервале температур, причем особое внимание уделено вопросу обратной водородной хрупкости, модели сульфидного коррозионного разрушения металла в присутствии водорода и с учетом влияния неметаллических включений на процесс зарождения и роста микротрещин при контакте металла с коррозионно-активной средой. Приведены новые сведения о критериях оценки сопротивляемости коррозионно-механическим разрушениям трубных сталей.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Строительство и эксплуатация трубопроводов, баз и хранилищ» и «Проектирование и строительство трубопроводов».

УДК 622.691.4
ББК 39.7.я.73

ISBN 978-5-9961-0140-5

© Государственное образовательное
учреждение высшего
профессионального образования
«Тюменский государственный
нефтегазовый университет», 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Освоение и эксплуатация месторождений Западной Сибири с суровыми геолого-климатическими и природно-географическими условиями обуславливают необходимость строительства, эксплуатации и производства ремонтных работ преимущественно зимой при низких температурах воздуха (до - 50 °С).

Опыт строительства и эксплуатации промысловых трубопроводов в этих условиях свидетельствуют о том, что в реальных трубопроводных конструкциях появление трещин, приводящих в конечном счете к их разрушениям, связано с присутствием в транспортируемом продукте сероводорода и микробактерий. Поэтому водонефтегазовая эмульсия характеризуется высокими коррозионно-агрессивными свойствами, вызывающими кроме локальной (например, питтинговой или канавочной) коррозии, специфические виды сероводородной коррозии - водородом индуцированное разрушение (ВИР) и сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением (СКРН).

До сих пор существует много теорий и гипотез о природе и механизме протекания этих видов разрушения, однако, несмотря на усилия многих научных центров, у исследователей не существует строго доказанной теории ВИР и СКРН. Известно, что одним из главных факторов их проявления является водород, который поступает в металл в результате реакций с внешней и технологической средой во время эксплуатации стальных металлоконструкций, вызывающий охрупчивание, приповерхностное разрушение и коррозионное растрескивание. В настоящее время сформулировано ряд гипотез механизма водородного охрупчивания, однако ни одна из них полностью не освещает все стороны процесса и не раскрывает его сущности.

Известно, что водородная деградация металлических конструкций - это следствие вредного влияния водорода на их механические характеристики. Она непосредственно приводит к существенному снижению эксплуатационных свойств трубопроводов, повышению риска аварий из-за непредвиденной потери работоспособности, сокращению ресурса. Разрушения в результате водородного охрупчивания и сероводородного коррозионного растрескивания происходят, как правило, внезапно и влекут за собой тяжелые последствия - сбой технологического процесса, потери продукции, необходимость внеочередного ремонта, возникновение аварийных ситуаций, загрязнение окружающей среды и др.

На основе результатов многочисленных экспериментальных работ и опыта, накопленного в нефтегазовой промышленности, в настоящее время разработан ряд организационно — технических, технологических и металлургических мер по предупреждению ВИР и СКРН промысловых трубопроводов; в частности - понижение содержания водорода в металле;

применение хладостойких и коррозионностойких сталей для изготовления труб, применение ингибирования перекачиваемого продукта и др. Однако влияние этих мер неоднозначно и зачастую малоэффективно, особенно при эксплуатации трубопроводов в наиболее коррозионно-активных средах Самотлорского нефтяного месторождения при минусовых температурах окружающего воздуха. Не достаточная эффективность различных мер объясняется неопределенностью природы водородного охрупчивания и сероводородного коррозионного растрескивания, отсутствием детальных представлений и знаний о механизмах этих явлений, что препятствует инженерному прогнозированию и внедрению в практику способов, методов и средств профилактики.

Поэтому в настоящей работе систематизированы и обобщены результаты исследований, гипотезы и теории ВИР и СКРН, вызванные присутствием в транспортируемой технологической среде сероводорода, которые были направлены на выяснение природы и механизма наиболее сложного и своеобразного проявления отрицательного действия водорода как в отдельности, так и в составе сероводородсодержащей смеси.

Предложенные многочисленные гипотезы и теоретические концепции для объяснения выявленных закономерностей и тенденций лишены раз свидетельствуют об актуальности проблемы сероводородного коррозионного разрушения и отсутствии полной ясности о природе этого сложного явления.

При написании книги использованы результаты многолетних исследований ряда научных центров, среди которых лидирующее положение занимают Львовский физико-механический институт и Институт электросварки им Е. О. Патона НАН Украины, опыт работы авторов по рассмотренным вопросам, а также материалы научно-исследовательских, проектных и технологических институтов и организаций, опубликованные в периодической и специальной литературе.

Авторы выражают признательность академику НАН Украины И. К. Походне, канд. физ.-мат. наук В. И. Швачко, профессорам, докторам технических наук Д. И. Котельникову, М. В. Шахматову, В. В. Ерофееву, А. А. Россошинскому, А. А. Бондареву, академику АТН РФ, доктору техн. наук, профессору Н.А. Малюшину, преподавателям и сотрудникам Нижневартовского филиала Тюменского государственного нефтегазового университета, сотрудникам ОАО «Славнефть-Мегионнефтегаз» и ОАО «Сибур — Тюмень», ОАО «ТНК-ВР», ОАО «Самотлорнефтегаз» за помощь, оказанную в работе над книгой.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ГЛАВА 1. ВОДОРОД В СТАЛИ	9
1.1. Растворимость водорода в трубных сталях	9
1.2. Поглощение водорода металлом и шлаком	14
1.3. Поглощение и удаление водорода в процессе выплавки сталей	16
1.4. Кинетика выделения водорода из стали	22
1.5. Раскисление электростали	24
1.6. Влияние кислорода и серы на качество конструкционных сталей	25
1.7. Окисление фосфора при выплавке стали	26
1.8. Сера в стали	28
1.8.1. Распределение серы между металлом и шлаком	31
1.8.2. Влияние состава металла на десульфурацию стали.....	34
ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СТАЛИ.....	36
2.1. Ликвация примесей при кристаллизации стали	36
2.2. Методы регулирования структурой металлического слитка	43
2.3. Образование неметаллических включений в стали	47
2.4. Распределение водорода в процессе кристаллизации металла	50
2.5. Сегрегация водорода	55
2.6. Состояние водорода в металле	65
2.7. Диффузия водорода в стали	67
ГЛАВА 3. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В СТАЛИ.....	69
3.1. Основные положения	69
3.2. Модифицирование НВ	77
3.3. Деформируемость НВ	91
3.4. Влияние НВ на водородное расслоение трубных сталей.....	95
ГЛАВА 4. ФИЗИКО–МЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОРОДНОГО ОКРУПЧИВАНИЯ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ.....	104
4.1. Общие положения	104
4.2. Гипотезы водородного окрупчивания металлов	107
4.2.1. Классификация водородной хрупкости	107
4.2.2. Механизмы водородного окрупчивания металла	109
4.3. Обратная водородная хрупкость (ОВХ) конструкционных сталей	122
4.4. Природа водородной деградации конструкционных сталей	125
4.4.1. Модель разрушения металла без водорода	126
4.4.2. Физическая модель ОВХ	127
4.4.2.1. Экспериментальная реализация модели ОВХ	128
4.4.2.2. Физико–механические основы ОВХ	133
4.4.2.3. Атомный механизм ОВХ	134
4.4.2.4. Микроструктурные аспекты ОВХ металла	137

4.5. Критерии хрупкого разрушения металла.....	143
ГЛАВА 5. ФИЗИКО–МЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОРОДНОЙ ТЕОРИИ СУЛЬФИДНОГО КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ (СКРН) ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ.....	148
5.1. Основные положения.....	148
5.2. Катодные и анодные процессы при сероводородном коррозионном разрушении.....	154
5.3. Механизмы зарождения коррозионной микротрещины на поверхности «металл – H ₂ S – содержащая среда».....	161
5.3.1. Основные положения.....	161
5.3.2. Локальная коррозия.....	168
5.3.3. Наводороживание металла.....	182
5.3.4. Водородом индуцированные разрушения сталей.....	195
5.3.5. Сероводородное коррозионное разрушение под напряжением.....	197
5.3.6. Водородное блистеринг-растрескивание газопроводов.....	206
5.3.7. Карбонатная стресс-коррозия промысловых трубопроводов.....	214
Список литературы к гл. 5.....	237
ГЛАВА 6. КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ В СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ.....	238
6.1. Роль микроорганизмов в питтинговой коррозии промысловых трубопроводов Западной Сибири (аналитический обзор литературы).....	238
6.2. Снижение влияния серы и водорода на трещиностойкость сварных соединений промысловых трубопроводов.....	255
6.3. Исследование влияния водорода на механизм коррозионного сульфидного растрескивания под напряжением (СКРН) сталей промысловых трубопроводов.....	263
6.3.1. Общие положения.....	263
6.3.2. Методика исследований и материалы.....	263
6.3.3. Результаты исследования и их анализ.....	264
6.4. Коррозионно-механическая стойкость нефтепроводных сталей в сероводородсодержащих средах.....	269
6.4.1. Основные положения.....	269
6.4.2. Методы и критерии исследования.....	270
6.4.3. Исследования СКРН.....	273
6.4.4. Исследования ВИР (НІС).....	277
6.4.5. Исследования вязкости сталей.....	277
6.4.6. Металлографические исследования.....	280
Список литературы к гл. 6.....	282

ГЛАВА 7. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.....	294
7.1. Основные положения.....	294
7.2. Критерии оценки коррозионно-механического разрушения трубных сталей.....	296
7.3. Роль водорода в трещиностойкости сварных соединений трубопроводов.....	325
7.4. Исследование процесса внутренней коррозии в трубопроводах.....	344
7.4.1. Причины и механизм внутренней коррозии.....	344
7.4.2. Математическое моделирование и методики расчета скорости коррозии в горизонтальных нефтепроводах.....	354
7.4.3. Ультразвуковая система идентификации типа смеси.....	359
Список литературы к гл. 7.....	366
ГЛАВА 8. ПРОТИВОКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.....	370
8.1. Катодная защита подземных металлических сооружений.....	370
8.1.1. Принцип действия катодной защиты.....	370
8.1.2. Расчет катодной защиты.....	375
8.2. Протекторная защита трубопроводов и резервуаров.....	380
8.2.1. Протекторная защита магистральных трубопроводов.....	381
8.2.2. Протекторная защита днища стальных резервуаров от почвенной коррозии	382
8.2.3. Расчет протекторной защиты с помощью групповых установок	384
8.3. Техническое обслуживание средств электрохимической защиты подземных трубопроводов.....	387
8.3.1. Механизм и закономерность процессов взаимодействия металлов с агрессивными средами.....	387
8.3.2. Защита подземных трубопроводов от почвенной коррозии.....	390
8.3.3. Критерии противокоррозионной защищенности магистральных нефтепроводов	392
8.3.4. Современные методы диагностики коррозионного состояния магистральных нефтепроводов	393
8.3.5. Регламентные работы по поддержанию эксплуатационных режимов электрохимической защиты	396
Список литературы к гл. 8	398