
Анализ изменения основных свойств металла оборудования после длительной эксплуатации в коррозионных сероводородсодержащих средах

**Копытов Дмитрий Владимирович,
Бабенков Максим Владимирович,
Кравцов Александр Викторович
Кузнецов Михаил Николаевич**

ОАО «Системы и технологии обеспечения безопасности. Техдиагностика»
460047, Россия, г. Оренбург, ул. Юных Ленинцев, 22
Тел.: 8(3532) 63-84-07
E-mail: contact@tdiag.ru

По результатам лабораторных испытаний образцов металла оборудования после длительной эксплуатации в коррозионных сероводородсодержащих средах получены значения следующих параметров металла – пределов прочности и текучести, относительного удлинения, относительного сужения, твердости, ударной вязкости, критической температуры хрупкости. Выполнен сравнительный анализ их значений с имеющимися в сертификатах изготовителей из паспортов оборудования. Установлены закономерности изменения значений этих параметров за время эксплуатации. Проведена оценка состояния и обоснована работоспособность металла по критериям нормативно-технической документации.

Ключевые слова: деградация металла; охрупчивание; механические характеристики металла; критическая температура хрупкости; ударная вязкость; предел прочности; предел текучести.

В условиях длительной эксплуатации оборудования при воздействии сероводородсодержащих рабочих сред металл оборудования подвергается деградации, т.е. его механические свойства определенным образом изменяются во времени. Так как определяющими при оценке работоспособности становятся параметры и критерии предельного состояния металла элементов оборудования, важной задачей является достоверное определение фактических текущих значений механических характеристик.

Необходимость оценки изменения механических свойств металла длительно эксплуатируемого в условиях воздействия сероводорода оборудования подчеркивалась в материалах конференций «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред» в 2010 и 2012 годах. Специалистами ОАО «Техдиагностика» и ООО «Газпром добыча Оренбург» проводятся исследования металла выбраковываемых или заменяемых фрагментов длительно эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах оборудования с целью сбора данных о механических характеристиках металла и анализа их изменения за период эксплуатации. Полученные данные используются для прогнозирования дальнейшей работоспособности оборудования в соответствии с требованиями РД 03-421-01 [1] и др. НТД.

В настоящей статье представлен опыт ОАО «Техдиагностика» по оценке изменения механических свойств металла на примере различных представителей технологического оборудования. Для определения характера изменения свойств металла были поставлены следующие задачи:

1. Отбор (вырезка) металла длительно эксплуатировавшегося оборудования, проведение механических испытаний и лабораторного исследования металла.

2. Анализ результатов испытаний и исследований, оценка изменения механических свойств металла за период эксплуатации.
3. Анализ факторов и закономерностей изменения механических свойств металла.

В таблице 1 представлены данные по оборудованию, металл которого был исследован в ОАО «Техдиагностика» в течение последних 2 лет.

Таблица 1 – Перечень оборудования, от которого осуществлен отбор металла для исследования, сведения о сроке эксплуатации и основных повреждающих факторах:

Объект	Срок эксплуатации, лет	Доминирующие факторы эксплуатации
Трубопровод сырого неочищенного газа, Ø720,0×22,0 мм	33	Воздействие сероводородсодержащей рабочей среды
Змеевик 1 ступени теплообменника подогревателя на скважине, Ø114 x 19 мм	25	Воздействие сероводородсодержащей рабочей среды
Теплообменник «газ – газ»	30	Воздействие сероводородсодержащей рабочей среды
Трубопровод газа регенерации Ø426 x 16	30	Воздействие сероводородсодержащей рабочей среды
Фонтанная арматура UPETROM Северных месторождений Западной Сибири	20	Низкотемпературные климатические условия и нагрузки.

Обобщенная программа исследования металла включала в себя:

1. Визуальный и измерительный, ультразвуковой, капиллярный контроль.
Задача контроля: измерение геометрических размеров, выявление и определение возможных поверхностных дефектов и дефектов сплошности металла.
2. Определение химического состава металла.
Задача: определение содержания химических элементов и марки стали, оценка соответствия химического состава металла требованиям НТД.
3. Механические испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454-78 [2].
Задача испытаний: определение ударной вязкости в диапазоне температур +20°C/-60°C и критической температуры хрупкости.
4. Механические испытания на растяжение по ГОСТ 1497-90 [3].
Задача испытаний: определение предела прочности (σ_B), предела текучести ($\sigma_{0,2}$), относительного удлинения (d) и относительного сужения (y), оценка их соответствия требованиям НТД и анализ возможного изменения за период эксплуатации.
5. Измерение твердости металла.
Задача контроля: определение твердости металла и оценка ее соответствия нормативным требованиям и изменения за период эксплуатации.
6. Анализ результатов исследования.
Задача: оценка соответствия параметров и свойств исследованного металла требованиям НТД.

Исходные свойства металла для сравнения брались из заводских сертификатов. Ниже приведены основные из полученных результатов.

При исследовании металла трубопровода сырого неочищенного газа от УКПГ до ГПЗ Ø720,0×22,0 мм из стали французского производства по спецификации ТУ-28 FR 73 (см. таблицу 2)

подтверждены высокие пластические свойства металла: ударная вязкость даже при температуре минус 40°C составляет 340 Дж/см², изломы полностью вязкие. Относительное сужение достаточно высокое. Расчет критической температуры хрупкости показал что она менее минус 60°C. Изменения прочностных характеристик незначительные. Изменений твердости практически не отмечено.

Таблица 2 – Результаты исследований металла трубопровода сырого неочищенного газа Ø720,0×22,0 мм

Параметр	Исходное состояние	Текущее состояние	Изменение, абс. ед. / %
Ударная вязкость, Дж/см ²	-	KCV ⁺²⁰ : 360 KCV ⁻⁴⁰ : 340	-
Предел прочности, кг/мм ²	48	55	+5 / 17%
Предел текучести, кг/мм ²	34	43	+9 / 25%
Относительное сужение, %	-	80	-
Относительное удлинение, %	29	27	-2 / 8%
Твердость (осн мет. / св. шов)	168 / 204	170/197	+2.5 / 1%

От выводимого из строя теплообменника «газ-газ», эксплуатировавшегося на одной из установок комплексной подготовки газа, было отобрано 3 фрагмента: два - из обечаек толщиной 42 мм, один – из патрубка штуцерного узла толщиной 44 мм. Металл теплообменника - сталь импортной поставки TTStE36 по DIN 1543 – при испытаниях также показал высокие пластические свойства (см. таблицу 3). Ударная вязкость металла при температуре –40°C существенно уменьшилась за 30 лет эксплуатации, но, тем не менее, осталась на достаточно высоком уровне (80 Дж/см² при норме – 30 Дж/см²). Прочностные характеристики практически не изменились. Изменение относительного удлинения незначительное (в пределах погрешности измерений).

Таблица 3 – Результаты исследований металла теплообменника «газ-газ»

Параметр	Исходное состояние	Текущее состояние	Изменение, абс. ед. / %
Ударная вязкость, Дж/см ²	KCV ⁻⁴⁰ : 116	KCV ⁻⁴⁰ : 80	-36 / 31%
Предел прочности, кг/мм ²	52	55,2	+3 / 6%
Предел текучести, кг/мм ²	37	37,8	+1 / 3%
Относительное сужение, %	-	64	-
Относительное удлинение, %	30	27	-3 / 10%
Твердость	140 HB	143 HB	+3 / 2%

Для испытаний металла змеевика теплообменника производства компании LAVALIN, выполненного из стали 42 MOD по API 5LX, была предоставлена катушка длиной 400 мм. После 25 лет эксплуатации в условиях сероводородсодержащих сред пределы прочности и текучести практически не изменились (см. таблицу 4). Относительное удлинение уменьшилось на 30%, но осталось в пределах норм. Изменения твердости незначительны (5%). Критическая температура хрупкости оценена как «менее минус 60°C».

Таблица 4 – Результаты исследований металла змеевика теплообменника подогревателя газа

Объект	Исходное состояние	Текущее состояние	Изменение, абс. ед. / %
Ударная вязкость, Дж /см ²	-	KCV ⁺²⁰ : >350 KCV ⁻⁴⁰ : >350	-
Предел прочности, кг/мм ²	48	46,1	-2 / 4%
Предел текучести, кг/мм ²	34	34,1	-
Относительное сужение, %	79	78	-1 / 1%
Относительное удлинение, %	50	35	-15 / 30%
Твердость	145 НВ	137 НВ	-8 / 5%

Металл трубопровода газа регенерации Ø426x16 мм, выполненного из стали 20 по ГОСТ 1050-74[5] (см. таблицу 6) характеризуется следующим: значение ударной вязкости при температуре минус 40°С уменьшилось до 20 Дж/см² (на отдельных образцах – до 8 Дж/см²), что менее допустимых значений; критическая температура хрупкости увеличилась до минус 15°С, что выше минимальной зимней температуры эксплуатации.

Таблица 5 – Результаты исследований металла трубопровода газа регенерации

Объект	Исходное состояние (на момент пуска в эксплуатацию).	Текущее состояние	Изменение абс. ед. / %
Ударная вязкость, Дж/см ²	67-100	KCV ⁺²⁰ : 96 KCV ⁻⁴⁰ : 8...20	-4 / 4%
Предел прочности, кг/мм ²	48 - 53	49	+1 / 2%
Предел текучести	24 - 36	33	+1 / 2-3%
Относительное сужение, %	-	69	-
Относительное удлинение, %	29	28	-1 / 3%
Твердость	-	172 НВ	-

При анализе микроструктуры элемента фонтанной арматуры UPETROM (задвижки 4 1/16"), эксплуатировавшейся в условиях Северных газовых месторождений, были обнаружены многочисленные дефекты структуры металлургические поры, микротрещины (см. таблицу 7). За период эксплуатации пределы прочности и текучести металла (сталь Т32МоСrNi08R, аналог отечественной стали 35 ХМЛ) увеличились на 3-10%, относительное удлинение уменьшилось на 10% достигнув предельно допустимого значения, относительное сужение уменьшилось на 40%. Ударная вязкость уменьшилась значительно: при температуре минус 60° С уменьшение ударной вязкости достигло 90% от первоначального значения. Критическая температура хрупкости металла составила минус 35° С, при температуре эксплуатации до минус 60°С. Изменения твердости зафиксированы не были.

Таблица 6 – Результаты исследований металла фонтанной арматуры из стали Т32МоCrNi08R, эксплуатировавшейся в условиях низкотемпературных нагрузок

Параметр	Исходное состояние	Текущее состояние	Изменение, абс. ед. / %
Дефекты структуры	Металлургические поры, рыхлоты, трещины		-
Ударная вязкость, Дж/см ²	KCV ⁻⁶⁰ : 36,7	KCV ⁺²⁰ : 80 KCV ⁻⁶⁰ : 4...50	до -33 / до 90%
Предел прочности, кг/мм ²	70,5	76,8	+7 / 10%
Предел текучести, кг/мм ²	56,8	58,62	+1,5 / 3%
Относительное сужение, %	43	26,7	-17 / 40%
Относительное удлинение, %	19	8-17	-2..10 / >10%
Твердость	215	216	+1 / 0,5%

При анализе результатов проведенных испытаний исследованные образцы металла оборудования были условно разделены на три группы.

1. Металл первой группы, куда относятся фрагменты трубопровода сырого неочищенного газа Ø720,0×22,0 мм, теплообменника «газ – газ», змеевика 1 ступени теплообменника подогревателя, при некотором (2-10%) изменении пределов прочности, текучести и твердости, тем не менее не претерпел существенных изменений пластических характеристик: относительное удлинение уменьшилось в пределах 10%, ударная вязкость сохранила высокие значения: при температуре минус 40° С не менее 80 Дж/см². В изломах образцов, испытанных на ударный изгиб, доля вязкой составляющей составляет более 95%. Такая ситуация обуславливается, видимо, высокими исходными потребительскими качествами металла.
2. Металл оборудования второй группы (трубопровод газа регенерации) оценен как охрупченный: расчетная критическая температура хрупкости увеличилась до минус 15...18°С. При этом изменения пределов прочности и текучести сравнимы с результатами по первой группе (4-10%). Ударная вязкость за период эксплуатации уменьшилась на 70-80%, измеренные значения ударной вязкости менее допустимых.
3. Металл оборудования третьей группы (задвижка 4 1/16" фонтанной арматуры) также характеризуется наличием в структуре металла рыхлот, металлургических пор, трещин. Пределы прочности и текучести металла группы 3 за период эксплуатации увеличились на 3-10%. Изменения твердости практически отсутствуют. Относительное удлинение уменьшилось на 10%, достигнув предельно допустимого значения, относительное сужение уменьшилось на 40%. Ударная вязкость уменьшилась значительно особенно при температурах минус 40°С и минус 60°С.

По результатам работ сделаны следующие краткие выводы:

1. По результатам исследований металла из фрагментов длительно эксплуатируемого оборудования получено, что для металла с исходными свойствами выше нормативных требований за период эксплуатации существенных изменений структуры и изменений механических характеристик не выявляется.
2. Для металла с исходными дефектами структуры и свойствами близкими к нижним границам

нормативного допуска выявлены существенные изменения: увеличение пределов прочности и текучести и уменьшение ударной вязкости, относительных удлинения и сужения, повышение критической температуры хрупкости.

3. Для обеспечения достоверности обоснования работоспособности оборудования рекомендуется выполнить его систематизацию по доминирующим факторам изменения механических свойств и продолжить практику отбора, механических испытаний металла фрагментов несущих элементов оборудования и анализ изменения его свойств с учетом этих факторов деградации.

Список используемой литературы.

1. РД 03-421-01 «Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов».
2. ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах».
3. ГОСТ 1497-90 «Металлы. Метод испытания на растяжение».
4. ТУ 14-1-3333-82 «Сталь толстолистовая стойкая к коррозионному растрескиванию. Опытная партия. Технические условия».
5. ГОСТ 1050-74 «Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия»