

ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОСТИ НА СЕРОВОДОРОДНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ СТАЛЕЙ

В статье рассмотрены случаи сероводородного растрескивания стальных деталей и изделий. Показано, что наряду с химическим составом сталей наиболее комплексным механическим критерием характеризующим пригодность сталей к эксплуатации в сероводородсодержащих средах является твердость.

Ключевые слова: труба, коррозия, твердость, трещина, растрескивание.

Отечественный и мировой опыт эксплуатации нефтегазовых месторождений позволил определить стали стойкие к сероводородной коррозии. Успешное применение этих сталей на сероводородсодержащих месторождениях в последнее время снизило внимание производителей оборудования к остальным параметрам сталей кроме химического состава. Считается, что если сталь по своему химическому составу соответствует требованиям, предъявляемым к сталям стойким к сероводородной коррозии, то из нее можно изготавливать оборудование с использованием различных технологий.

Однако, как неоднократно отмечалось в работах [1]–[3], химический состав не является в данном случае единственным критерием.

Анализ проводимых нами исследований отказов стальных труб показывает, что в значительной степени эти отказы обусловлены нарушением технологии производства и использованием технологий которые значительно влияют на стойкость сталей к сероводородному растрескиванию.

Рассмотрим несколько примеров и определим, какие критерии наиболее существенно повлияли на отказы.

Стали типа X18H10T в обычном аустенитном состоянии имеют твердость 169–179 НВ и являются стойкими против сероводородного растрескивания.

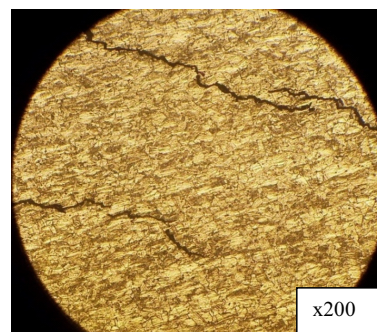
На рисунке 1 представлен фрагмент бесшовной трубы из стали типа X18H10T с твердостью металла более 29 HRC. Труба эксплуатировалась в условиях сложного напряженного состояния (растяжение с кручением) при воздействии сероводородсодержащих нефтегазовых сред и имеет множество поверхностных трещин, ориентированных под углом примерно 45° и продольную сквозную трещину. Трещины сероводородного растрескивания, распространяются как в окружном, так и в осевом направлении трубы (рисунки 2, 3).



Рисунок 1. Трещины бесшовной трубы из стали типа X18H10T



а)



б)

Рисунок 2. Трещины сероводородного растрескивания в металле трубы, распространяющиеся в окружном направлении

Твердость более 29 HRC трубы из стали типа X18H10T свидетельствует о высоком уровне пластической деформации. При этом естественно изменяется и коррозионная стойкость стали.

Твердость более 29 HRC трубы из стали типа X18H10T свидетельствует о высоком уровне пластической деформации. При этом естественно изменяется и коррозионная стойкость стали.

Результаты исследований с целью оценки сопротивления металла образцов из данной стали сероводородному растрескиванию показали, что они выдержали базовое время (720 часов) при постоянной нагрузке 0,8 от предела текучести.

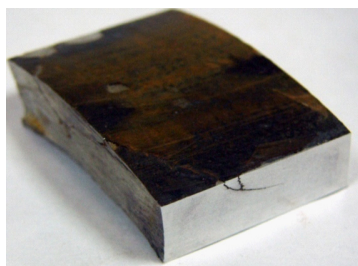
Согласно стандарту [4] стали, выдержавшие базовое время коррозионных испытаний без разрушения, считаются пригодными для эксплуатации в сероводородсодержащих средах. Стойкость образцов из стали типа X18H10T сероводородному растрескиванию при столь

высоком уровне твердости, объясняется следующим. При изготовлении образцов из трубной заготовки снимаются технологические остаточные напряжения, которые в процессе деформационных циклов упрочнения трубы из стали типа X18H10T до твердости более 29 HRC достигают величины предела текучести данной стали. В процессе эксплуатации таких труб технологические остаточные напряжения суммируются с рабочими напряжениями, и при воздействии сероводородсодержащих сред, возникает растрескивание.

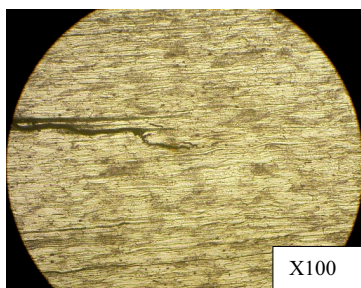
Расположение поверхностных трещин на бесшовной трубе из стали типа X18H10T с твердостью металла более 29 HRC под углом примерно 45° к оси корпуса соответствует линиям Людерса–Чернова и свидетельствует о значительных взаимных сдвигах кристаллов при высоком уровне пластической деформации с образованием текстуры (рисунок 4).

Таким образом, основной причиной сероводородного растрескивания бесшовной трубы из стали типа X18H10T с твердостью более 29 HRC явилось превышение допустимого уровня твердости металла в результате применённой технологии изготовления.

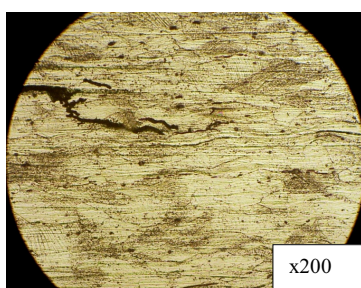
Особую группу среди коррозионностойких представляют аустенитно-мартенситные стали. Эти стали, наряду с хорошей стойкостью к коррозии обладают высокими механическими свойствами и хорошо свариваются. Для повышения механических свойств, стали закачивают, после чего структура стали представляет – неустойчивый аустенит и небольшое количество мартенсита (рисунок 5). В этом состоянии аустенитно-мартенситные стали, обладают достаточно высокой пластичностью и могут обрабатываться резанием и даже подвергаться пластической деформации.



а)



б)



в)

Рисунок 3. Трещины сероводородного растрескивания, распространяющиеся в осевом направлении от поверхности стенки трубы

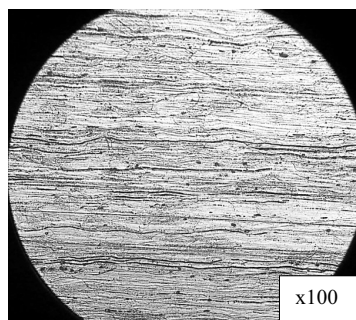


Рисунок 4. Текстура стали направленная вдоль оси трубы

После чего сталь обрабатывают холодом в интервале температур от -50 до -75 °С для перевода большей части аустенита (порядка 80%) в мартенсит и подвергают отпуску. Механические свойства данных сталей зависят от количества мартенсита, которое можно регулировать термообработкой. При содержании мартенсита более 40% пластичность сталей заметно падает, но одновременно возрастает прочность.

Разрушение трубных деталей, изготовленных из стали 08X15H5Д2Т, произошло после двух лет эксплуатации при воздействии газа содержащего 17% объемных сероводорода. Общий вид разрушившихся деталей свидетельствует о том, что трещины зародились по концентратору напряжений (рисунок 6).

По результатам исследования металла деталей твердость составила 41,2 HRC при

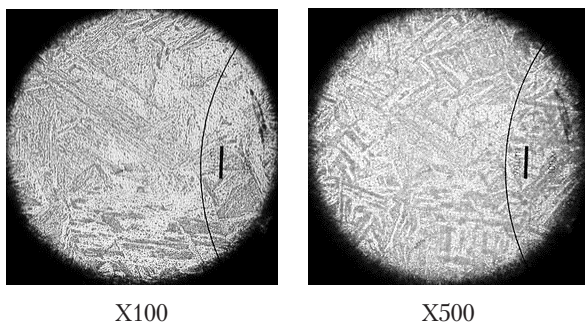


Рисунок 5. Аустенитно-мартенситная структура стали 08X15H5Д2Т

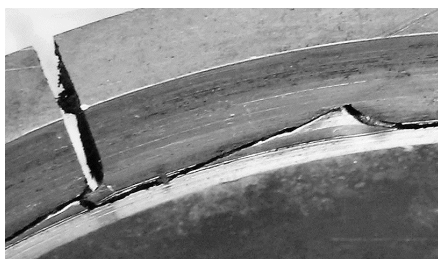


Рисунок 6. Общий вид разрушения детали из стали 08X15H5Д2Т



Рисунок 7. Хрупкое разрушение отвода 89x10 мм

высоком уровне прочностных и пластических свойств.

Анализ результатов исследования показал, что причиной разрушения явилось наводороживание металла и его недопустимо высокая твердость, полученная в результате термообработки холодом.

Наблюдались случаи хрупких разрушений гнутых отводов, изготовленных из стали 20 (рисунок 7). Твердость металла разрушенных отводов составляла 177–198 НВ.

Отводы изготавливали посредством дорнования из бесшовных горячедеформированных труб по ГОСТ 8731-74 с твердостью не более 156 НВ. Согласно технологии изготовления гнутых трубчатых деталей из стали 20 дорнование проводится при температуре 650 °С с последующей термообработкой (высокий отпуск 650 °С, 60 минут), при этом твердость деталей не должна превышать 167 НВ.

Отводы разрушались с образованием как сквозных, так и несквозных трещин, развивающихся со стороны внутреннего радиуса загиба.

Результаты механических испытаний свидетельствуют о не соответствии механических характеристик металла отвода паспортным данным и требованиям. Предел текучести повышен, на диаграммах испытаний отсутствует характерная для стали 20 площадка текучести, относительное удлинение в 1,5 раза меньше, а значение ударной вязкости КСУ-20° в 2,8 раза меньше требуемой, что, наряду с хрупким характером разрушения металла отводов свидетельствует о недопустимо низкой пластичности металла отвода.

Хрупкое разрушение отводов из стали 20 объясняется нарушением технологии их изготовления, приводящее к потере пластичности, увеличению твердости металла отводов и к возникновению в металле отвода технологических остаточных напряжений (рисунок 8), достигающих предела текучести стали.

Сталь 20 является основным металлом, при обустройстве сероводородсодержащих нефтегазовых месторождений. Учитывая случаи разрушения деталей трубопроводов, изготовленных из стали 20 и имеющих повышенную твердость, проведены коррозионно-механические испытания труб $\text{O}168 \times 14$ мм из стали 20 после различных вариантов термообработки.

Трубы $\text{O}168 \times 14$ мм №1, 2, 4 прошли термическую обработку по режиму нагрев до 620 °С,

Таблица 1. Результаты натуральных испытаний труб $\varnothing 168 \times 14$ мм.

№ п/п	$D_{исх.}$, мм	$t_{исх.}$, мм	$D_{ср}$ в плоскости max раскрытия, мм	Величина max раскрытия, мм	Длина трещины мм	Толщина min в месте раскрытия, мм	ϵ_D , %	ϵ_t , %
1	169,0	14,1	192	36,4	403	8,4	6,75	40,43
2	168,4	14,4	191,1	38,2	335	7,7	6,26	46,53
3	168,5	14,3	183	42,4	460	12,1	0,59	15,38
4	168,1	14,2	196,3	39	338	8,1	9,39	42,96
5	168,7	14,0	182,2	41,5	458	11,3	0,17	19,29
6	168,2	14,1	180,8	38,5	466	11,9	0,20	15,60

выдержка 30 мин, охлаждение $600^\circ\text{C}/\text{час}$ и имели твердость 134–148 НВ, а трубы №3, 5, 6 (рисунок 9) прошли термическую обработку по режиму нагрев до 920°C , выдержка 30 мин, охлаждение в воде и имели твердость 193–220 НВ.

Коррозионно-механические испытания труб проводили нагружением их давлением 16 МПа сероводородсодержащей среды NACE в течение 720 часов. Все испытуемые трубы выдержали базовое время испытаний (720 часов), поэтому последующим повышением давления их доводили до разрушения (рисунок 9).

Результаты испытаний свидетельствуют о существенном влиянии твердости стали на сопротивление сероводородному растрескиванию: остаточные пластические свойства металла труб с твердостью 134–148 НВ в окружном направлении ϵ_D более, чем на порядок превосходят ϵ_D металла труб с твердостью 193–220 НВ, а величина утяжки в очаге разрушения ϵ_t в 2,58 раза выше (таблица 1).

Анализ результатов исследований позволил установить необходимость ограничения твердости труб и деталей трубопроводов из стали 20 до 170 НВ для предотвращения их сероводородного растрескивания.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наряду с химическим составом сталей наиболее комплексным механическим критерием характеризующим пригодность сталей к эксп-

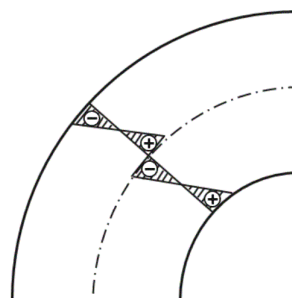
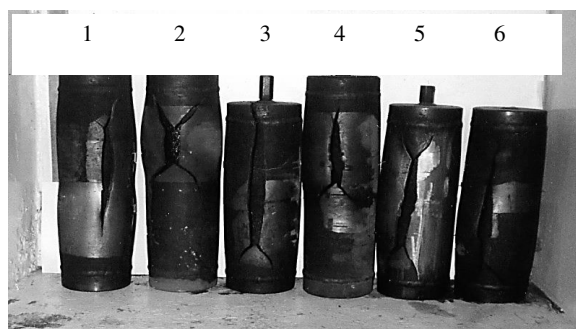


Рисунок 8. Технологические остаточные напряжения в отводах

Рисунок 9. Трубы $\varnothing 168 \times 14$ мм из стали 20 после коррозионно-механических испытаний

луатации в сероводородсодержащих средах является общая и локальная (в местах наибольших деформаций) твердость. Пренебрежение этим критерием, как правило, приводит к сероводородному растрескиванию оборудования и к экологическим последствиям.

5.08.2014

Список литературы:

1. Кушнарченко, В.М. Дефекты и повреждения деталей и конструкций / В.М. Кушнарченко, В.С. Репях, Е.В. Кушнарченко, Е.Ю. Чирков. – Оренбург: ОГУ, 2012. – 531 с.
2. Узяков, Р.Н. Разрушение клапанов из аустенитно-мартенситной стали в результате наводороживания / Р.Н. Узяков, В.В. Настека, М.Р. Узяков // Прочность и разрушение материалов и конструкций. Материалы 4-й международной конференции. Приложение №1, 2005 г. к журналу Российской Академии Естественных наук «Современные наукоемкие технологии». Москва: 2005 – С. 45–47.
3. Кушнарченко, В.М. Анализ причин отказов оборудования и трубопроводов / В.М. Кушнарченко, В.С. Репях, Е.В. Кушнарченко, Е.Ю. Чирков // Вестник Оренбургского государственного университета, 2010. – №10. – С. 153–159.
4. NACE MR0175-2002. Standard Material Requirements. Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for Oilfield Equipment.

Сведения об авторах:

Узяков Рафаэль Наильевич, доцент кафедры деталей машин и прикладной механики транспортного факультета Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент, e-mail: uzraf@mail.ru

Кушнаренко Владимир Михайлович, заведующий кафедрой деталей машин и прикладной механики транспортного факультета Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор, e-mail: vmkushnarenko@mail.ru

Репях Виталий Сергеевич, доцент кафедры детали машин и прикладная механика транспортного факультета Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент, e-mail: podval2004@mail.ru

Чирков Юрий Александрович, профессор кафедры деталей машин и прикладной механики транспортного факультета Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, доцент, e-mail: chircov_ura@mail.ru

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел. (3532) 372561