

АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ВЫСАЖЕННОЙ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНОЙ ТРУБЫ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СЕРОВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ

Кощев К.И., Якубович Е.А.

Ключевые слова: насосно-компрессорные трубы, разрушение, анализ химического состава, фрактографический анализ, сульфидное коррозионное растрескивание, металлографические исследования.

Аннотация. В исследовании проведен анализ преждевременно вышедшей из строя насосно-компрессорной трубы (НКТ). Фрагменты трубы были подвергнуты анализу химического состава, определению механических свойств и металлографическим исследованиям. Также были проведены фрактографические исследования излома трубы. Установлено, что причиной разрушения явилось отсутствие правильного режима термообработки для эксплуатации в условиях сероводородсодержащих сред, это привело к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением металла трубы

ANALYSIS OF THE FAILURE CAUSES OF THE DRAINED PUMP-COMPRESSOR PIPE UNDER THE CONDITIONS OF OPERATION IN A HYDROGEN-SULFUR ENVIRONMENT

Koshcheev K.I., Yakubovich E.A.

Keywords: tubing, destruction, analysis of chemical composition, fractographic analysis, sulfide corrosion cracking, metallographic research.

Abstract. The study analyzed a prematurely failure of the tubing. The pipe fragments were subjected to chemical analysis, determination of mechanical properties and metallographic studies. Also, fractographic studies of the pipe fracture were carried out. It was found out that the failure was caused by the lack of the correct heat treatment regime for operation under conditions of hydrogen sulfide-containing environments, which led to sulfide stress corrosion cracking of the pipe metal

Разрушение насосно-компрессорных труб (НКТ) по механизму сульфидного коррозионного растрескивания под напряжением (СКРН) является актуальной проблемой при разработке нефтегазовых месторождений [1,2]. Случаи обрыва колонны насосно-компрессорных труб наносят значительный экономический ущерб добывающим компаниям. Результаты исследований механизма СКРН позволили разработать требования к материалу труб, которые позволяют избежать их преждевременного разрушения и существенно увеличить срок эксплуатации нефтегазового оборудования в средах с повышенным содержанием растворенного сероводорода. Например, такие требования присутствуют в ГОСТ Р 53678-2009 (ИСО 15156-2:2003) [3], регламентирующем материалы, предназначенные для изготовления труб, работающих в средах, содержащих сероводород при добыче нефти и газа.

Однако, не смотря на наличие разработанных нормативных требований, разрушение НКТ по механизму СКРН до сих пор остаётся частым явлением при эксплуатации нефтегазовых скважин, что делает актуальным продолжение исследований для получения надежных представлений о механизмах и причинах развития процессов разрушения.

Возникает вопрос: если существуют требования, соблюдение которых позволяет избежать СКРН, то почему же трубы продолжают разрушаться? Экспертизное исследование труб после разрушения позволяет определить основные причины выхода из строя оборудования, а также избежать их повторения в будущем.

Объектом настоящего исследования является высаженная насосно-компрессорная труба, которая в аварийном режиме вышла из строя во время эксплуатации. На рисунке 1 представлен верхний (1) и нижний (2) фрагменты НКТ.



Рис. 1. Вид аварийной насосно-компрессорной трубы

На наружной поверхности нижнего фрагмента присутствует плохо читаемая маркировка, исходя из которой можно установить, что труба была изготовлена по ГОСТ 633-80 [4].

В ходе анализа причин разрушения аварийной НКТ был выполнен комплекс исследований:

- визуальный осмотр, фрактографические исследования поверхностей разрушения;
- анализ поверхности на наличие сульфидов железа методом серных отпечатков (по Бауману);
- химический анализ материала;
- оценка механических свойств, включающая:
 - испытания на одноосное растяжение,
 - испытания на ударный изгиб,
 - определение твердости,
 - металлографические исследования.

На наружной поверхности фрагмента 1 присутствуют механические повреждения, от ключей, на внутренней поверхности наблюдаются многочисленные механические повреждения, полученные в результате ловильных работ. На наружной поверхности фрагмента 2 выявлены механические повреждения, ориентированные под углом к оси трубы.

На рисунке 2 представлен вид ответных изломов на фрагментах НКТ. По характерному шевронному рисунку отчетливо видно, что очаг разрушения находился на наружной поверхности стенки НКТ. Трещина развивалась от очага разрушения по окружности в разные стороны, объединившись практически на противоположной от очага стороне излома. Излом

преимущественно хрупкий, ориентирован перпендикулярно наружной поверхности стенки. В области очага разрушения механических повреждений на наружной поверхности не обнаружено.

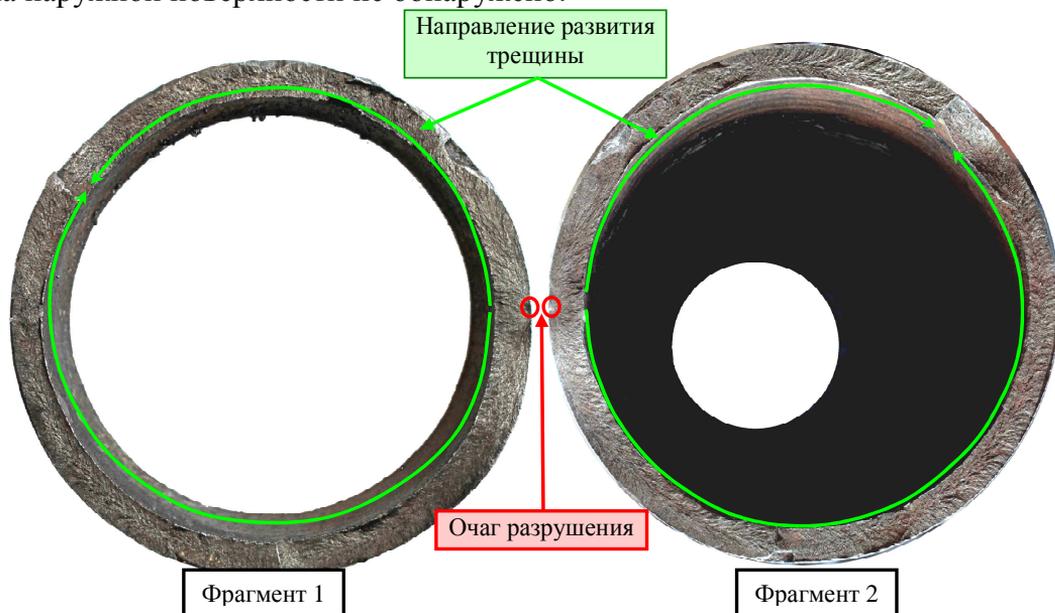


Рис. 2. Вид изломов и направление развития трещины

Оценка наличия сульфидов железа на наружной и внутренней поверхностях аварийной НКТ осуществлялась методом серных отпечатков по Бауману. Результат оценки представлен на рис. 3.

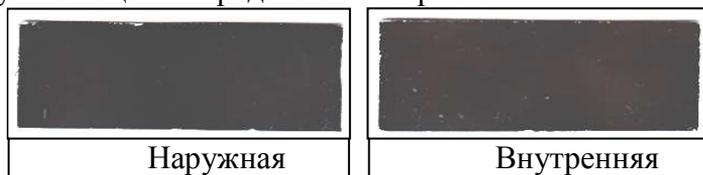


Рис. 3. Отложения сульфидов железа на наружной и внутренней поверхностях НКТ

Интенсивное потемнение серных отпечатков свидетельствует о том, что на наружной и внутренней поверхностях НКТ присутствуют сульфиды железа, являющиеся результатом сероводородной коррозии. При контакте металла НКТ со средой, содержащей растворенный сероводород, происходит диссоциация молекул H_2S и образование атомарного водорода, который, проникая в металл, вызывает его охрупчивание [5-7].

Химический состав металла исследуемой НКТ представлен в таблице 1.

Исследование механических свойств показало, что металл трубы характеризуется высокой прочностью и твердостью. Значения предела прочности и текучести в среднем равны 940 и 600 МПа соответственно. Твердость металла неоднородна и меняется в диапазоне (26,5-30,0) HRC. Вероятно, неоднородность твердости стали связана с повышенным

содержанием марганца: марганец склонен к ликвации, из-за чего распределение по объему металла неоднородно. Значения ударной вязкости, полученные при испытаниях при температурах + 20°C и – 40 °C, в среднем составляют 21,2 и 7,5 Дж/см² соответственно, что характеризует материал как крайне чувствительный к концентраторам напряжений и склонный к хрупкому разрушению.

Табл. 1.

	Массовая концентрация, %											
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	S	P
НКТН	Осн.	0,382	0,54	1,85	0,10	0,18	0,03	0,18	<0,005	0,040	0,012	0,018
Требования ГОСТ 633-80												
≤	-										0,045	0,045

Микроструктура металла представлена различными структурными составляющими: зернами доэвтектоидного феррита, выделившихся по границам бывшего аустенитного зерна; внутри бывшего аустенитного зерна определяются зерна тонкопластинчатого перлита и бейнитные зерна с вкраплениями остаточного аустенита. Размер бывшего аустенитного зерна от 20 до 50 мкм.

Данный тип микроструктуры металла, учитывая его химический состав, характерен для горячекатаного состояния без проведения дальнейших термических обработок для снятия напряжений. Наличие неотпущенного бейнита и остаточного аустенита обусловило высокую прочность и хрупкость стали.

Установлено, что металл НКТ характеризуется высокой степенью загрязненности неметаллическими включениями, достигающими по сульфидам марганца 3 балл по ГОСТ 1778-70. Удлиненные сульфиды марганца имеют острые вершины и поэтому могут служить очагами зарождения трещин. Особо негативное влияние сульфиды марганца будут оказывать на стойкость стали к коррозионному растрескиванию в сероводороде. Характерный вид микроструктуры и неметаллических включений представлены на рисунке 4. Следует отметить, что ГОСТ 633-80 не регламентирует загрязненность стали неметаллическими включениями, поэтому структура стали формально не противоречит данному стандарту.

Металл НКТ характеризуется высокой твердостью материала, неблагоприятной микроструктурой и существенной структурной неоднородностью. В микроструктуре наряду с перлитными зернами наблюдаются бейнитные участки с вкраплениями остаточного аустенита. Наличие неотпущенного бейнита и остаточного аустенита обуславливает высокую прочность и хрупкость стали. Кроме того, наличие остаточного аустенита свидетельствует об отсутствии отпуска (или его неэффективности) в использованной схеме термообработки трубы, в результате чего уровень остаточных напряжений в металле остается достаточно высоким.

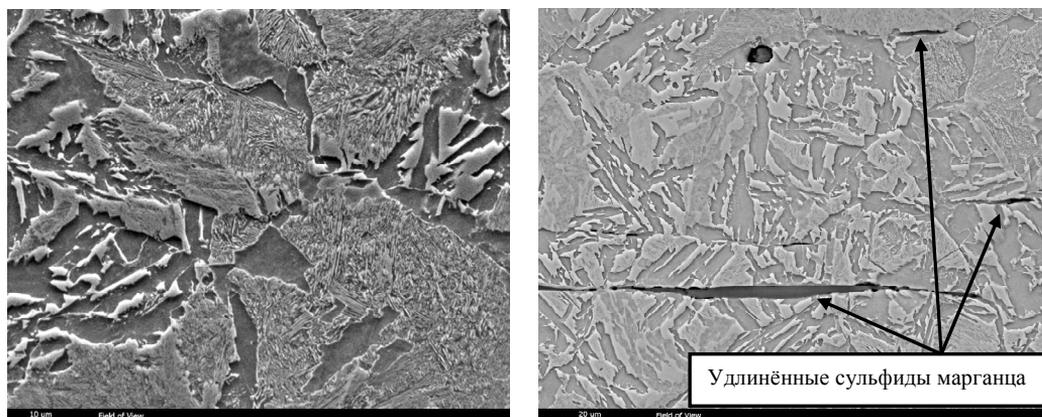


Рис. 4. Характерный вид микроструктуры и неметаллических включений (увеличение x 10 000)

По всем исследуемым параметрам труба соответствует ГОСТ 633-80, однако поскольку этот ГОСТ не учитывает влияния сероводорода на состояние металла его использование для выбора материала труб, эксплуатируемых в нефтепромысловых средах, является необоснованным. При этом сравнение полученных в исследовании параметров трубы с нормативами ГОСТ Р 53678-2009 (ИСО 15156-2:2003), который разработан для эксплуатации труб в условиях присутствия агрессивной сероводородной среды, обосновывает вывод о несоответствии нормативным требованиям.

Таким образом, недооценка оценка коррозионной опасности эксплуатационной среды, неправильный подбор нормативных документов для обоснования применяемого для изготовления материала и режимов термической обработки НКТ приводят к тому, что до эксплуатации допускаются трубы из неподходящих материалов, не обеспечивающих сочетания высоких механических свойств и коррозионной стойкости, что в конечном счёте приводит к аварийным разрушениям, остановке скважины и крупным экономическим потерям для добывающей компании.

Список литературы

1. Зырянов А.О. Особенности коррозионного разрушения насоснокомпрессорных труб при эксплуатации в средах с повышенным содержанием углекислого газа / А.О. Зырянов, С.А. Князькин, А. В. Иоффе, М.А. Выбойщик // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2012. – № 10. – С. 10-14.
2. Зырянов А.О. Исследование коррозионного разрушения насоснокомпрессорных труб из стали 15Х5МФБЧ в высокоагрессивных нефтепромысловых средах и усовершенствование технологии термической обработки этих труб: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: (05.16.09) / Зырянов Андрей Олегович; СамГТУ. – Самара, 2018. – 24 с.
3. ГОСТ Р 53678-2009 (ИСО 15156-2:2003). Нефтяная и газовая промышленность. Материалы для применения в средах, содержащих

сероводород, при добыче нефти и газа. Часть 2. Углеродистые и низколегированные стали, стойкие к растрескиванию, и применение чугунов. Национальный стандарт Российской Федерации, введ. 2011.01.01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 27 с.

4. ГОСТ 633-80. Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. Технические условия, введ. 1983.01.01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 32с.
5. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Metallurgia, 1985. – 157 с.
6. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали. – М.: Metallurgia, 1985. – 104с.
7. McKimpson M. Initial Hydrogen Attack Kinetics in Carbon Steel / M. McKimpson, P.D. Shewmon // Metallurgical Transactions. 1981. Vol. A12. №5. P. 824-835.

References

1. Zyryanov A.O. Features of corrosion destruction of pumping compressor pipes during operation in environments with increased carbon dioxide content / A.O. Zyryanov, S.A. Knyazkin, A.V. Ioffe, M.A. Vyboischik // Metallurgy and heat treatment of metals. – 2012, No. 10. – P.10-14.
2. Zyryanov A.O. Investigation of corrosion destruction of tubing made of 15Kh5MFBCN steel in highly aggressive oilfield environments and improvement of the technology of heat treatment of these pipes: extended abstract diss. ... cand. tech. sc. (05.16.09) / Zyryanov Andrey Olegovich; SamSTU. – Samara, 2018. – 24p.
3. GOST R 53678-2009 (ISO 15156-2: 2003). Oil and gas industry. Materials for use in environments containing hydrogen sulphide in oil and gas production. Part 2. Carbon and low alloy steels resistant to cracking and the use of cast irons. National standard of the Russian Federation, introduced 2011.01.01. – М.: Standartinform, 2019. – 27 p.
4. GOST 633-80. Tubing pipes and couplings for them. Technical conditions, introduced 1983.01.01. – М.: Standartinform, 2010. – 32p.
5. Kolachev B.A. Hydrogen brittleness of metals. – М.: Metallurgy, 1985. – 157p.
6. Arachkov Yu.I. Hydrogen corrosion of steel. – М.: Metallurgy, 1985. – 104 p.
7. McKimpson M. Initial Hydrogen Attack Kinetics in Carbon Steel / M. McKimpson, P.D. Shewmon //Metallurgical Transactions. 1981. Vol. A12. №5. P. 824-835.

Кошчев Кирилл Игоревич – магистрант	Koshcheev Kirill Igorevich – master's student
Якубович Ефим Абрамович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», eyakubovich@mail.ru	Yakubovich Efim Abramovich – candidate of technical science, professor of Department “Metal Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials”, eyakubovich@mail.ru
Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия	Samara state technical university, Samara, Russia

Received 25.12.2020