

## МЕХАНИЗМ ПОВРЕЖДЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАВОДОРОЖИВАЮЩИХ СРЕД

Рассмотрены основные причины разрушения деталей и конструкций при воздействии наводороживающих сред. Представлен механизм коррозионного растрескивания и водородного расслоения стальных изделий и конструкций, контактирующих с наводороживающими средами.

**Ключевые слова:** наводороживание, трещина, разрушение.

В процессе эксплуатации изделий и конструкций, контактирующих с сероводородсодержащими (наводороживающими) рабочими средами наблюдаются повреждения различного характера, наносящие материальный и экологический ущерб. Изучение механизма коррозионного растрескивания и водородного расслоения стальных изделий и конструкций является актуальным, так как проблемы обеспечения надежности металлических конструкций связаны не только с качеством их проектирования, изготовления и монтажа, но и с влиянием коррозии. Это важно и с позиций оценки влияния указанных факторов на безопасность эксплуатации изделий и конструкций, подверженных воздействию наводороживающих сред. Далее приведены примеры разрушений таких изделий (в нефтегазовом оборудовании).

*Разрушение крышки задвижки шиберной.* Металл крышки задвижки – сталь типа 35ХМЛ имеет твердость в пределах от 216 до 244 НВ, что не соответствует требованиям стандарта NACE MR 0175 [1], в котором максимальное значение твердости принято 229 НВ для стальных изделий, эксплуатирующихся в условиях воздействия сероводородсодержащих сред. Повышенная твердость отдельных зон металла крышки задвижки свидетельствует об отклонениях от параметров оптимального термического режима изготовления крышки и о наличии в металле изделия остаточных технологических напряжений. При визуальном осмотре на наружной поверхности крышки задвижки наблюдается сквозной дефект в виде трещины протяженностью до 54 мм с величиной раскрытия 0,04–0,08 мм. На внутренней цилиндрической поверхности крышки наблюдаются области, состоящие из расположенных вплотную друг к другу канавок глубиной до 0,65 мм с острым дном, располагающихся как вдоль образующей

цилиндрической части, так и по окружности. Поверхности переходного конуса и прилегающих к нему галтелей крышки испещрены сплошными бороздками с острым дном и глубиной до 1,3–1,45 мм (рисунок 1). В области очага разрушения наблюдается хрупкий излом – след трещины, развивавшейся от внутренней поверхности крышки задвижки к внешней. Устья межкристаллитных трещин расположены в месте перехода внутренней цилиндрической поверхности во внутреннюю коническую поверхность на дне не удаленных механической обработкой острых кольцевых бороздок (рисунок 1). На механически обработанных поверхностях крышки трещины не обнаружены. Причиной разрушения крышки задвижки шиберной являются расположенные на внутренней поверхности крышки металлургические дефекты, которые под действием наводороживающей среды, эксплуатационных и остаточных технологических напряжений развились в сквозную кольцевую трещину.

*Разрушение гайки прижимной диаметром 80 мм винта мультифазного насоса* произошло при перекачке сероводородсодержащей нефти с рабочим давлением в системе до 5,5 МПа. Гайка разрушилась по двум сечениям (рисунок 2).

Согласно результатам спектрального анализа металл гайки соответствует стали типа 12Х15Н4Д4МБ при значениях твердости 38,2...41,2 НРС.

В одном из сечений (совпадает с осевыми сечениями резьбовых отверстий крепежа гайки и ее стопорного винта, рис. 2, б) разрушение практически хрупкое (без видимых следов пластической деформации). В другом сечении разрушение квазихрупкое. Причинами разрушения является несовершенство конструкции гайки прижимной (концентрация напряжений в области пересечения резьбовых поверхностей гай-

ки и ее стопорного винта) и воздействие сероводородсодержащей (наводороживающей) среды на нестойкий в этих условиях металл гайки.

**Разрушение деталей – отводов трубопроводов.** В процессе эксплуатации трубопроводов наблюдаются случаи хрупких разрушений деталей – отводов трубопроводов. Твердость металла разрушенных деталей составляет 177 – 198 НВ. Отводы изготавливаются, как правило, посредством дорнования из труб бесшовных горячедеформированных по ГОСТ 8731-74, согласно которому для стали 20 при толщине стенки трубы более 10 мм твердость должна быть не более 156 НВ. Согласно технологии изготовления гнутых трубчатых деталей из стали 20, дорнование производится при температуре 650°С с последующей термообработкой (высокий отпуск 640°С, 60 минут), причем твердость деталей после этого не должна превышать 167 НВ. Отводы разрушаются с образованием сквозных трещин или несквозных межкристаллитных трещин, развивающихся со стороны внутреннего радиуса загиба. Результаты механических испытаний

на растяжение и на ударный изгиб свидетельствуют о не соответствии механических характеристик металла отвода требованиям нормативных документов. Среднее значение ударной вязкости КСУ<sup>-20°</sup> металла отводов составило 10,6 Дж/см<sup>2</sup>, что в 2,8 раза меньше требуемой, а минимальное значение ударной вязкости металла отвода (9,3 Дж/см<sup>2</sup>) в 2,7 раза меньше минимально допустимого значения (25 Дж/см<sup>2</sup>), что, наряду с хрупким характером разрушения металла отводов, свидетельствует о недопустимо низкой пластичности металла отвода.

Хрупкое разрушение отводов из стали 20 объясняется тем, что в процессе прохождения трубной заготовки через фильеру при изготовлении отвода в металле заготовки возникают значительные технологические напряжения от пластического изгиба. Повышенная твердость (более 170 НВ) стали 20 и хрупкий характер излома разрушенных отводов свидетельствуют также о нарушении режима термообработки после прохождения отводов через фильеру. Основной причиной разрушения отводов из ста-

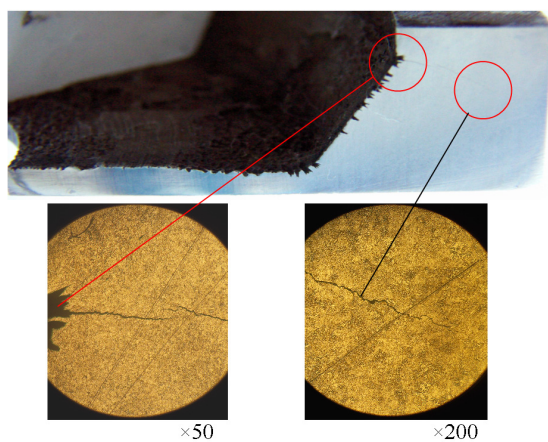


Рисунок 1. Межкристаллитные трещины в металле крышки задвижки



Рисунок 2. Разрушение гайки прижимной

ли 20 является нарушение технологии их изготовления, приводящее к потере пластичности (увеличению твердости более 170 НВ) металла отводов и к возникновению в металле отвода технологических остаточных напряжений, достигающих предела текучести стали. В процессе эксплуатации рабочие напряжения и технологические остаточные напряжения при воздействии наводороживающей рабочей среды приводят к хрупкому разрушению отводов.

*Разрушение в виде водородных расслоений* основного металла аппаратов и трубопроводов, контактирующих с сероводородсодержащими средами, происходит под действием наводороживающей рабочей среды, как правило, межкристаллитно на участках металла конструкций, содержащих дефекты типа неметаллических включений и металлургических расслоений (рисунок 3).

*Коррозионное растрескивание* сварных соединений аппаратов и трубопроводов, контактирующих с сероводородсодержащими средами, зарождается под действием наводороживающей рабочей среды в области дефектов сварных соединений и распространяется, как правило, межкристаллитно (рисунок 4).

Приведенные примеры и анализ причин разрушений деталей и конструкций, с учетом

существующих представлений о механизме коррозионного растрескивания, позволяет представить механизм разрушения стальных изделий при воздействии наводороживающих сред.

Коррозионное растрескивание и водородное расслоение стальных изделий и конструкций, контактирующих с наводороживающими средами происходит, как правило, межкристаллитно. В настоящее время преобладающей является «островковая» модель границ, согласно которой граница зерен состоит из чередующихся островков с хорошим и плохим сопряжением кристаллических решеток смежных кристаллитов – каналов вакансий (микронесплошностей). Искажения решетки на границах могут достигать до 100 параметров решетки и в приграничных зонах приводят к повышению на этих участках потенциальной энергии до величин 1...10 Дж/м<sup>2</sup>. Избыточная энергия обуславливает меньшую работу на образование единицы площади поверхности межкристаллитной трещины по сравнению с транскристаллитной. Толщина приграничных слоев зерен, в которых наблюдается большая плотность дислокаций, достигает, например, для стали 40ХН величин порядка 0,1...1 мкм. Химический состав приграничных слоев заметно отличается от состава

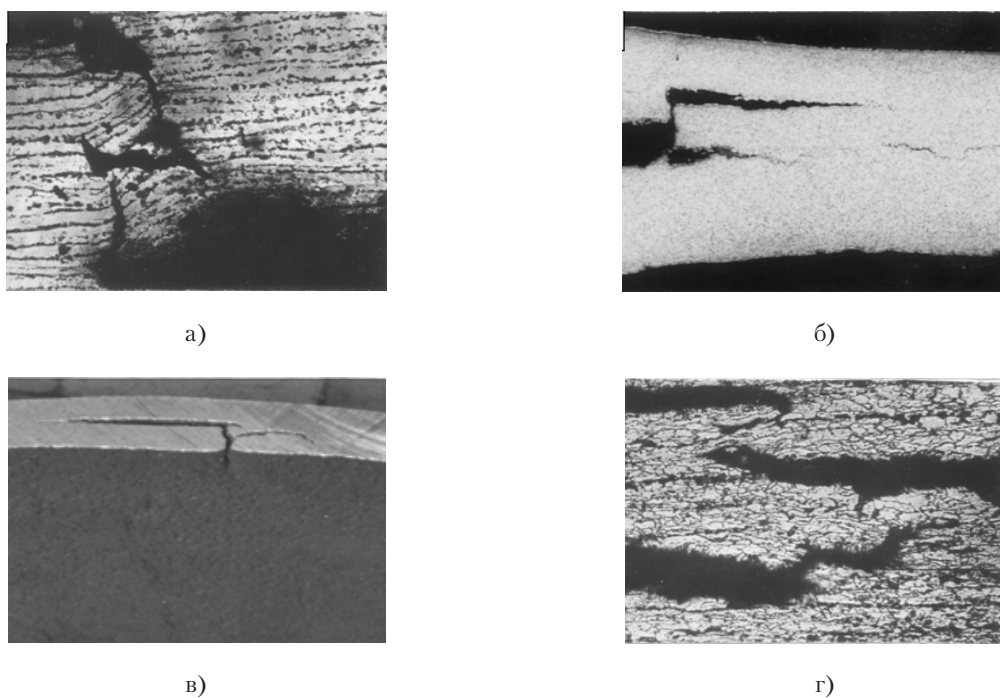


Рисунок 3. Водородные расслоения: а) основного металла аппарата УКПГ (Ч200); б) трубопровода Ш 720Ч22 мм; в) трубопровода Ш 720Ч18 мм; г) трубопровода Ш 530Ч12 мм (Ч200)

кристаллитов вследствие обогащения границ зерен фосфором и другими атомами примесей. Вероятность адсорбции водорода на границе увеличивается из-за большей энергии связи водорода с атомами примесей (P, S), чем с железом, поэтому концентрация водорода на границе зерен выше, чем в кристаллитах. Растворимость водорода в межзеренном веществе на три порядка больше, чем в  $\alpha$ -железе. Границы зерен являются также предпочтительными путями диффузии водорода в стали при ее наводороживании. При этом абсорбция сталью водорода зависит от ее структурно-физического состояния. Холодно-деформированная мягкая сталь может поглотить в 100 раз больше водорода, чем отожженная. В районе концентратора напряжения скорость накопления водорода в стали возрастает в 10 и более раз по сравнению с областями равномерных напряжений. Известно также, что водород диффундирует в области трехосных растягивающих напряжений, которые, например, для стали находятся на расстоянии 0,3...0,4 мм от вершины трещины. При действии механических напряжений диффузия водорода в сталь увеличивается. Особенно ускоряется диффузия при напряжениях, вызывающих пла-

стические деформации стали. Последнее объясняют усилением проникновения водорода вдоль плоскостей скольжения и через связанные с ними дислокации и скопление вакансий.

Анализ коррозионного растрескивания и водородного расслоения натуральных конструкций с учетом существующих представлений о механизме коррозионного растрескивания и свойствах границ зерен позволяет заключить, что очагами зарождения микротрещин при контакте сталей с наводороживающей средой, наряду с границами раздела матрица – неметаллическое включение, служат островки границ с плохим сопряжением кристаллических решеток смежных кристаллитов. Эти островки (каналы вакансий) являются микрополостями-микроконцентраторами, в области которых под действиями остаточных напряжений или внешних нагрузок (особенно при наличии концентраторов напряжений) возникает трехосное напряженное состояние. Водород находится в металле в виде ионов, которые, попадая в микрополости через границы зерен и из кристаллической решетки, захватывают из электронного облака металла электроны и превращаются в атомы, уменьшая прочность этих участков гра-

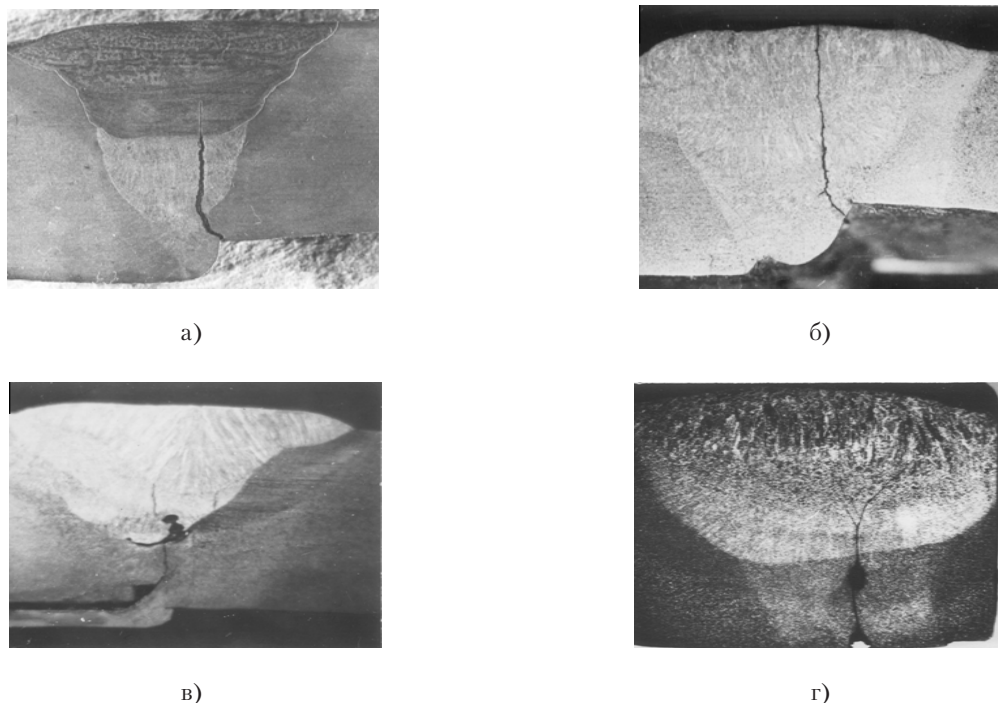


Рисунок 4. Коррозионное растрескивание сварных соединений: а) трубопровода Ш 530Ч12 мм, сталь 20; б) трубопровода Ш 720Ч18 мм, сталь 20; в) корпуса теплообменника Ш 1200Ч20 мм, сталь 09Г2С; г) трубопровода Ш168Ч14 мм, сталь 12Х1МФ (г)

ниц и, по мере повышения концентрации атомов, водород молизуется. Увеличение давления молизованного водорода в микрорасслоениях до критических значений, наряду с усугубляющим действием водорода, находящегося вблизи этих микрорасслоений – в областях трехосного напряженного состояния, приводит к активизации дислокационных процессов, микродеформациям и разрушению островков границ с хорошим сопряжением решеток смежных зерен. В дальнейшем описанные процессы повторяются, вызывая рост и объединение микротрещин. Наличие при коррозионном растрескивании вторичных трещин – водородных расслоений, расположенных перпендикулярно к магистральной трещине (параллельно действующим напряжениям), подтверждает то, что контролирующими процессами коррозионного растрескивания, как и водородного расслоения, являются: сорбция металлом ионов водорода и молизация водорода в микронесплошностях, находящихся на границах зерен и на границах раздела матрица – неметаллическое включение. Субкритический рост лидирующей трещины происходит аналогично развитию микротрещины вследствие молизации водорода в прилежа-

щих к магистральной трещине островках границ с плохим сопряжением кристаллических решеток смежных зерен или границ раздела матрица – включение с последующим разрушением островков границ зерен с хорошим сопряжением кристаллических решеток смежных зерен. В этот период коррозионное растрескивание ускоряется за счет значительного увеличения концентрации напряжений и потока водорода в микронесплошности и островки границ зерен с плохим сопряжением решеток смежных кристаллитов или в границы раздела матрица-включение, попадающие в область концентрации напряжений и пластических деформаций, образующиеся впереди растущей трещины.

Учитывая ранее изложенное, можно сделать вывод о том, что механизмы коррозионного растрескивания и водородного расслоения идентичны, причем этот же механизм определяет образование в стальном прокате металлургических расслоений и так называемых холодных трещин при сварке сталей, а также зарождение и развитие коррозионных трещин и других повреждений при действии на стальные изделия и конструкции наводороживающих сред.

29.01.2012

**Список литературы:**

1. NACE Standard MR0175-2002. Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for Oilfield Equipment. 2002 г. – 36с.
2. Гафаров, Н.А. Коррозия и защита оборудования сероводород-содержащих нефтегазовых месторождений / Н.А. Гафаров, А.А. Гончаров, В.М. Кушнаренко. – М.: Недра, 1998. – 437 с.

Сведения об авторах

**Чирков Юрий Александрович**, доцент кафедры ДМиПМ

Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, доцент

**Кушнаренко Владимир Михайлович**, заведующий кафедрой ДМиПМ

Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор,

e-mail: vmkushnarenko@mail.ru

**Фот Андрей Петрович**, главный ученый секретарь Оренбургского государственного университета,

доктор технических наук, профессор, e-mail: fot@mail.osu.ru

**Репях Виталий Сергеевич**, преподаватель кафедры ДМиПМ

Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук

**Ставишенко Виктор Геннадьевич**, доцент кафедры ДМиПМ

Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел.: (3532) 372561; 375989

**UDC 531.49.09**

**Kushnarenko V.M., Chirkov Yu.A., Fot A.P., Repyach V.S., Stavishenko V.G.**

Orenburg state university, e-mail: vmkushnarenko@mail.ru; fot@mail.osu.ru

**THE MECHANISM OF DAMAGE OF DETAILS AND DESIGNS AT INFLUENCE NAVODOROZHIVAYUSHCHIKH OF ENVIRONMENTS**

In article the main reasons for destruction of details and designs are considered at influence of navodorozhivayushchy environments. The mechanism of corrosion cracking and hydrogen stratification of steel products and the designs contacting to navodorozhivayushchy environments is presented.

Key words: navodorozhivaniye, crack, destruction.

**Bibliography:**

1. NACE Standard MR0175-2002. Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for Oilfield Equipment. 2002 - 36s.
2. Gafarov, N. Corrosion and Protection Equipment hydrogen sulfide-containing gas fields / N.A. Gafarov, A.A. Goncharov, V.M. Kushnarenko. – Moscow: Nedra, 1998. – 437 p.