



УДК 669.018.8

DOI 10.17073/0368-0797-2024-3-340-350



Оригинальная статья

Original article

ПРОБЛЕМЫ ПОДБОРА КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ ПОД УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. С. Федоров[✉], В. С. Карасев, Е. Л. Алексеева,
А. А. Альхименко, Н. О. Шапошников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

✉ fedorov_as@spbstu.ru

Аннотация. Коррозионностойкие стали и сплавы обладают рядом уникальных свойств, позволяющих использовать их в различных отраслях промышленности. Однако, несмотря на свое название, они в той или иной мере подвержены различным видам коррозионных и коррозионно-механических повреждений. В данной работе рассматриваются случаи коррозионного разрушения изделий из коррозионностойких сталей и сплавов в нефтегазовой отрасли. Установлено, что причинами разрушения могут стать как некорректная эксплуатация и некачественный материал изделий, так и некорректный подбор материала под условия эксплуатации. Для каждой группы причин отказа рассмотрены примеры из открытых источников и из практики коллектива авторов работы. Обоснована важность проведения предварительных лабораторных исследований коррозионностойких материалов и их испытаний с воспроизведением факторов среды для обоснованного выбора под конкретные условия эксплуатации. Показано, что на практике обоснованному выбору коррозионностойких материалов не всегда уделяется должное внимание, поэтому кажущиеся на первый взгляд экономически выгодными решения могут оказаться некорректными. Основной фокус сделан на практической стороне вопроса для того, чтобы в будущем избежать подобных проблем. Актуальность работы подтверждается остро стоящей в последнее время проблемой замещения зарубежных марок сталей.

Ключевые слова: коррозионностойкие стали и сплавы, обоснованный выбор, причины разрушений, условия эксплуатации, некорректная эксплуатация, лабораторные испытания, физическое моделирование

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы Исследовательского центра мирового уровня: Передовые цифровые технологии (соглашение № 075-15-2022-311 от 20.04.2022).

Для цитирования: Федоров А.С., Карасев В.С., Алексеева Е.Л., Альхименко А.А., Шапошников Н.О. Проблемы подбора коррозионностойких сталей и сплавов в нефтегазовой отрасли под условия эксплуатации. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(3):340–350.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-340-350>

PROBLEMS OF SELECTION OF CORROSION-RESISTANT STEELS AND ALLOYS IN OIL AND GAS INDUSTRY FOR OPERATING CONDITIONS

A. S. Fedorov[✉], V. S. Karasev, E. L. Alekseeva,
A. A. Al'khimenko, N. O. Shaposhnikov

■ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29 Politekhnicheskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation)

✉ fedorov_as@spbstu.ru

Abstract. Corrosion-resistant steels and alloys have a number of unique properties. This allows them to be used in various industries. Despite their name, they are to some extent subject to various types of corrosion and corrosion-mechanical damage. This article discusses cases of corrosion damage of products made of corrosion-resistant steels and alloys in the oil and gas industry. The reasons of material failure can be incorrect exploitation of material, low-quality material of products, and incorrect selection of material for operating conditions. For each group of failure causes the examples from open sources and from the practice of the team of authors of this work are considered. The paper substantiates the importance of preliminary laboratory studies of corrosion-resistant materials and their testing with simulation of environmental factors. It is necessary for reasonable choice under specific operating conditions. It is shown that in practice the reasonable choice of corrosion-resistant materials is not always given due attention, so the seemingly economically favorable solutions may turn out to be incorrect. The main focus is made on the practical side of the issue in order to avoid such problems in the future. The relevance of the work is confirmed by the recent acute problem of substitution of foreign steel grades.

Keywords: corrosion-resistant steels and alloys, reasonable selection, causes of failure, operating conditions, incorrect operation, laboratory tests, physical simulation

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the World Class Research Centre Program: Advanced Digital Technologies (Agreement No. 075-15-2020-311 dated 20.04.2022).

For citation: Fedorov A.S., Karasev V.S., Alekseeva E.L., Al'khimenko A.A., Shaposhnikov N.O. Problems of selection of corrosion-resistant steels and alloys in oil and gas industry for operating conditions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(3):340–350.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-340-350>

ВВЕДЕНИЕ

Коррозионностойкие стали и сплавы занимают особую роль в различных отраслях промышленности [1–4]. Обладая повышенной коррозионной стойкостью в сочетании с требуемыми механическими свойствами [5–7], коррозионностойкие материалы используются в агрессивных условиях, где от них требуется долговечность без потери эксплуатационных характеристик [8; 9]. Исторически сложилось так, что высокая стоимость коррозионностойких материалов ограничивала их использование. Тем не менее, с течением времени понимание преимуществ коррозионностойких материалов привело ко все большему распространению изделий из них, в частности, за счет оптимизации состава и свойств для применения в специфических средах в узлах и конструкциях ответственного назначения [10–12]. На данный момент коррозионные стали и сплавы используются для более ответственного, дорогого, сложного оборудования, где потенциальные риски, издержки или выгоды превосходят стоимость материала.

При этом для отечественной металлургии в настоящее время остро стоит проблема производства импортозамещающих марок коррозионностойких сталей и сплавов. Россия занимает 0,4 % общемирового производства коррозионностойкой стали, а выпускаемый объем продукции удовлетворяет не более 25 % потребления общего объема стали различными отраслями промышленности на внутреннем рынке [13–15]. Так, в 2021 г. в РФ было произведено 120 тыс. т коррозионностойкой стали, а импортировано из-за рубежа 463 тыс. т. При этом отечественные аналоги не всегда удовлетворяют требованиям конечного потребителя по показателям физико-механических и коррозионных свойств.

Большой проблемой также является то, что отечественная нормативно-техническая документация (НТД), содержащая требования к технологии производства и оценке качества продукции из коррозионностойких сталей и сплавов, либо является устаревшей и содержит минимальные требования к продукции, либо вовсе отсутствует.

Актуальность данного исследования заключается в том, что, с одной стороны, появилось большое количество запросов по импортозамещению, подбору, сравнительной оценке свойств нержавеющей сталей

и сплавов для внедрения отечественных продуктов, оборудования и технологий, а с другой – данные из открытых источников и многолетний опыт анализа причин разрушений НТК «Новые технологии и материалы» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Также стоит добавить, что рассуждения на тему разрушений и тем более их открытый анализ – тема очень спорная, так как ведет за собой поиск виновных и наказание, однако в данной работе авторы сфокусировались на научной или практической стороне вопроса для того, чтобы в будущем избежать подобных проблем.

ОБЗОР РАЗРУШЕНИЙ

Проведение лабораторных испытаний и исследований является неотъемлемой частью обоснованного выбора материала под заданные условия эксплуатации или их диапазон [16–18]. В лабораторных условиях можно проводить как стандартные испытания по существующим методикам (ГОСТ, ASTM, ISO, DIN и пр.), так и исследовательские работы с моделированием агрессивных сред, приближенных к реальным объектам.

Как показывают многочисленные примеры из открытых источников, а также из многолетней практики авторов, зачастую выбор того или иного материала в зависимости от условий эксплуатации может быть некорректен [19–22]. Помимо этого, могут быть не учтены факторы монтажа, технологических воздействий [23–25] и взаимодействий с другими материалами [26–28], изменения условий эксплуатации, металлургическое качество [29–31]. Все это ведет к разрушениям и серьезным экономическим и экологическим последствиям.

В табл. 1–3 приведен обзор разрушений различных изделий из коррозионностойких материалов в нефтегазовой отрасли и показаны причины их разрушений. Анализ источников показал, что случаи разрушений можно сгруппировать по трем категориям: некорректная эксплуатация материала, некачественный материал изделий и некорректный подбор материала под условия эксплуатации. В число случаев с некорректной эксплуатацией вошли также те случаи, в которых произошло нарушение состояния поставки материала в процессе монтажа непосредственно на объекте – к примеру, при проведении сварочных работ при возведении конструкций из коррозионностойких сталей.

**Таблица 1. Обзор разрушений коррозионностойких материалов.
Некорректная эксплуатация материала**

**Table 1. Overview of damage to corrosion-resistant materials.
Incorrect exploitation of material**

Номер	Материал	Изделие	Отказ/причины	Источник
1	UNS S32760 0,025 % C – 25 % Cr – 7,5 % Ni – 3,8 % Mo – 0,25 % N – – 0,57 % Cu – 0,5 % W	Сварная труба для транспортировки нефти	Труба вышла из строя через один месяц эксплуатации по причине того, что в зоне термического влияния (ЗТВ) возникли питтинги из-за образования σ -фазы в количестве 8 об. % в процессе нагрева перед сваркой.	[20]
2	UNS S31803 0,016 % C – 22,4 % Cr – – 5,8 % Ni – 3,1 % Mo – – 0,17 % N – 0,55 % Si	Ректификационная колонна	Материал проявил высокую скорость общей коррозии всего за несколько месяцев использования. Колонна работала в бескислородной среде с избытком серной кислоты в жидкости, что препятствовало образованию стабильной пассивной пленки на поверхности стали.	[21]
3	UNS S32750 0,020 % C – 24,2 % Cr – – 8,7 % Ni – 3,8 % Mo – – 0,22 % N – 0,5 % Si – – 0,1 % Cu – 0,38 % Mn	Сварной сосуд высокого давления	Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) в ЗТВ. При сварке в ЗТВ образовалась σ -фаза в количестве 2 об. %. Эксплуатационная среда была насыщена хлоридами (~220 ppm), а температура эксплуатации составляла 110 °С. Щелевая коррозия способствовала распространению КРН по границам феррита и аустенита.	[22]

**Таблица 2. Обзор разрушений коррозионностойких материалов.
Некачественный материал изделий**

**Table 2. Overview of damage to corrosion-resistant materials.
Low-quality material**

Номер	Материал	Изделие	Отказ/причины	Источник
1	UNS S32900 0,040 % C – 25 % Cr – 4 % Ni – – 1,5 % Mo – 0,5 % Si – 0,5 % Mn	Шток двухдискового запорного клапана	Вышел из строя после 30 лет эксплуатации в среде, содержащей сероводород (pH = 4, температура эксплуатации 128 °С) по причине сульфидного коррозионного растрескивания под напряжением (СКРН). Трещина СКРН преимущественно распространялась в феррите и вдоль границы феррита и аустенита из-за присутствия σ -фазы. Несмотря на то, что шток отработал 30 лет, при корректно проведенной термической обработке он мог бы прослужить дольше.	[23]
2	UNS S32304 0,020 % C – 23,7 % Cr – – 4,2 % Ni – 0,3 % Mo – – 0,09 % N – 0,67 % Si – – 0,31 % Cu – 1,4 % Mn	Сварная гибкая труба	Труба подверглась межкристаллитной коррозии, которая привела к трещинам в сварных швах. Причиной этого послужил избыток феррита (~70 %) в сварном шве и дополнительное присутствие неблагоприятных нитридов хрома по границам феррита и аустенита. Избыточное содержание феррита возникло из-за низких значений погонной энергии, используемой в процессе сварки.	[24]

**Таблица 2 (продолжение). Обзор разрушений коррозионностойких материалов.
Некачественный материал изделий**

**Table 2 (continuation). Overview of damage to corrosion-resistant materials.
Low-quality material**

Номер	Материал	Изделие	Отказ/причины	Источник
3	AISI 304 0,052 % C – 17,1 % Cr – 8,1 % Ni – 0,1 % Mo – 0,36 % Si – 1,02 % Mn	Конвекционная труба геотермальной воды	Некорректная термообработка перед вводом трубы в эксплуатацию привела к провоцирующему нагреву, который повышает склонность к межкристаллитному растрескиванию. Остаточные напряжения, возникающие в процессе производства, также способствовали процессу разрушения. Наличие хлоридов в рабочей среде вызвало появление трещин КРН. На начальной стадии трещины КРН распространялись по границам аустенитных зерен, а затем они трансформировались в сосуществующий режим межкристаллитного и транскристаллитного растрескивания. Авторы объясняют отказ трубы синергическим эффектом провоцирующего нагрева, наличия хлоридов и остаточных напряжений.	[25]
4	14X17H2 0,135 % C – 16,8 % Cr – – 1,66 % Ni – 0,51 % Si – – 0,58 % Mn	Фланец запорной арматуры	Неоднородность структуры, а также большое содержание карбидов хрома по границам зерен. Помимо единичных питтингов и локальных участков с коррозионными поражениями, было обнаружено межкристаллитное разрушение поверхности металла. Неудовлетворительное металлургическое качество фланца усугубилось активным протеканием коррозионных процессов в агрессивной среде, содержащей хлориды. Как итог – сталь данного производства непригодна для эксплуатации в условиях морской воды.	НТК «Новые технологии и материалы»
5	AISI 904L 0,011 % C – 20,7 % Cr – – 23,2 % Ni – 4,2 % Mo – – 0,32 % Si – 1,46 % Cu – – 1,16 % Mn	Стальной прокат	В данном случае причиной межкристаллитной коррозии явилось наличие избыточных фаз, расположенных по границам аустенитных зерен основного металла и в междендритных пространствах сварного соединения, а также микропоры, которые послужили концентраторами для распространения трещин МКК.	НТК «Новые технологии и материалы»
6	EN 1.4469 (GX2CrNiMoN26-7-4) 0,020 % C – 27,3 % Cr – – 7,5 % Ni – 4 % Mo – 0,67 % Si – 0,55 % Cu – 0,59 % Mn – – 0,2 % N – 0,05 % Ti	Литые компоненты центробежных насосов	Основной причиной пониженной стойкости к щелевой коррозии изделия явилось наличие зернограницных выделений σ -фазы (6,7 об. %), обедняющей твердый раствор легирующими элементами, которые отвечают за коррозионную стойкость, таких как хром и молибден.	НТК «Новые технологии и материалы»
7	07X16H6 0,040 % C – 15,2 % Cr – 6,6 % Ni – 0,64 % Si – 0,16 % Cu – 0,49 % Mn	Рабочее колесо первой ступени ротора	Причиной разрушения явилось наличие структурной неоднородности и выделения карбидов по границам фаз. Данные факторы привели к разрушению колеса по механизму КРН.	НТК «Новые технологии и материалы»

**Таблица 3. Обзор разрушений коррозионностойких материалов.
Некорректный подбор материала под условия эксплуатации**

**Table 3. Overview of damage to corrosion-resistant materials.
Incorrect selection of material for operating conditions**

Номер	Материал	Изделие	Отказ/причины	Источник
1	42ХФА (AISI 4130) 0,30 % C – 1 % Cr – 0,2 % Mo – 0,25 % Si – 0,5 % Mn	Шпонка	Возникновение контактной коррозии в месте контакта шпонки со штоком запорной арматуры. Отказ привел к выбросу перекачиваемого флюида в окружающую среду.	[26]
	22Cr (DSS) 0,03 % C – 22,5 % Cr – 5,5 % Ni – 3 % Mo – 1 % Mn	Шток запорной арматуры		
2	AISI 410 0,07 % C – 13 % Cr – 0,5 % Ni – 0,3 % Mo – 0,2 % Si – 0,5 % Mn	Лопатки паровой турбины	Преобладающим механизмом является усталостное разрушение, вызванное изменяющимися условиями работы лопаток в поступающем паре. Наличие коррозионных язв и межкристаллитных трещин способствовало активизации коррозионной усталости. Циклическое нагружение при высоких температурах привело к быстрому росту и распространению трещин.	[27]
3	Super 13Cr 0,03 % C – 13 % Cr – 6 % Ni – 1,7 % Mo – 0,3 % Si – 0,1 % Cu – 0,7 % Mn – 0,09 % N	Трубопровод скважины Resak А-6 в Малайзии	На всех поверхностях излома извлеченных компонентов разрушения обнаружены межкристаллитные трещины. Присутствие кислорода, CO ₂ и H ₂ S в соляном растворе СаСl ₂ послужило наиболее вероятной причиной разрушения. Результаты лабораторных испытаний показали, что данная сталь подвержена КРН в среде эксплуатации при температуре пластовой воды скважины.	[28]
4	12X18H9 (AISI 304) 0,05 % C – 18,1 % Cr – 8,1 % Ni – 0,05 % Mo – 0,5 % Si – 0,05 % Cu – 1,22 % Mn	Теплообменные элементы аппарата низкотемпературной сепарации природного газа	Согласно утвержденной проектной документации, материалом для теплообменного аппарата должна была служить сталь 12X18H10T (AISI 321). Однако в ходе исследований была обнаружена подмена данной марки стали на 12X18H9 (AISI 304). Основной причиной разрушения стало нарушение требований проектной документации в части несогласованного изменения марки стали. Это привело к некорректному выбору режима сварки, который способствовал активации металла в зоне термического влияния стали, нестабилизированной титаном, в результате чего под воздействием коррозионной среды образовались сквозные питтинги.	НТК «Новые технологии и материалы»
5	05X16H4Д2Б 0,020 % C – 13 % Cr – 4 % Ni – 0,18 % Si – 2,1 % Cu – 0,32 % Mn	Вал насоса	Твердость данного материала не соответствовала сертификату качества на материал и не удовлетворяла требованиям стандарта NACE MR0175. При проведении лабораторных испытаний на стойкость к СКРН разрушение во всех случаях произошло в течение первых суток с начала испытаний.	НТК «Новые технологии и материалы»

Рассмотрим подробнее наиболее интересные случаи повреждений и способов решения возникших проблем из каждой категории.

Некорректная эксплуатация материала. Разберем пример из открытых источников. Авторы работы [21] анализировали причины коррозионных повреждений ректификационной колонны установки по производству ацетата целлюлозы, изготовленной из дуплексной стали UNS S31803. Технологическая жидкость представляла собой водный раствор 80 %-ной уксусной кислоты, который отделялся ректификацией. Вследствие неполной нейтрализации серной кислоты в технологической жидкости, используемой в качестве катализатора гидролиза эфиров, колонна работала в восстановительной среде, что препятствовало образованию стабильной пассивной пленки на поверхности металла.

Для решения этой проблемы авторы предложили модификацию состава технологической жидкости. Путем добавления перекиси водорода в лабораторных условиях они создали окислительные условия, способствующие образованию устойчивой пассивной пленки. Основываясь на результатах лабораторных исследований, в работающую колонну непрерывно добавляли перекись водорода. Этот подход оказался успешным для того, чтобы остановить коррозионные процессы вплоть до следующей остановки установки для планового технического обслуживания.

Некачественный материал изделий. Рассмотрим случай из практики авторов, связанный с межкристаллитным разрушением, на примере стального проката AISI 904L. Перед введением материала в эксплуатацию необходимо было провести приемосдаточные испытания на стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК). Испытания проводили по ГОСТ 6032 – 2017 по методу ВУ в кипящем водном растворе сернокислого окисного железа ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) и серной кислоты (H_2SO_4) в колбе с обратным холодильником. Продолжительность выдержки в кипящем растворе составляла 48 ч. По окончании испытаний для обнаружения МКК образцы изгибали на угол 90° таким образом, чтобы оценить растрескивание основного металла и сварного соединения. На рис. 1, а, б показаны межкристаллитные трещины основного металла и металла сварного соединения.

В данном случае причиной межкристаллитной коррозии явилось наличие избыточных фаз, расположенных по границам аустенитных зерен основного металла и в междендритных пространствах сварного соединения, а также микропоры, которые послужили концентраторами для распространения трещин МКК. Таким образом, в ходе проведения лабораторных испытаний было установлено, что материал данного производства склонен к МКК. При введении данного проката в эксплуатацию существует большой риск его последующего растрескивания.

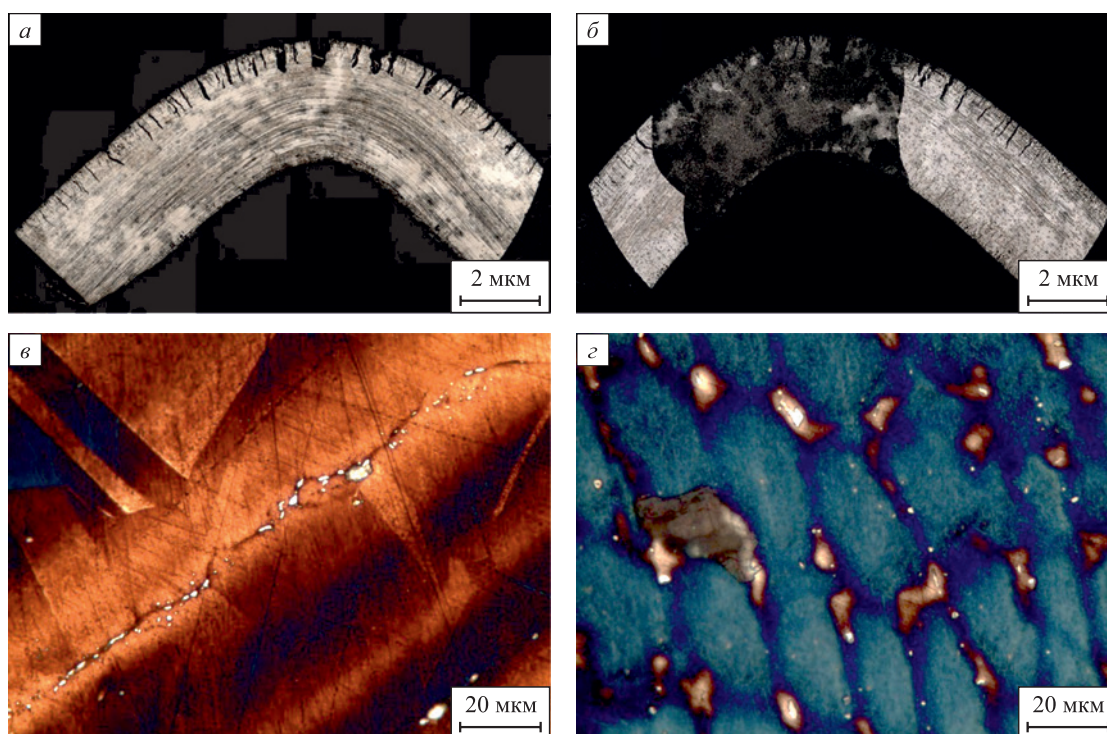


Рис 1. Межкристаллитные трещины в основном металле (а) и в сварном соединении (б), а также изображения избыточных фаз в основном металле (в) и в сварном соединении (г)

Fig. 1. Intergranular cracks in the base metal (a) and in the welded joint (b), and images of excess phases in the base metal (c) and in the welded joint (d)

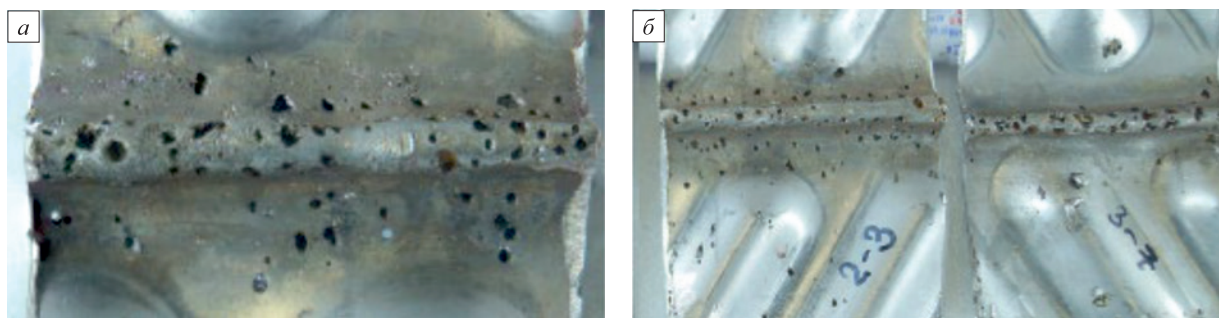


Рис. 2. Внешний вид коррозионных поражений в области сварного соединения теплообменных элементов аппарата низкотемпературной сепарации природного газа

Fig. 2. Appearance of corrosion damage in the area of welded joint of heat-exchange elements of low-temperature natural gas separation unit

Некорректный подбор материала под условия эксплуатации.

Рассмотрим разрушение теплообменных элементов аппарата низкотемпературной сепарации природного газа вследствие сквозной питтинговой коррозии в области сварного соединения из практики авторов (рис. 2). Согласно утвержденной проектной документации, материалом для него должна была служить сталь 12X18H10T (AISI 321) с содержанием Ti от 0,4 до 1,0 мас. %. Однако в ходе исследований была обнаружена подмена марки стали на 12X18H9 (AISI 304). С точки зрения стойкости к питтинговой коррозии стали 12X18H10T и 12X18H9 близки по коррозионным свойствам [32; 33], однако в случае со сваркой сталей, нестабилизированных титаном, коррозионная стойкость шва и околошовной зоны может быть значительно ниже основного металла [34]. Наличие титана обеспечивает образование благоприятных карбидов TiC вместо нежелательных карбидов $Cr_{23}C_6$, которые снижают коррозионную стойкость.

Таким образом, основная причина появления сквозных дефектов в данном случае – это нарушение требований проектной документации в части несогласованного изменения марки стали. Это привело к некорректному выбору режима сварки, который вызвал активацию металла в зоне термического влияния стали, нестабилизированной титаном, в результате чего под воздействием коррозионной среды образовались сквозные питтинги.

Дискуссия

Рассмотренное относительно небольшое количество разрушений поднимает глубокий пласт проблем, касающихся производства качественных коррозионностойких сталей и сплавов, подбора материалов под условия эксплуатации, неполноты существующей НТД, а также квалификации специалистов.

Проблема качества коррозионностойких материалов обширна и потому требует разработки и внедрения новой НТД, описывающей требования к качеству. Это долгосрочная и кропотливая работа, но тем не

менее в отечественной практике существуют удачные примеры таких разработок [35 – 38]. Стоит отметить, что в настоящее время единственный документ в нефтегазовой промышленности, относящийся к выбору и эксплуатации коррозионностойких сталей, это NACE MR0175, часть 3, который так и не был гармонизирован с ГОСТ. К тому же этот документ относится только к сероводородсодержащим средам, хотя в настоящее время становится все более актуальной оценка возможности эксплуатации сталей в CO_2 -содержащих средах [39].

Наконец, некорректный подбор материалов связан с отсутствием методик выбора и корректных методик оценки коррозионной стойкости. Руководства для подбора материалов, как правило, разрабатываются внутри компаний и подчинены внутренней политике, однако появившийся сравнительно недавно Институт нефтегазовых технологических инициатив (ИНТИ) постепенно может решать и такие вопросы. При этом разрабатываемые методики испытаний для оценки коррозионной стойкости материала должны учитывать воспроизведение агрессивных условий эксплуатации на объектах.

Так, для проведения физического моделирования в НТК «Новые технологии и материалы» существует большая испытательная база различных стенов и установок, которая позволяет испытывать материалы с воссозданием условий, максимально приближенных к эксплуатационным, в том числе и параметров потока. Коллективом авторов были спроектированы и изготовлены автоклавные установки различного объема (рис. 3, а), позволяющие проводить испытания при повышенном давлении и температуре как в статических, так и в динамических условиях [40]. В автоклавах также проводят испытания с участием сверхкритических флюидов.

Агрессивность среды может проявляться не только наличием коррозионно-активных агентов, но также наличием абразивных частиц, приводящих к абразивному износу. Совместное влияние этих двух факторов может заметно усугубить протекание процесса разрушения материалов. Смоделировать их совместное

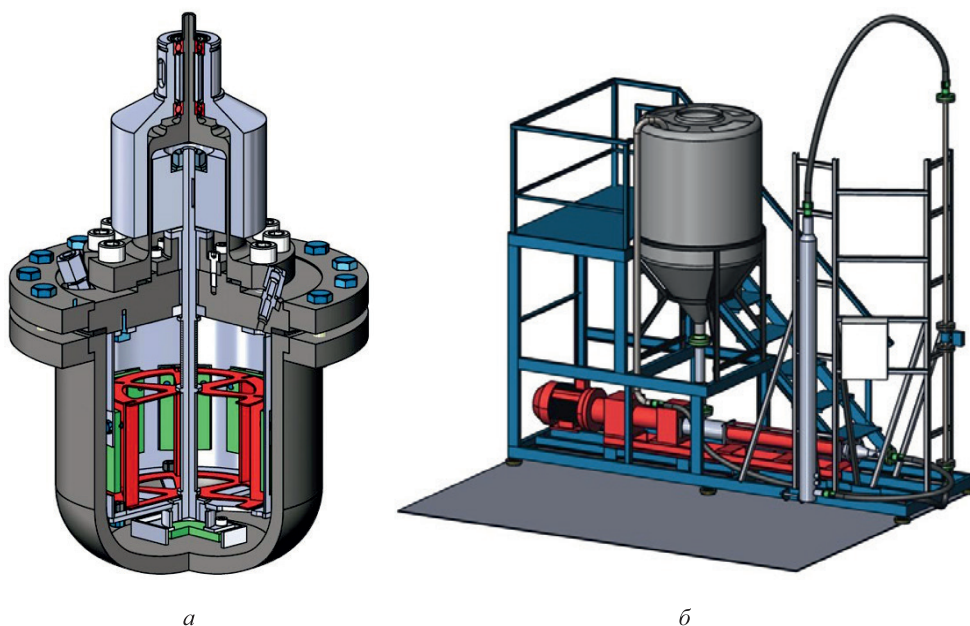


Рис. 3. Испытательная база для проведения физического моделирования с воспроизведением агрессивных условий эксплуатации: динамический автоклав с вращением (а); коррозионно-эрозионный стенд (б)

Fig. 3. Test facility for physical modelling with reproduction of aggressive operating conditions: dynamic autoclave with rotation (a); corrosion-erosion bench (b)

влияние возможно с использованием замкнутых стендов типа «flow-loop», в которых также учтены термобарические параметры и воздействие потока флюида (рис. 3, б).

Однако на проведение испытаний, в которых контролируется большое количество параметров среды, затрачивается много времени и ресурсов. Поэтому, используя результаты большого числа проведенных испытаний, создаются базы данных, учитывающие параметры, определяемые на стенде, которые в дальнейшем ложатся в математическую модель для разработки цифрового двойника.

Таким образом, обзор проблем, связанных с обоснованным выбором коррозионностойких сталей и сплавов в нефтегазовой отрасли, раскрывает важные аспекты, связанные с их эксплуатацией в агрессивных условиях.

В нефтегазовой отрасли материалы сталкиваются с агрессивными средами, высокими температурами, циклическими нагрузками и механическими напряжениями. При этом на практике обоснованному выбору коррозионностойких материалов не всегда уделяется должное внимание, поэтому кажущиеся на первый взгляд экономически выгодными решения могут оказаться некорректными. Впоследствии это может привести к серьезным проблемам и дополнительным расходам на замену или капитальный ремонт. Для успешного применения коррозионностойких материалов необходимо проводить предварительные лабораторные исследования с воссозданием факторов среды для подтверждения качества материала и его коррозионной стойкости в конкретных условиях эксплуатации. А для

разработки и внедрения эффективных решений необходимо тесное сотрудничество между инженерами, учеными, исследователями и производителями.

Выводы

Проведен обзор причин разрушений изделий из коррозионностойких материалов в нефтегазовой отрасли. Установлено, что причинами отказа материала могут стать как некорректные условия эксплуатации материала и некачественный материал изделий, так и некорректный подбор материала под условия эксплуатации. Для каждой группы причин отказа рассмотрены примеры из открытых источников и из практики коллектива авторов работы. Обоснована важность проведения предварительных лабораторных исследований коррозионностойких материалов и их испытаний с воспроизведением факторов среды для обоснованного выбора под конкретные условия эксплуатации. Показаны подходы, используемые коллективом авторов работы для проведения физического моделирования факторов среды с воссозданием реальных условий, в том числе и параметров потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники. *Все материалы. Энциклопедический справочник.* 2007;(5):7–27.
Kablov E.N. Materials for aerospace engineering. *Use materials. Entsiklopedicheskii spravochnik.* 2007;(5):7–27. (In Russ.).

2. Галкин М.П., Бродов А.А. Современные требования к производству специальных сталей и сплавов. *XV Международная конференция сталеплавателей*. 2018;23–26.
3. Omura K., Kunioka S., Furukawa M. Product development on market trends of stainless steel and its future prospects. *Nippon Steel Technical Report*. 2010;99:9–19.
4. Gardner L. The use of stainless steel in structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2005;7(2):45–55. <https://doi.org/10.1002/pse.190>
5. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали: учебник для вузов. Москва: МИСИС; 1999:408.
6. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы: Учебное пособие для вузов. Москва: Металлургия; 1993:416.
7. Fedorov A., Zhitenev A., Strekalovskaya D. Effect of heat treatment on the microstructure and corrosion properties of cast duplex stainless steels. *E3S Web of Conferences*. 2021;225:01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122501003>
8. Reck B.K., Rotter V.S. Comparing growth rates of nickel and stainless steel use in the early 2000s. *Journal of Industrial Ecology*. 2012;16(4):518–528. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00499.x>
9. Житенев А.И., Федоров А.С., Ковалев П.В., Стрекаловская Д.А., Альхименко А.А. Литая структура и свойства дуплексных нержавеющих сталей. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(5):323–332. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-323-332>
Zhitenev A.I., Fedorov A.S., Kovalev P.V., Strekalovskaya D.A., Al'khimenko A.A. Cast structure and properties of duplex stainless steels. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;65(5):323–332. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-323-332>
10. Hassel T., Maier H.J., Alkhimenko A., Davydov A., Shaposhnikov N., Turichin G., Klimova O. Investigation of the mechanical properties and corrosion behaviour of hybrid L80 Type 1 and duplex steel joints produced by magnetically impelled arc butt welding. *Journal of Advanced Joining Processes*. 2022;5:100109. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2022.100109>
11. Alekseeva E.L., Ermakov B.S., Gyulikhandanov E.L., Alkhimenko A.A., Lapechenkov A.A., Galata L. Influence of heat treatment on the corrosive and strength properties of the EP718 dispersion-hardening nickel alloy. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2022;63:63–70. <https://doi.org/10.3103/S1067821222010035>
12. Alekseeva E.L., Alkhimenko A.A., Kovalev M.A., Shaposhnikov N.O., Shishkova M.L., Devyaterikova N.A., Breki A.D., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Kutepov S.N. The evaluation of the corrosion properties of steel two-layer oil well tubing for oil extraction. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022;13:52–58. <https://doi.org/10.1134/S207511332201004X>
13. Седухин В.В. Совершенствование химического состава и технологии выплавки дуплексной марки стали, легированной азотом, в открытой индукционной печи: Диссертация ... кандидата технических наук. Южно-Уральский государственный университет; 2022.
14. Gowthaman P.S., Jeyakumar S., Saravanan B.A. Machinability and tool wear mechanism of Duplex stainless steel – A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020;26(2):1423–1429. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.295>
15. Baddoo N.R. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008;64(11):1199–1206. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.011>
16. Da Costa E.M., Dedavid B.A., Dos Santos C.A., Lopes N.F., Fraccaro C., Pagartanidis T., Lovatto L.P. Crevice corrosion on stainless steels in oil and gas industry: A review of techniques for evaluation, critical environmental factors and dissolved oxygen. *Engineering Failure Analysis*. 2022;144:106955. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106955>
17. Craig B.D., Smith L. Corrosion Resistant Alloys (CRAs) in the Oil and Gas Industry – Selection Guidelines Update. 3rd ed. Nickel Institute Technical Series; 2011:12.
18. Hill R., Perez A.L. New steels and corrosion-resistant alloys. *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*. 2017:613–626. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00026-7>
19. Machuca L.L., Pojtanabuntoeng T., Salgar-Chaparro S., Suarez E., Kinsella B., Darwin A. MIC Investigation of stainless steel seal ring corrosion failure in a floating production storage and offloading (FPSO) vessel. In: *Failure Analysis of Microbiologically Influenced Corrosion*. CRC Press; 2021:225–249.
20. Smiderle J., Pardal J.M., Tavares S.S.M., Vidal A.C.N. Premature failure of superduplex stainless steel pipe by pitting in sea water environment. *Engineering Failure Analysis*. 2014;46:134–139. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.08.001>
21. Colombo A., Trasatti S.P. Corrosion of an UNS S31803 distillation column for acetic acid recovery. *Engineering Failure Analysis*. 2015;55:317–326. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.07.017>
22. Linton V.M., Laycock N.J., Thomsen S.J., Klumpers A. Failure of a super duplex stainless steel reaction vessel. *Engineering Failure Analysis*. 2004;11(2):243–256. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2003.05.011>
23. Corleto C.R., Argade G.R. Failure analysis of dissimilar weld in heat exchanger. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2017;9:27–34. <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2017.05.003>
24. Tavares S.S.M., Scandian C., Pardal J.M., Luz T.S., Da Silva F.J. Failure analysis of duplex stainless steel weld used in flexible pipes in off shore oil production. *Engineering Failure Analysis*. 2010;17(6):1500–1506. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.05.012>
25. Liu M., Ni Z., Du C., Liu Z., Sun M., Fan E., Li X. Failure investigation of a 304 stainless steel geothermal tube. *Engineering Failure Analysis*. 2021;129:105694. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105694>
26. Sotoodeh K. A review and analysis of industrial valve material failures due to corrosion and proposals for prevention measures based on industrial experiences in the offshore sector of the oil and gas industry. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2021;21:261–267. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-01064-9>
27. Rivaz A., Anijdan S.M., Moazami-Goudarzi M. Failure analysis and damage causes of a steam turbine blade of 410 martensitic stainless steel after 165,000 h of working. *Engineering Failure Analysis*. 2021;113:104557. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104557>
28. Ueda M., Nakamura K., Hudson N., Ibrahim M.Z., Selamat K., Chen P. Corrosion behavior of super 13Cr marten-

- sitic stainless steels in completion fluids. In: *CORROSION* 2003. OnePetro; 2003.
29. Park J.H., Kang Y. Inclusions in stainless steels – A review. *Steel Research International*. 2017;88(12):1700130.
<https://doi.org/10.1002/srin.201700130>
 30. Fedorov A., Zhitenev A., Karasev V., Alkhimenko A., Kovalev P. Development of a methodology for the quality management of duplex stainless steels. *Materials*. 2022;15(17):6008.
<https://doi.org/10.3390/ma15176008>
 31. Mancini S., di Nunzio P.E., Notargiacomo S., Langellotto L. Defect reduction and quality optimization through the modelling of plastic deformation and metallurgical evolution. *Materials Science Forum*. 2021;1016:846–851.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.846>
 32. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. Москва: Металлургия; 1969:448.
 33. Groysman A. Corrosion for Everybody. Springer Science Business Media B.V.; 2010:382.
 34. Липольд Д.С., Котеки Д.Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета; 2011:467.
 35. Петров Н.Г. О задачах МТК 543/ТК 214 «Защита изделий и материалов от коррозии, старения и биоповреждений» и разработке нормативных документов противокоррозионной защиты. *Газотранспортные системы: настоящее и будущее (ГТС-2023). Тезисы IX Международной научно-технической конференции. Казань*; 2023:76–77.
 36. Kazakov A.A., Zhitenev A.I., Salynova M.A. Extension of ASTM E2283 standard practice for the assessment of large exogenous nonmetallic inclusions in super duty steels. *CIS Iron and Steel Review*. 2019;18:20–26.
<https://doi.org/10.17580/cisirs.2019.02.01>
 37. Казаков А.А., Житенев А.И., Колпишон Э.Ю., Салынова М.А. Количественная оценка неметаллических включений для поковок из сверхкрупных слитков. *Черные металлы*. 2018;(12):50–56.
 - Kazakov A.A., Zhitenev A.I., Kolpishon E.Yu., Salynova M.A. Quantitative assessment of non-metallic inclusions for forgings from super-large ingots. *Chernye metall*. 2018;(12):50–56. (In Russ.).
 38. Казаков А.А., Киселев Д.В., Казакова Е.И. Количественные методы оценки микроструктуры стали и сплавов для пересмотра устаревших ГОСТ. *Литье и металлургия*. 2021;(2):42–48.
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-42-48>
 - Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kazakova E.I. Quantitative methods for assessing the microstructure of steel and alloys for revising outdated GOST standards. *Lit'e i metallurgiya*. 2021;(2):42–48. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-42-48>
 39. Федоров А.С., Алексеева Е.Л., Алхименко А.А., Шапошников Н.О., Ковалев М.А. Исследование влияния параметров испытаний на оценку стойкости сталей к углекислотной коррозии. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021;87(12):36–41.
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-12-42-47>
 - Fedorov A.S., Alekseeva E.L., Al'khimenko A.A., Shaposhnikov N.O., Kovalev M.A. Study of the effect of test parameters on the assessment of steel resistance to carbon dioxide corrosion. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2021;87(12):36–41. (In Russ.).
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-12-42-47>
 40. Kruk P., Golubev I., Shaposhnikov N., Shinder J., Kotov D. The effect of the operation of downhole equipment on the processes of corrosive wear (by the example inflow control devices of nozzle type). *Materials*. 2022;15(19): 6731.
<https://doi.org/10.3390/ma15196731>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Сергеевич Федоров, инженер Научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ORCID: 0000-0003-2571-060X
E-mail: fedorov_as@spbstu.ru

Владимир Сергеевич Карасев, инженер Научно-образовательного центра «Северсталь-Политех», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ORCID: 0009-0006-9622-7243
E-mail: karasev_vs@spbstu.ru

Екатерина Леонидовна Алексеева, к.т.н., ведущий инженер, заведующий лабораторией Научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: alekseeva_el@spbstu.ru

Алексей Александрович Алхименко, директор Научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ORCID: 0000-0001-6701-1765
E-mail: a.alkhimenko@spbstu.ru

Никита Олегович Шапошников, исполнительный директор Научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы» центра НТИ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: shaposhnikovno@gmail.com

Aleksandr S. Fedorov, Engineer of the Scientific and Technological Complex “New Technologies and Materials”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
ORCID: 0000-0003-2571-060X
E-mail: fedorov_as@spbstu.ru

Vladimir S. Karasev, Engineer of the Scientific and Educational Center “Severstal-Polytech”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
ORCID: 0009-0006-9622-7243
E-mail: karasev_vs@spbstu.ru

Ekaterina L. Alekseeva, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, Head of the Laboratory of the Scientific and Technological Complex “New Technologies and Materials”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
E-mail: alekseeva_el@spbstu.ru

Aleksei A. Al'khimenko, Director of the Scientific and Technological Complex “New Technologies and Materials”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
ORCID: 0000-0001-6701-1765
E-mail: a.alkhimenko@spbstu.ru

Nikita O. Shaposhnikov, Executive Director of the Scientific and Technological Complex “New Technologies and Materials”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
E-mail: shaposhnikovno@gmail.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. С. Федоров – формирование основной идеи исследований, разработка методологии работы, анализ результатов исследований.

В. С. Карасев – разработка методологии работы, анализ результатов исследований.

Е. Л. Алексеева – формирование основной идеи исследований, постановка целей и задач работы.

А. А. Алхименко – формирование концепции, научное руководство.

Н. О. Шапошников – разработка плана исследований, научное руководство.

A. S. Fedorov – formation of the main research idea, development of the work methodology, analysis of research results.

V. S. Karasev – development of the work methodology, analysis of research results.

E. L. Alekseeva – formation of the main research idea, setting the tasks.

A. A. Al'khimenko – concept formation, scientific guidance.

N. O. Shaposhnikov – research plan development, scientific guidance.

Поступила в редакцию 11.09.2023

После доработки 03.11.2023

Принята к публикации 11.12.2023

Received 11.09.2023

Revised 03.11.2023

Accepted 11.12.2023