



**НОВАЯ  
СЕРВИСНАЯ  
КОМПАНИЯ**



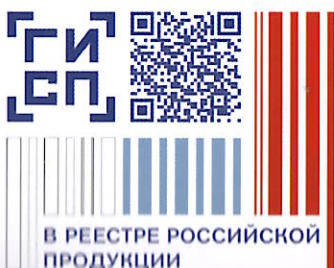
Петербургский  
международный  
газовый форум  
8 - 11 октября  
2024



Gassuf  
Москва  
22 - 24 октября  
2024



**ПЕРЕДВИЖНЫЕ  
КОМПРЕССОРНЫЕ  
И АЗОТНЫЕ СТАНЦИИ**



Научно-технический  
и информационный журнал

Журнал зарегистрирован  
в Минпечати РФ.  
Reg. свид. ПИ №7 - 11904

**Учредители**  
Ассоциация компрессорщиков  
и пневматиков.  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технологический  
университет».  
АО «НИИтурбокомпрессор  
им. В.Б. Шнеппа» (Группа ГМС).

**Издатель**  
ФГБОУ ВО «КНИТУ»

**Главный редактор**  
Хисамеев И.Г. - д.т.н., проф.,  
член-корр. АН РТ  
Khisamiyev I.G., d-r of Eng. Sc. Pnot,  
Corresponding Member of the AS RT  
igkhisameev@mail.ru

**Зам. главного редактора**  
Аляев В.А. - д.т.н., проф.  
Alyayev V.A., d-r of Eng. Sc. pnot

**Ответственный секретарь**  
Ханжин А.М. Khanzin70143@mail.ru

**Редакционная коллегия**  
Амин Хаджу - д.т.н. (Германия)  
Amin Haghjoo (Germany) PhD Technology  
Leader

**Бурмистров А.В. - д.т.н., проф.**  
Burmistrov A.V., d-r of Eng. Sc. Pnot.  
**Визгалов С.В. - к.т.н.**

Vizgalov S.V., cand. of Eng. Sc.  
**Галеркин Ю.Б. - д.т.н., проф.**  
Yu. B. Galerkin - d-r of Eng. Sc. Pnot.

**Демиков К.Е. - д.т.н., проф.**  
Demikhov K.E. - d-r of Eng. Sc. Pnot.

**Захаренко В.П. - д.т.н., проф.**  
Zakharenko V.P., d-r of Eng. Sc. Pnot.

**Игнатъев Д.К. - к.т.н. (США)**  
Ignatiev D.K. (USA), PhD (Eng).

**Кузнецов Л.Г. - д.т.н., проф.**  
Kuznetsov L.G., d-r of Eng. Sc. Pnot.

**Кулагин В.А. - д.т.н., проф.**  
Kulagin V.A., d-r of Eng. Sc. Pnot.

**Скрынник Ю.Н. - к.т.н.**  
Skrynik Yu.N., cand. of Eng. Sc.

**Сухомлинов И.Я. - д.т.н., проф.**  
Sukhomlinov I.Ya., d-r of Eng. Sc. Pnot.

**Цыганков А.В. - д.т.н., проф.**  
Tsigankov A.V., d-r of Eng. Sc. Pnot.

**Шайхутдинов А.З. - к.т.н.**  
Shaikhutdinov A.Z., cand. of Eng. Sc.

**Юша В.Л. - д.т.н., проф.**  
Yusha V.L., d-r of Eng. Sc. Pnot.

**Ян Крысинский - д.т.н., проф. (Польша)**  
Jan Krysiniski (Poland), D.Sc., PhD., D.h.c.

**Ян Кеннет Смит - д.т.н., проф. (Англия)**  
Jan Kenneth Smith (UK), B.Sc (Eng), DIC, PhD

**Дизайн и компьютерная верстка**  
Ханжина М.А.

**Адрес редакции**  
420015, Казань, ул. К.Маркса, 68.  
Тел. (843) 231-89-49

**Журнал входит в перечень ВАК РФ**  
Юридическую ответственность  
за достоверность рекламы несут  
рекламодатели. Полная или частичная  
перепечатка материалов допускается только  
с письменного разрешения редакции.

© «Компрессорная техника и пневматика», 1991  
Сдано в набор 2.09.2024  
Подписано в печать 18.09.2024  
Формат 60-90/8. Печать офсетная.  
Усл.-печ. л. 5.0. Заказ  
Отпечатано в ООО «ВИЗАРД»  
г. Казань, ул. Пр. Победы, д. 78, п. 413

# Компрессорная Техника и Пневматика

Compressors & Pneumatics

3/сентябрь  
2024

## СОДЕРЖАНИЕ

### Конференции

**И.И. Хабибуллин, Е.Е. Костылева.** XIX Международная научно-техническая конференция по компрессорной технике, посвященная 100-летию со дня рождения В. Б. Шнеппа ..... 2

### К 100-летию со дня рождения В.Б.Шнеппа

**И.Г. Галияхметов.** Владимир Борисович Шнепп. Воспоминания..... 5

### Расчет и проектирование

**А.В. Махонин, Л.Н. Маренина, В.Б. Семеновский, И.А. Максименко.** Расчет ступени центробежного компрессора с кольцевой сборной камерой методами вычислительной газодинамики ..... 8

**С.С. Бусаров, А.В. Недовенчаный, Р.Э. Кобыльский, И.С. Бусаров.** Разработка самодействующих клапанов с эластомерными элементами ..... 16

**С.А. Костарева, А.Г. Бузмаков.** Проектирование сборного ротора ЦБК ..... 21

### Техника

**М.А. Бирюков, А.С. Двойнишев, В.В. Котунов, А.Е. Ливанов.** Высокоскоростные электрические машины ВЭЛМА® и их применение ..... 25

### Методы контроля

**А.В. Костенко.** Метод контроля за местными и магистральными утечками сжатого воздуха ..... 31

**А.Л. Назолин, А.И. Куменко.** К вопросу создания штатной системы контроля крутильных колебаний экспериментального стенда АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» ..... 35

### Материалы

**Е.Н. Поморцев, З.Р. Габдрахманова, М.Г. Васингина, В. Сиверин, Д.В. Ляшенко.** Исследование коррозионной стойкости сталей, применяемых для изготовления деталей компрессорных установок ..... 41

### Компрессоростроители России

**Зухра Куб.** ТЕХНОЛОГИЯ сохранения отрасли ..... 46



Список литературы

1. Куменко А.И // Сб. материалов VI школы-семинара. Оценка и управление индустриальными рисками в промышленной безопасности. Мониторинг рисков сложных и уникальных объектов. 24 августа 2016 г., Омск, Россия. НПС «Риском». - С. 107–117.
2. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Общие методы. М.: Стандартинформ, 2010. - 43 с.
3. ISO 22266-1:2022. Mechanical vibration - Torsional vibration of rotating machinery - Part 1: Evaluation of steam and gas turbine generator sets due to electrical excitation. Switzerland: ISO, 2022. - 46 p.
4. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски / М.: Издательство стандартов, 2003. - 45 с.
5. Фельдман В.Д. Кинематометрия – история и современность. Известные и малоизвестные подробности о возможностях метода углубленного диагностирования технического состояния механических передач [Электронный ресурс] // режим доступа <http://oookin.ru/feldman2011.pdf>.
6. Морозов А.Н., Назолин А.Л., Павлов Д.А. Временные измерения кинематических и динамических параметров редукторов // Измерительная техника. 1999. № 4. - С. 58–60.
7. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Динамические системы с флуктуирующим временем / М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 200 с.
8. Назолин А.Л. Поляков В.И., Гнездилов С.Г. Диагностика целостности валопроводов по крутильным колебаниям // Теплоэнергетика, № 1, 2020. - С.32-43.
9. Назолин А.Л., Куменко А.И., Поляков В.И. Измерительный контроль и диагностика валопроводов турбоагрегатов по крутильным колебаниям / Известия вузов. Радиофизика. – Т. 66. №10. 2023. – С. 882-902.
10. Патент РФ 2782741. Устройство и способ мониторинга крутильных колебаний вращающегося вала (варианты) / А.И. Куменко, А.Л. Назолин, В.И. Поляков. Заявл. 07.09.2021 // 2022. Бюл. № 31.
11. Морозов А.Н., Назолин А.Л., Поляков В.И. Прецизионная оптико-электронная система мониторинга крутильных колебаний валопровода турбоагрегата // ДАН. 2017. Т. 472. № 2. - С.145–149.
12. Патент РФ 2579639. Способ обнаружения усталостного повреждения вала турбоагрегата / А.Н. Морозов, А.Л. Назолин, В.И. Поляков // Заявл. 06.05.2013// 2016. Бюл. № 10.
13. Патент РФ 2702923. Способ обнаружения повреждения вала роторного агрегата (варианты) / А.Л. Назолин, В.И. Поляков // Заявл. 21.05.2018 / /2019. Бюл. № 29.

УДК 669.1:66.018.83

## Исследование коррозионной стойкости сталей, применяемых для изготовления деталей компрессорных установок

Е.Н. Поморцев, З.Р. Габдрахманова, М.Г. Васингина, В. Сиверин  
(АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань)

Д.В. Ляшенко (ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»)

Данная работа посвящена исследованию коррозионной стойкости конструкционных материалов, применяемых в компрессоростроении, в средах, содержащих сероводород. В работе проведены испытания на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН) для образцов из стали 20, 09Г2С, 14Х2ГМР, 08Х18Н10Т и титанового сплава ВТ6С. Испытания проводились, в соответствии с методикой NACE TM 0177-2016, метод А, в растворах, имитирующих условия эксплуатации компрессорного оборудования в нефтегазовой промышленности. Определены марки материалов, которые являются наиболее стойкими в сероводородсодержащих средах. **Ключевые слова:** компрессоростроение, конструкционные материалы, сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением (СКРН), испытания образцов.

*Investigation of the corrosion resistance of steels used for the manufacture of compressor parts*

E.N. Pomortsev, Z.R. Gabdrakhmanova, M.G. Vasingina, V. Siverin  
(NII turbocompressor named after V.B. Shnepp, HMS Group, Kazan)

D.V. Lyashenko (FGAOU VO «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University», St. Petersburg)

This work is devoted to the study of corrosion resistance of structural materials used in compressor engineering in environments containing hydrogen sulfide. The work carried out tests for resistance to sulfide stress cracking (SSC) for samples made of steel 20, 09G2C, 14X2GMR, 08X18N10T and titanium alloy VT6C. The tests were carried out in accordance with the NACE TM0177-2016 methodology, method A, in solutions simulating the operating conditions of compressor equipment in the oil and gas industry. The grades of materials that are the most resistant in hydrogen sulfide-containing media have been determined.

**Keywords:** compressor engineering, construction materials, sulfide stress cracking (SSC), sample testing.

Компрессоростроение, в значительной степени, определяет технический уровень и эффективность топливно-энергетического, химического, машиностроительного и других отраслей промышленности. Современные темпы развития промышленности предъявляют высокие требования к технологическому оборудованию, в том числе и к компрессорным установкам. Основной проблемой, с точки зрения обеспечения надёжной эксплуатации нефтегазового оборудования, является защита от коррозии [1–4].

Прогнозирование скорости коррозии и срока службы аппаратов требует четкого понимания механизма коррозионных процессов, в которых, в равной степени, участвуют металл и коррозионная среда, поэтому характеристика среды и условия эксплуатации, наряду со свойствами металла, влияют на интенсивность коррозии и характер разрушения.

Газовые смеси ряда нефтяных и газовых месторождений характеризуются наличием активных компонентов, в их числе – сероводород (H<sub>2</sub>S). По степени воздействия на коррозионный процесс се-

рководород считается наиболее сильным из известных стимуляторов коррозии, приводящий к охрупчиванию и растрескиванию металла. Прогнозирование коррозионных процессов, а также степени, возможного коррозионного влияния на металл, являются крайне важными задачами при проектировании оборудования.

Материальное исполнение играет ключевую роль в работоспособности компрессорного оборудования. В целом, это сложный и ответственный процесс, где задачей выступает подбор такого материала, который, наряду с доступностью, обладал бы достаточной надёжностью, с точки зрения эксплуатационных свойств и коррозионной стойкости.

Стоит также отметить, что, зачастую, заказчики компрессорного оборудования указывают на необходимость соответствия, применяемых материалов, актуальным международным стандартам – NACE MR0103, NACE MR0175, российским стандартам – ГОСТ Р 53679, ГОСТ Р 53678. В данных стандартах указаны, необходимые требования к выбору материалов, для применения в средах, содержащих серо-

25–28 февраля  
**2025**

29-я международная специализированная выставка

Салоны:  
• Обработка поверхности  
• Покртия со специальными свойствами  
• Защита от коррозии

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

Мелодии краски  
**Интерлакокрашка**  
[www.interlak-expo.ru](http://www.interlak-expo.ru)

ЭКСПОЦЕНТР

реклама





водород, при добыче нефти и газа. Однако, в данных стандартах отсутствуют ссылки на марки сталей по российским стандартам, применяемых при проектировании компрессорных установок.

В связи с этим, проведение исследований закономерностей процессов коррозионного поведения конструкционных сталей, применяемых в нефтегазовом оборудовании, является актуальным направлением развития материалов и технологий и представляет практический интерес.

Цель работы – исследование коррозионной стойкости конструкционных материалов в технологических средах, с содержанием сероводорода и определение возможности их применения, при изготовлении деталей компрессорного оборудования.

Работа выполнена на испытательных стендах лаборатории ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

В качестве объектов исследования были выбраны конструкционные материалы, в основном, широко применяемые в компрессоростроении, а также материалы, рекомендованные к работе в среде сероводорода.

Химический состав и механические свойства, исследуемых сталей и сплавов, приведены в таблице 1.

Проведенный химический анализ показал, что исследуемые материалы соответствуют требованиям по химическому составу нормативно-технической документации.

Исследования проведены на образцах, изготовленных, согласно эскиза, представленного на рис. 1. Испытывались образцы основного металла в состоянии послековки и последующей термообработки, а также со сварным и паяным соединениями. Из

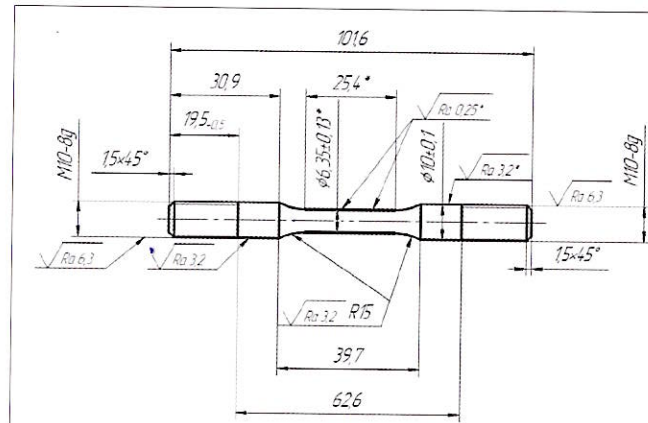


Рисунок 1 - Образец для испытаний на растрескивание под действием напряжения в сульфидсодержащей среде (SSC)

опытного материала испытывалось не менее трех образцов.

Испытания проводились на образцах по методике, описанной в стандарте NACE TM 0177-2016, метод А – испытание на растяжение, с целью определения максимального, одноосного, растягивающего напряжения, без разрушения образца в течение 720 ч. Испытания проводили в растворах А и С. Раствор А представляет собой, насыщенный сероводородом, раствор, содержащий 5,0 вес.% хлорида натрия и 0,5 вес.% ледяной уксусной кислоты, растворенных в дистиллированной воде с уровнем pH 2,6-2,8. Раствор С представляет собой водный раствор хлорида натрия, в котором содержание хлорида, парциальное давление H<sub>2</sub>S и pH, воспроизводят, предполагаемые условия эксплуатации. Температура испытаний составляла 22-23°C. Образцы испытывались при на-

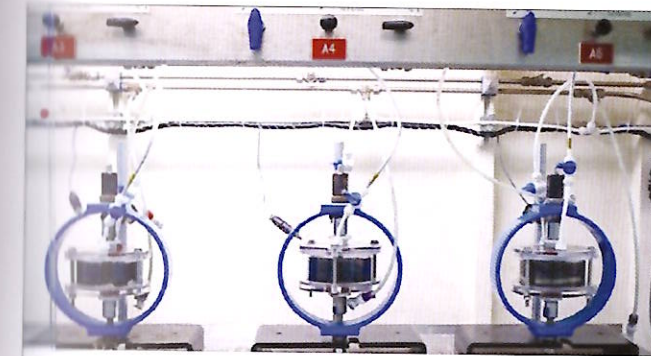


Рисунок 2 - Установка «Cortest» для проведения испытаний на стойкость к СКРН по стандарту NACE TM0177, метод А

грузке в 70%, 80% и 90% от фактического предела текучести материала. Общее время испытаний составило 720 часов. На рис. 2 приведен внешний вид установки для испытаний заготовки.

Стойкость материалов к сероводородному растрескиванию определяли по времени до разрушения образцов в испытываемой среде, при заданной нагрузке. Все образцы из опытной партии, не разрушившиеся в результате испытаний за 720 часов, формально

считаются прошедшими испытание, при заданной нагрузке. Однако, после испытаний металл может быть охрупчен и ослаблен, может содержать заметное количество, достаточно крупных, трещин. В виду этого, также проводилась визуальная оценка образцов после испытаний на наличие или отсутствие трещин.

Результаты испытаний, исследуемых сталей и сплавов, представлены в таблице 2.

В результате проведенных испытаний на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением установлено, что:

1) образцы из стали 20, нагруженные до 70% от предела текучести, выдержали 720 часов испытаний, однако, на поверхности образцов обнаружены трещины (рис. 3), что свидетельствует о склонности к сероводородному растрескиванию.

2) образцы из стали 09Г2С, нагруженные до 70% от предела текучести, выдержали 720 часов испытаний и не проявили склонности к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (рис. 4а). Сварные образцы из стали 09Г2С, нагруженные до 70% от предела текучести, также выдержали весь период испытаний (рис. 4б).

Результаты испытаний сталей и сплавов

Таблица 2

Марка материала	Состояние образца	Раствор	Напряжение от предела текучести	Результат испытаний
Сталь 20	Основной металл	С	70%	образцы не разрушались, но обнаружены трещины
Сталь 09Г2С	Основной металл Закалка (900°C) +отпуск (650°C)	С	70%	образцы выдержали испытания
	Сварной Св. 08Г2С + отпуск (620°C)	С	70%	образцы выдержали испытания
Сталь 14Х2ГМР	Основной металл Закалка (925°C) + отпуск (570°C) + отпуск (620°C)	С	70%	образцы выдержали испытания
		С	90%	образцы выдержали испытания
	Сварной Электрод OK Aristrod 12.50 + отпуск (620°C)	С	80%	образцы не выдержали испытания
		С	70%	образцы выдержали испытания
Сталь 08Х18Н10Т	Основной металл Закалка (1050°C)	С	70%	образцы выдержали испытания, обнаружены питтинги
		С	70%	образцы выдержали испытания
	Сварной AWS A 5.9: ER 347Si	С	70%	образцы выдержали испытания
		А	70%, 80%	образцы выдержали испытания
Сплав ВТ6С	Основной металл Отжиг (950°C) + Отжиг (900°C)	А	70%, 80%	образцы выдержали испытания
		А	70%, 80%	образцы выдержали испытания

Химический состав и механические свойства исследуемых материалов

Таблица 1

Марка материала	Массовая доля элементов согласно сертификата качества, %											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ti	V
<b>Сталь 20</b>	0,20	0,24	0,43	0,015	0,005	0,04	0,03	0,01	-	-	-	-
ГОСТ 1050-2013	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	≤0,030	≤0,035	≤0,25	≤0,30	≤0,30	-	-	-	-
<b>Сталь 09Г2С</b>	0,09	0,57	1,40	0,014	0,011	0,17	0,28	0,23	-	-	-	0,01
ГОСТ 19281-2014	≤0,12	0,50-0,80	1,30-1,70	≤0,030	≤0,035	≤0,30	≤0,30	≤0,30	-	-	-	≤0,12
<b>Сталь 14Х2ГМР</b>	0,11	0,28	0,95	0,010	0,007	1,42	0,28	0,18	0,42	-	-	-
ОСТ 108.958.04-85	0,10-0,16	0,17-0,37	0,90-1,20	≤0,030	≤0,030	1,30-1,70	≤0,30	-	0,40-0,50	-	-	≤0,08
<b>Сталь 08Х18Н10Т</b>	0,07	0,36	0,93	0,036	0,005	17,25	9,30	-	0,19	-	0,58	0,04
Гост 5632-2014	≤0,08	≤0,80	≤2,00	≤0,040	≤0,020	17,00-19,00	9,00-11,00	-	-	-	5·С-0,70	-
<b>Сплав ВТ6С</b>	0,02	0,02	-	-	-	-	-	-	-	6,2	осн.	4,3
Гост 19807-91	≤0,10	≤0,15	-	-	-	-	-	-	-	5,3-6,5	осн.	3,5-4,5





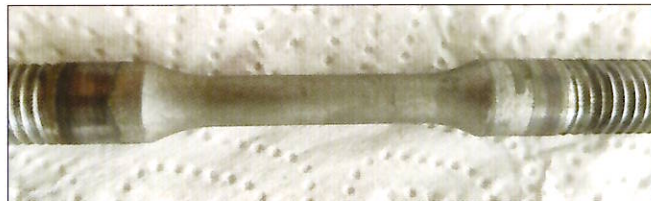
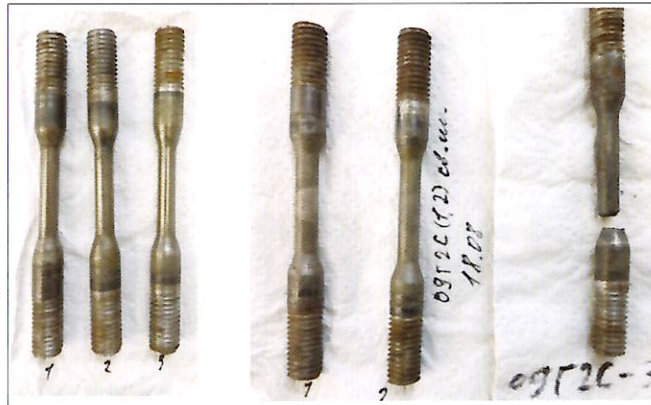


Рисунок 3 - Образец из стали 20 (основной металл) после испытаний на СКРН в растворе С



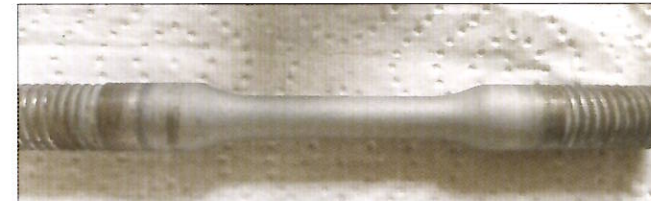
а) основной металл б) сварной образец

Рисунок 4 - Образцы из стали 09Г2С после испытаний на СКРН в растворе С

3) образцы из стали 14Х2ГМР, нагруженные до 70% и 90% от предела текучести в растворе С, выдержали 720 часов испытаний и не проявили склонности к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (рис. 5а, б). В растворе А образцы из стали 14Х2ГМР, нагруженные до 80%, не выдержали испытания. Сварные образцы из стали 14Х2ГМР, нагруженные до 70% от предела текучести, выдержали 720 часов испытаний и не проявили склонности к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением. Сварные образцы из стали 14Х2ГМР, нагруженные до 90% от предела текучести, разрушились, не выдержав весь период испытаний (рис. 5в).

По результатам испытаний образцы титанового сплава ВТ6С как с пайкой, так и без, не проявили склонности к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением. Также на образцах после испытаний отсутствовали коррозионные повреждения. На рис. 6 изображены образцы после испытаний.

Таким образом, результаты проведенных коррозионных испытаний показывают, что сталь 20 подвергается охрупчиванию и характеризуются низкой стойкостью к сероводородному растрескиванию под напряжением. Наиболее стойкими материалами в среде сероводорода являются стали 14Х2ГМР, 09Г2С, 08Х18Н10Т и титановый сплав ВТ6С, которые



а) основной металл (70% от предела текучести)

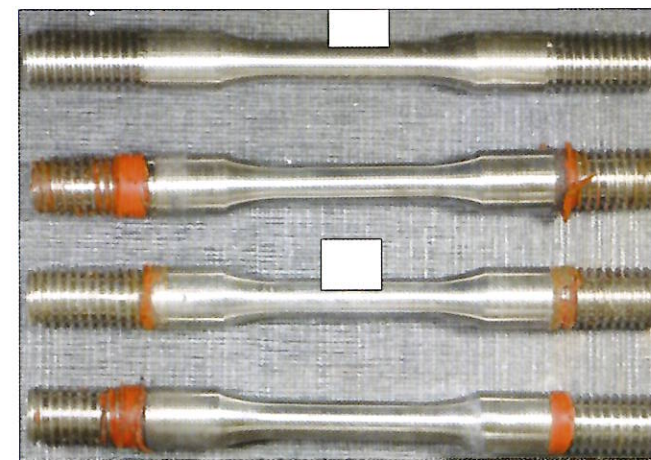


а) основной металл (90% от предела текучести)



а) сварной образец (90% от предела текучести)

Рисунок 5 - Образцы из стали 14Х2ГМР после испытаний на СКРН в растворе С



а) образец-свидетель; б) образцы после испытаний

Рисунок 6 - Образцы из сплава ВТ6С на СКРН в растворе А

могут быть рекомендованы в качестве материалов деталей компрессорных установок, с учетом дополнительных технических требований, согласно международным (NACE MR0175) или российским стандартам (ГОСТ Р 53678). Стоит отметить, что склонность

материалов к сероводородному растрескиванию будет зависеть от прочностных характеристик сталей, которые будут определяться режимами термической обработки.

#### Список литературы

1. Максимов, Т.В. Тенденции развития и производства компрессорной техники на современном этапе / Т.В. Максимов, В.А. Максимов, А.Г. Егоров // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 5. - С. 176–179.
2. Баранов, А.Н. Исследование коррозионной

стойкости сталей, применяемых для изготовления дражного оборудования для добычи золота / А.Н. Баранов, Е.А. Гусева, Е.М. Комова // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1(21). - С. 102–106.

3. Никифоров, В.М. Технология металлов и конструкционные материалы: моногр. / В.М. Никифоров. Москва: Высшая школа, 1980. - 360 с.

4. Галиахметов, И. Г. Конструкционные материалы центробежных и винтовых компрессоров промышленного применения / И.Г. Галиахметов. Казань: Изд-во «ФЭН», 2004. - 80 с.

## ВСЕРОССИЙСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ НАУКА +

FESTIVALNAUKI.RU

0+

СЕЛСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

ЭНЕРГИЯ

МАТЕРИЯ

ЖИВЫЕ СИСТЕМЫ

ЧЕЛОВЕК

ИНЖИНИРИНГ

ОБЩЕСТВО

ВСЕЛЕННАЯ

ЗДОРОВЬЕ

МЕДИЦИНА

**МГУ**

**ЭКСПОЦЕНТР**

**90+ ПЛОЩАДОК**

ПОДРОБНЕЕ НА САЙТЕ FESTIVALNAUKI.RU

**МОСКВА**

**6-8 ОКТЯБРЯ**

**ВХОД СВОБОДНЫЙ**

