ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Защита от коррозии нефтепромыслового и нефтедобывающего оборудования с помощью химических реагентов

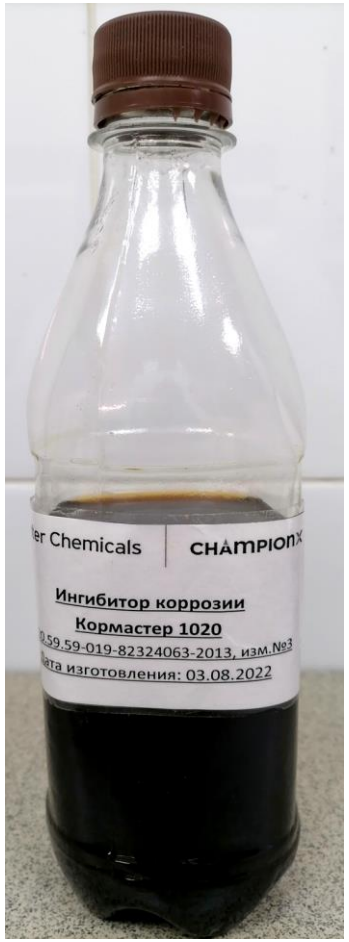
Докладчик:
Инженер лаборатории коррозионных испытаний
Ануфриев Денис Владимирович



Знакомство с экспериментальным оснащением

Внешний вид реагентов





Внешний вид емкостей с реагентами, предоставленными на исследование

Внешний вид установки





Установка для проведения испытаний на эффективность ингибиторной защиты и определения скорости коррозии гравиметрическим методом

Внешний вид установки под давлением



Автоклавный комплекс для проведения испытаний на эффективность ингибиторной защиты и определения скорости коррозии при высоком давлении и высокой температуре

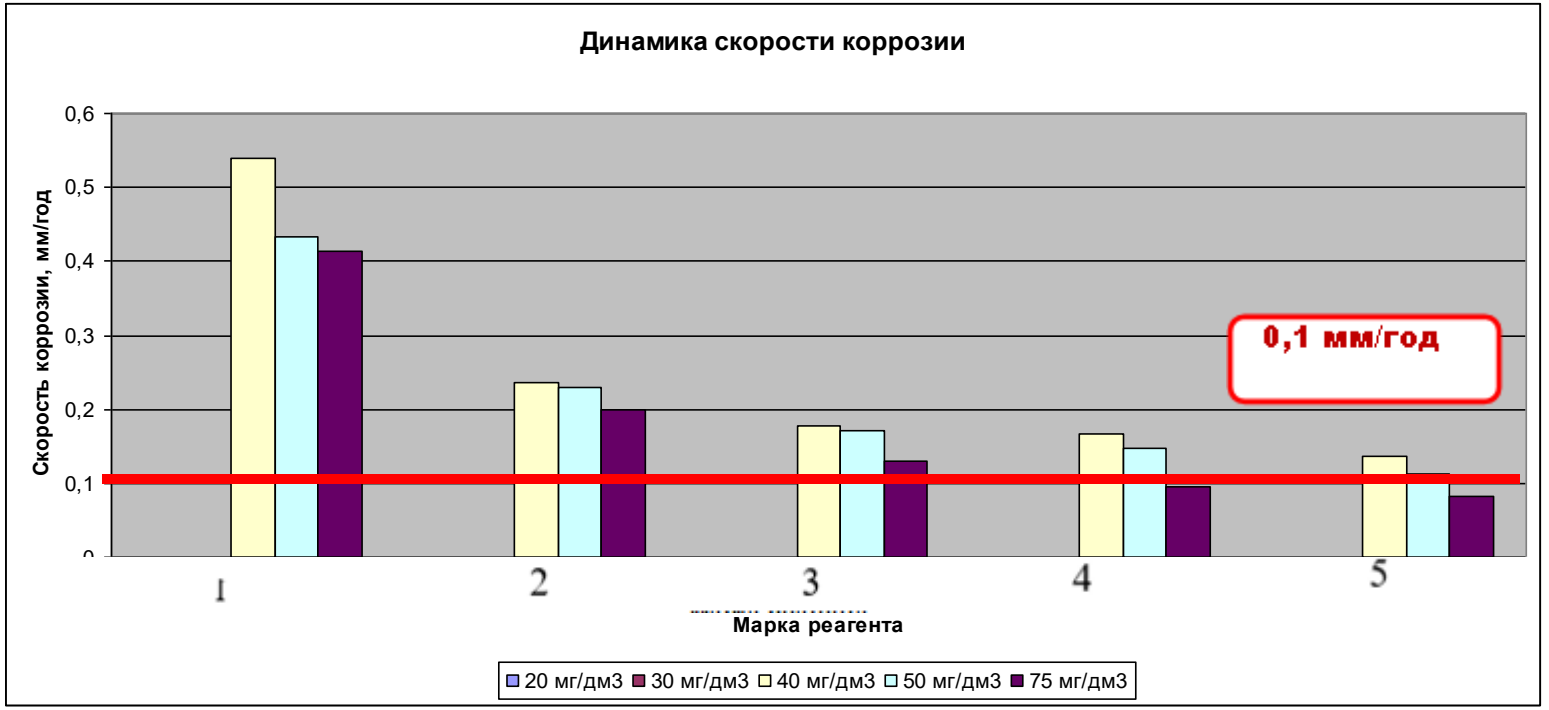
Результаты оценки совместимости ингибиторов коррозии с модельными средами

Модельная среда	Ингибитор коррозии	Совместимость через 1час	Совместимость через 12 час	Результат тестирования
25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$	1	растворимый	растворимый	совместимый
	2	растворимый	растворимый	совместимый
	3	диспергируемый	диспергируемый	совместимый
	4	диспергируемый	диспергируемый	совместимый
	5	диспергируемый	диспергируемый	совместимый
	6	диспергируемый	диспергируемый	совместимый
500г/л$CaCl_2$	1	растворимый	растворимый	совместимый
	2	диспергируемый	диспергируемый	совместимый
	3	растворимый	растворимый	совместимый
	4	растворимый	растворимый	совместимый
	5	диспергируемый	диспергируемый	совместимый
	6	**недиспергируемый**	**недиспергируемый**	**несовместимый**

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии в модельных средах при атмосферном давлении и комнатной температуре

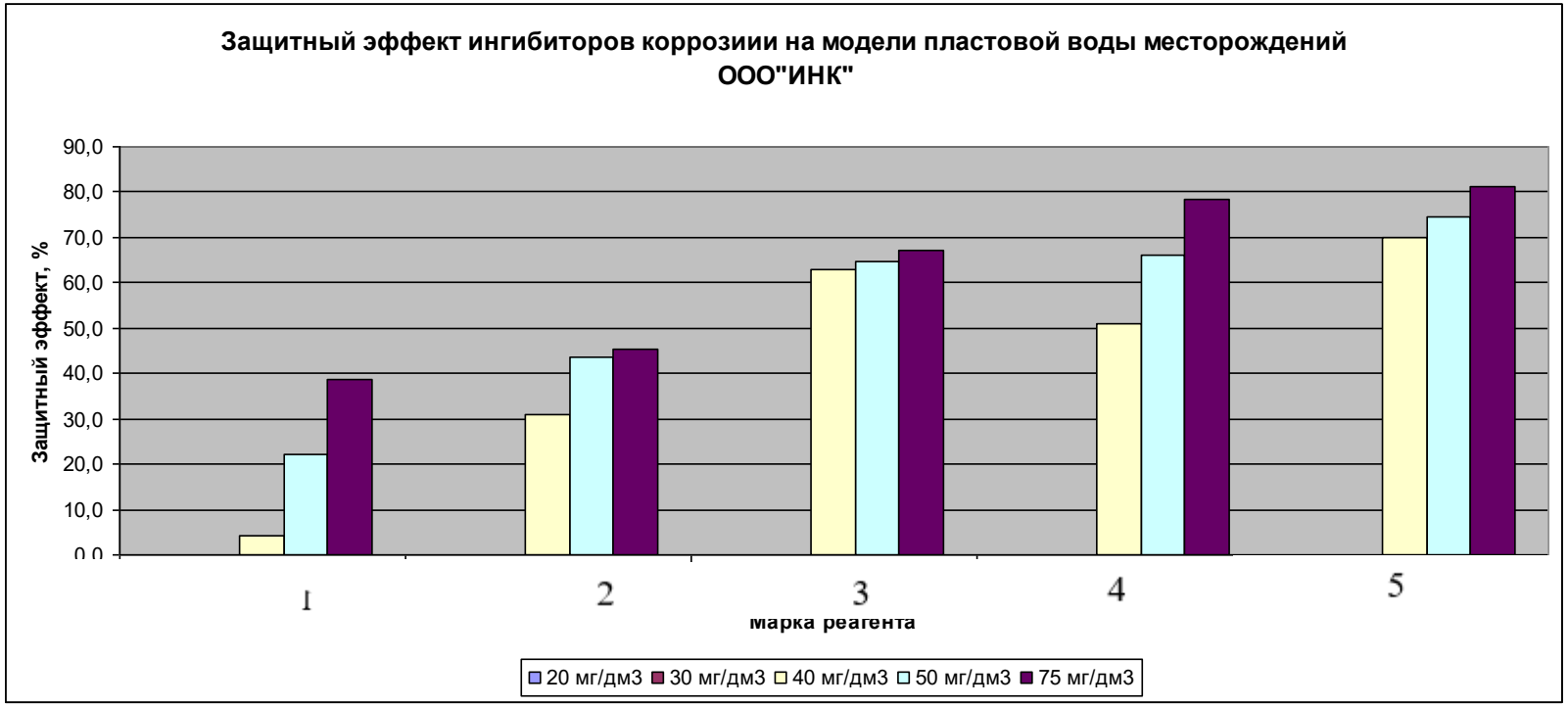
Оценка сравнительной эффективности ингибиторов коррозии в модельной среде (25г/лNaCl+25г/лCaCl2) при барботаже CO_2							
Марка реагента	**Испытательная среда**	**Метод испытания/ аппаратура**	**Условия испытания**	**Концентр. ингибитора, мг/дм³**	**Контр. скорость коррозии, мм/год**	**Рабочая скорость коррозии, мм/год**	**Защитный эффект, %**
1	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атмосферном давлении	20	0,563	0,539	4,2
				50	0,557	0,433	22,3
				75	0,676	0,415	38,6
2	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атмосферном давлении	20	0,342	0,236	31
				50	0,406	0,23	43,5
				75	0,367	0,2	45,4
3	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атмосферном давлении	20	0,48	0,178	63
				50	0,421	0,148	64,8
				75	0,397	0,13	67,2
4	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атмосферном давлении	30	0,338	0,166	**50,9**
				40	0,439	0,148	**66,2**
				50	0,439	0,095	**78,4**
5	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атмосферном давлении	20	0,456	0,136	**40,1**
				40	0,444	0,113	**74,7**
				50	0,444	0,083	**81,3**

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии на модельных средах при атмосферном давлении комнатной температуре



Результаты лабораторных испытаний по определению скорости коррозии в ингибируемой модельной среде в присутствии реагентов 1, 2, 3, 4 и 5 на модельной воде 25г/лNaCl+25г/лCaCl2 при атмосферном давлении и комнатной температуре.

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии на модельных средах при атмосферном давлении комнатной температуре

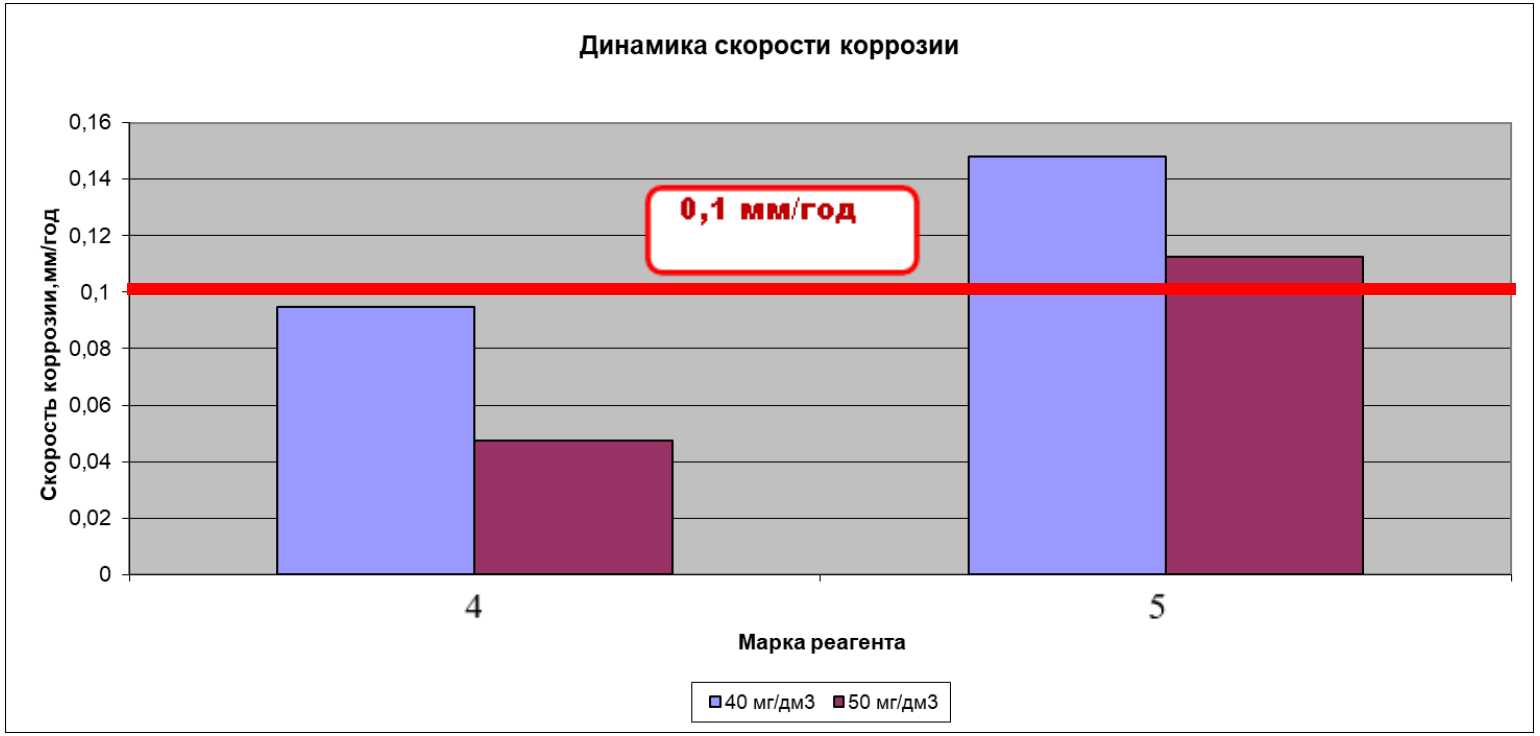


Результаты лабораторных испытаний по оценке степени защиты ингибиторов коррозии 1, 2, 3, 4 и 5 на модельной воде 25г/л$NaCl$+25г/л$CaCl_2$ при атмосферном давлении и комнатной температуре.

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии на модельных средах при атмосферном давлении комнатной температуре

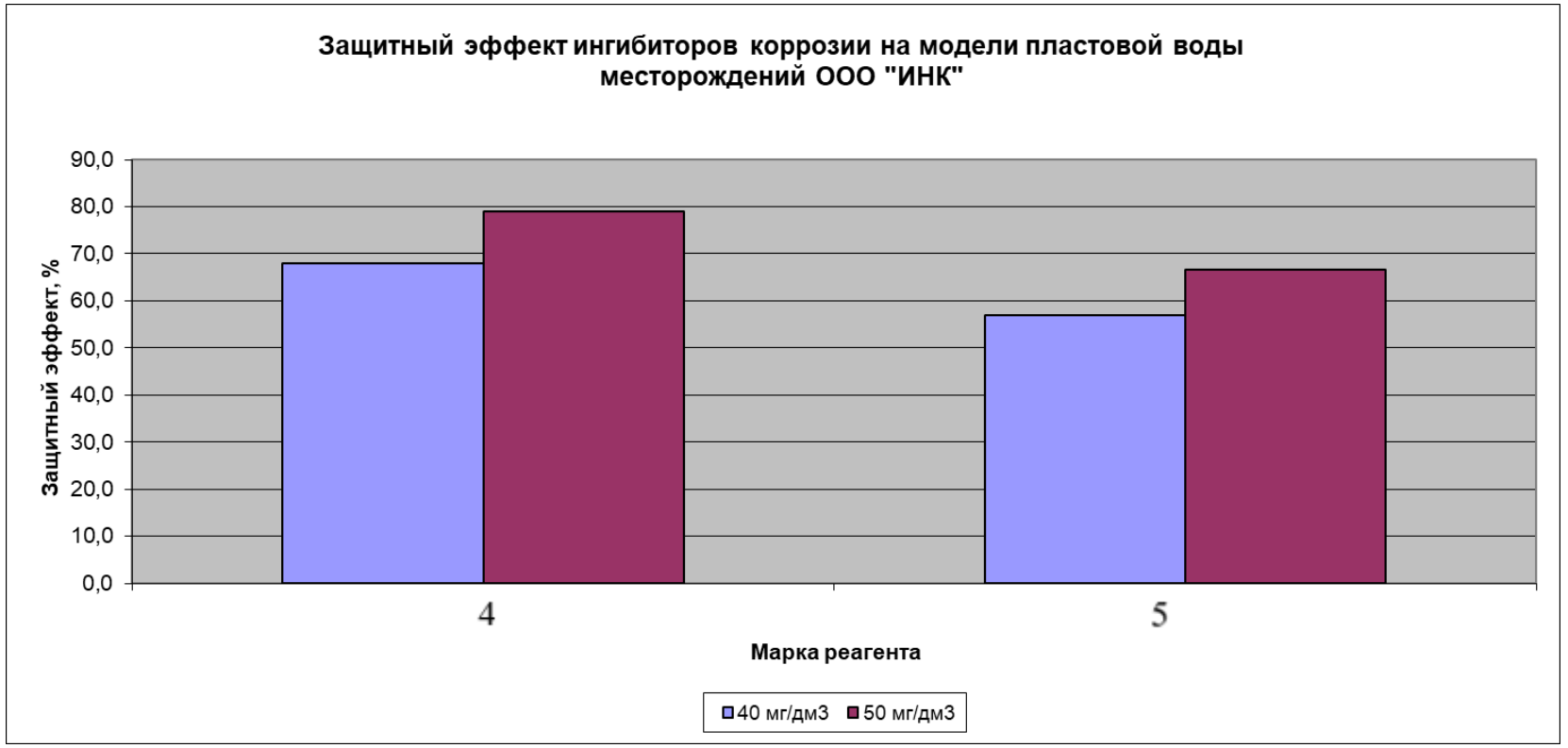
Сравнительная оценка эффективности ингибиторов 4 и 5 в различных испытательных средах при атмосферном давлении и комнатной температуре							
Марка реагента	**Испытательная среда**	**Метод испытания/ аппаратура**	**Условия испытания**	**Концентр. ингибитора, мг/дм3**	**Контр. скорость коррозии, мм/год**	**Рабочая скорость коррозии, мм/год**	**Защитн эффект, %**
5	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/лCaCl2)+CO2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атм. давлении	40	0,444	0,113	74,7
5	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/лCaCl2)+CO2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атм. давлении	50	0,444	0,083	81,3
5	Модельная вода (500г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атм. давлении	40	0,344	0,148	56,9
5	Модельная вода (500г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атм. давлении	50	0,338	0,113	66,7
4	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атм. давлении	40	0,444	0,113	74,7
4	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атм. давлении	50	0,444	0,083	81,3
4	Модельная вода (500г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атм. давлении	40	0,296	0,095	68
4	Модельная вода (500г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ установка СНПХ ГПР-05	При атм. давлении	50	0,225	0,047	79

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии на модельных средах при атмосферном давлении комнатной температуре



Результаты лабораторных испытаний по определению скорости коррозии в ингибируемой модельной среде с минерализацией 500г/л $CaCl_2$ в присутствии реагентов 4 и 5 при атмосферном давлении и комнатной температуре.

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии на модельных средах при атмосферном давлении комнатной температуре

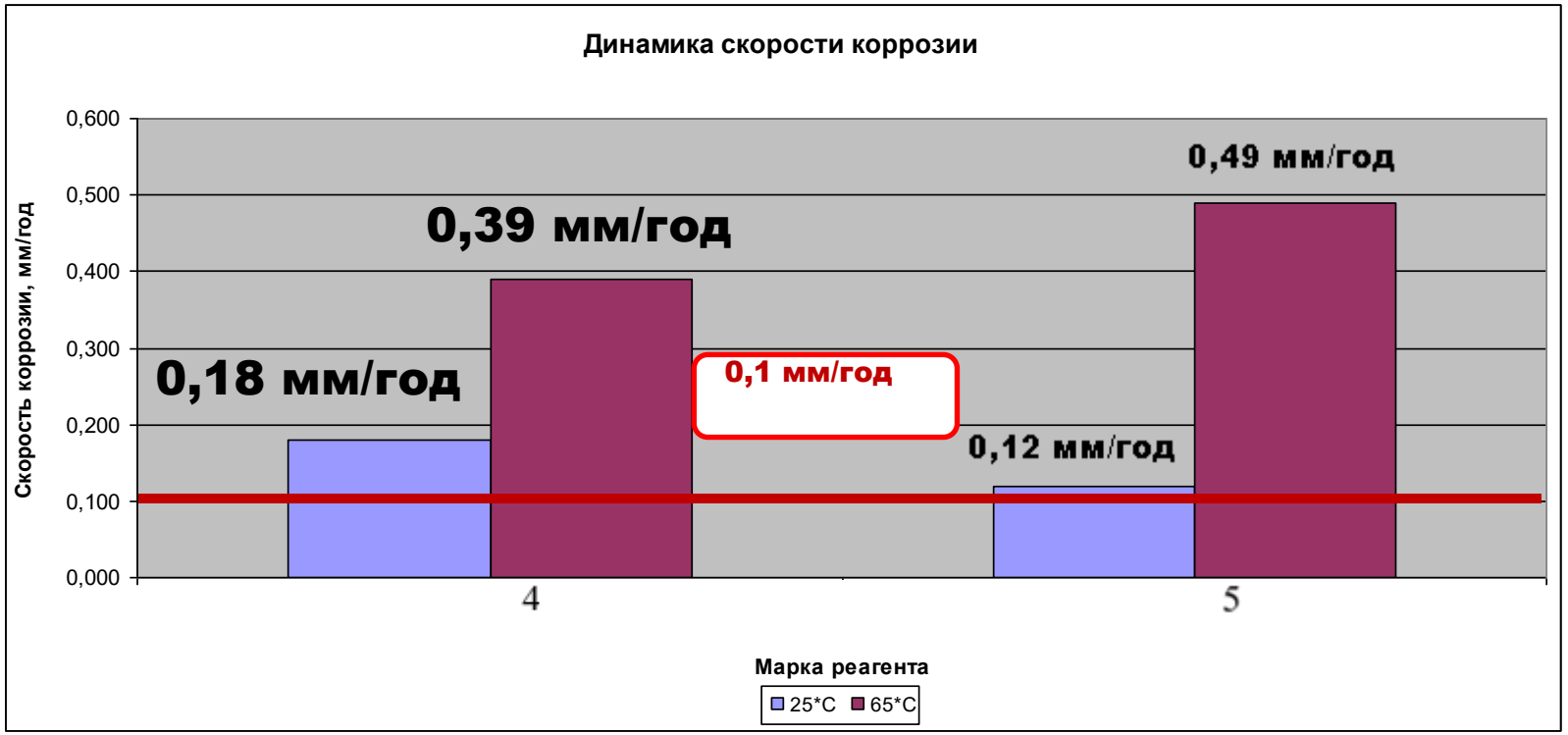


Результаты лабораторных испытаний по оценке степени защиты ингибиторов коррозии 4 и 5 в модельной среде с минерализацией 500г/л $CaCl_2$ при атмосферном давлении и комнатной температуре.

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии на модельных средах в условиях автоклава

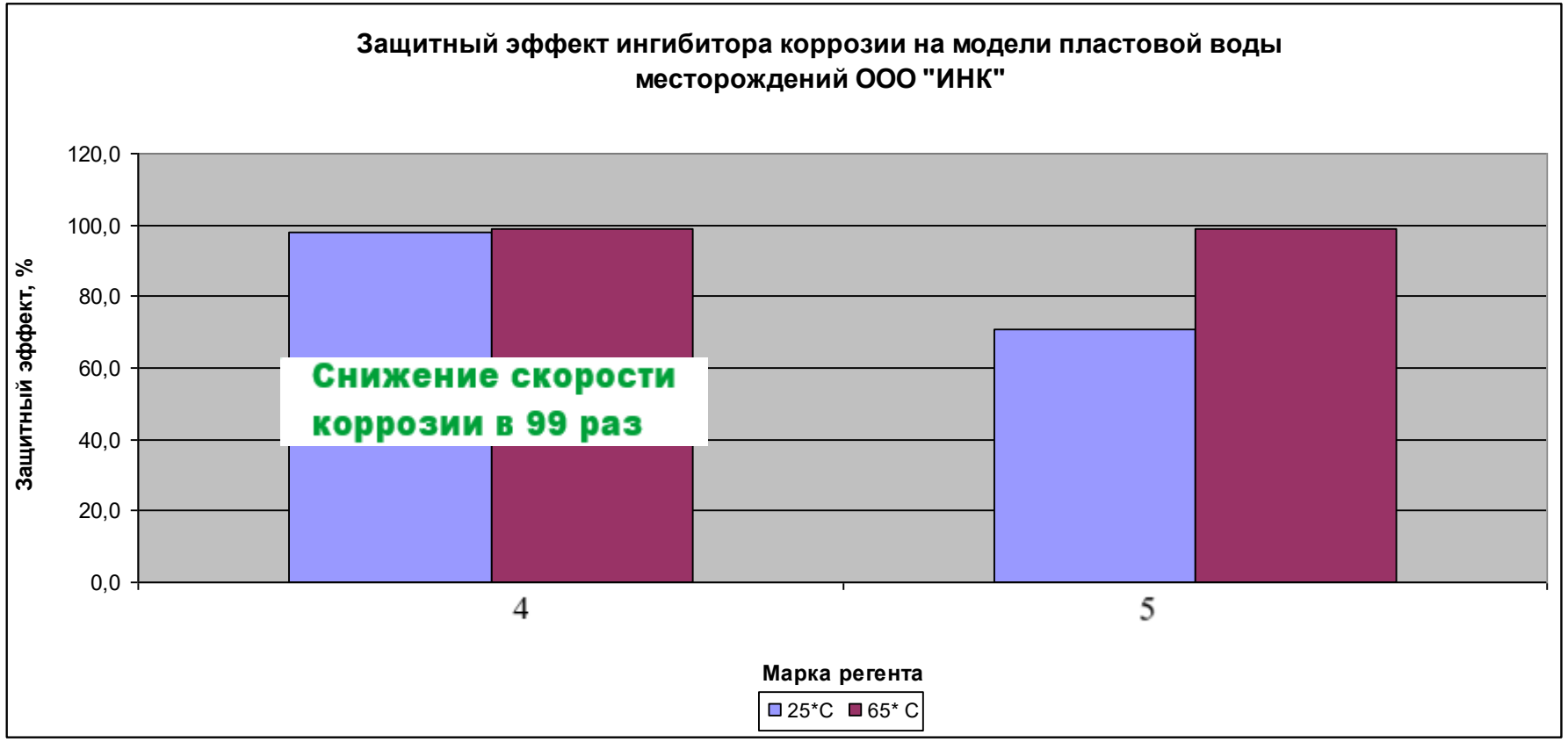
Сравнительная оценка эффективности ингибиторов 4 и 5 в испытательных средах с минерализацией (25г/лNaCl+25г/лCaCl2) и 500г/лCaCl2 при различных температурах в автоклаве							
Марка реагента	**Испытательная среда**	**Метод испытания/ аппаратура**	**Условия испытания**	**Концентр. ингибитора, мг/дм3**	**Контр. скорость коррозии, мм/год**	**Рабочая скорость коррозии, мм/год**	**Защитн эффект, %**
4	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ автоклавный комплекс	Параметры: P=40 кгс/см^2, T=25°C, V=800об/мин	50	8,51	0,18	97,9
4	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ автоклавный комплекс	Параметры: P=40 кгс/см^2, T=65°C, V=800об/мин	50	38,74	0,39	99
4	Модельная вода (500г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ автоклавный комплекс	Параметры: P=40 кгс/см^2, T=25°C, V=800об/мин	50	0,54	0,12	81,3
4	Модельная вода (500г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ автоклавный комплекс	Параметры: P=40 кгс/см^2, T=65°C, V=800об/мин	50	1,81	0,38	79
5	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ автоклавный комплекс	Параметры: P=40 кгс/см^2, T=25°C, V=800об/мин	50	8,51	0,12	98,6
5	Модельная вода (25г/лNaCl+25г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ автоклавный комплекс	Параметры: P=40 кгс/см^2, T=65°C, V=800об/мин	50	38,74	2,049	94,7
5	Модельная вода (500г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ автоклавный комплекс	Параметры: P=40 кгс/см^2, T=25°C, V=800об/мин	50	0,64	0,15	76,6
5	Модельная вода (500г/л$CaCl_2$)+CO_2	Гравиметрия/ автоклавный комплекс	Параметры: P=40 кгс/см^2, T=65°C, V=800об/мин	50	1,81	0,14	92,3

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии на модельных средах в условиях автоклава



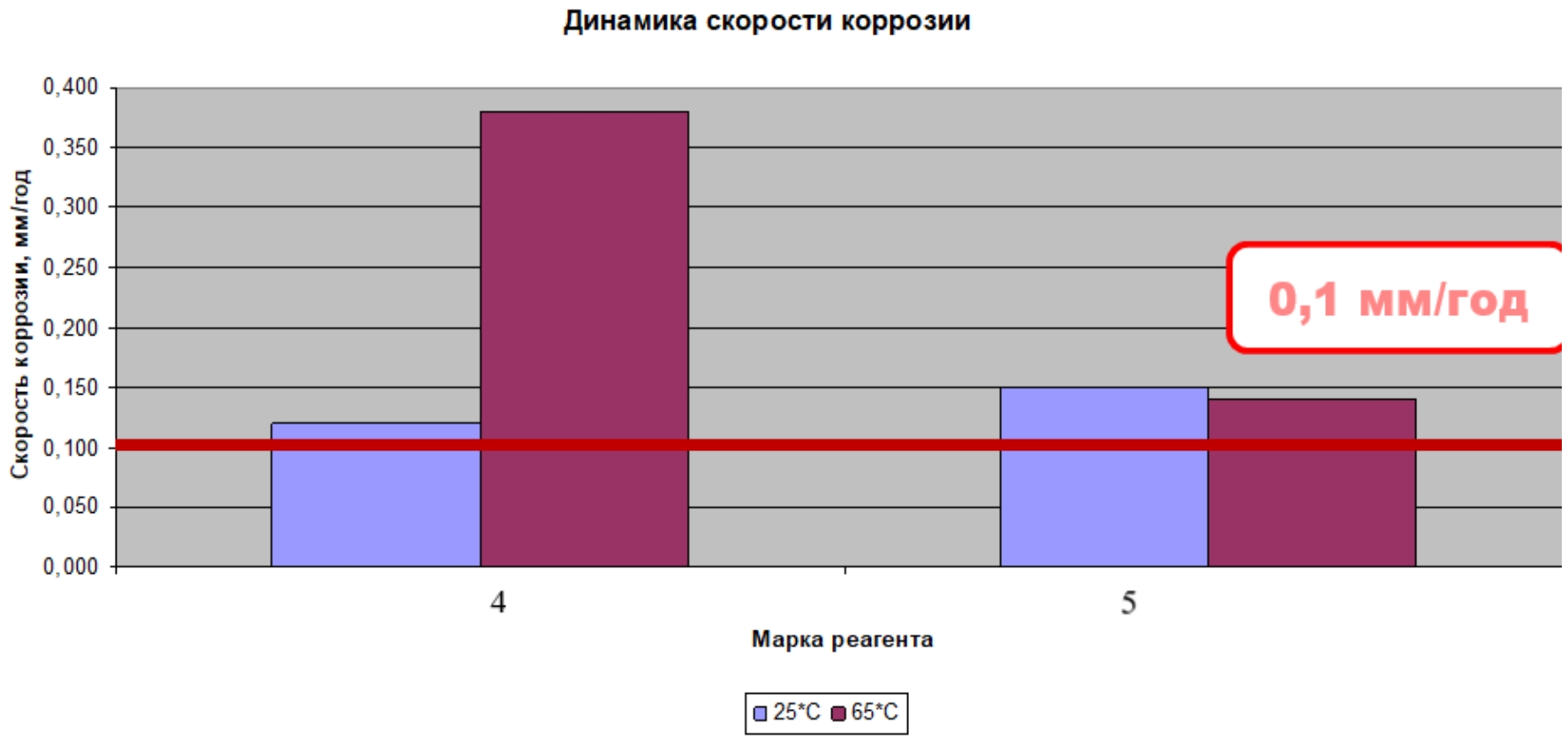
Результаты лабораторных автоклавных испытаний по определению скорости коррозии в ингибируемой модельной среде с минерализацией 25г/л NaCl+25г/л $CaCl_2$ в присутствии реагентов 4 и 5 при различных температурах и давлении CO_2 40 атм.

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии на модельных средах в условиях автоклава



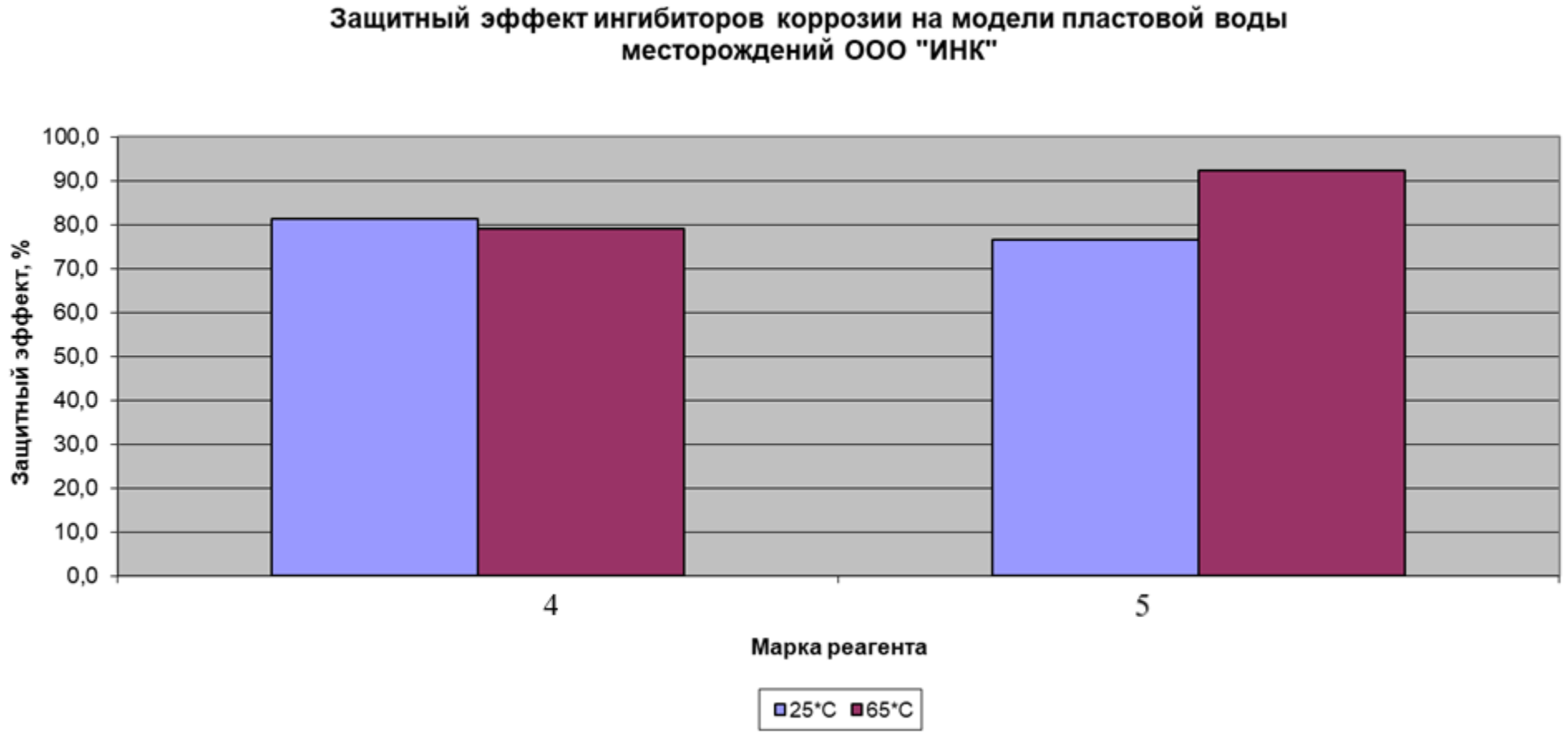
Результаты лабораторных автоклавных испытаний по оценке степени защиты ингибиторов коррозии в модельной среде с минерализацией 25г/л NaCl+25г/л $CaCl_2$ в присутствии реагентов 4 и 5 при различных температурах и давлении CO_2 40 атм.

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии на модельных средах при в условиях автоклава



Результаты лабораторных автоклавных испытаний по определению скорости коррозии в ингибируемой модельной среде с минерализацией 500г/л CaCl2 в присутствии реагентов 4 и 5 при различных температурах и давлении CO2 40 атм.

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии на модельных средах в условиях автоклава



Результаты лабораторных автоклавных испытаний по оценке степени защиты ингибиторов коррозии в модельной среде с минерализацией 500г/л CaCl2 в присутствии реагентов 4 и 5 при различных температурах и давлении CO2 40 атм.



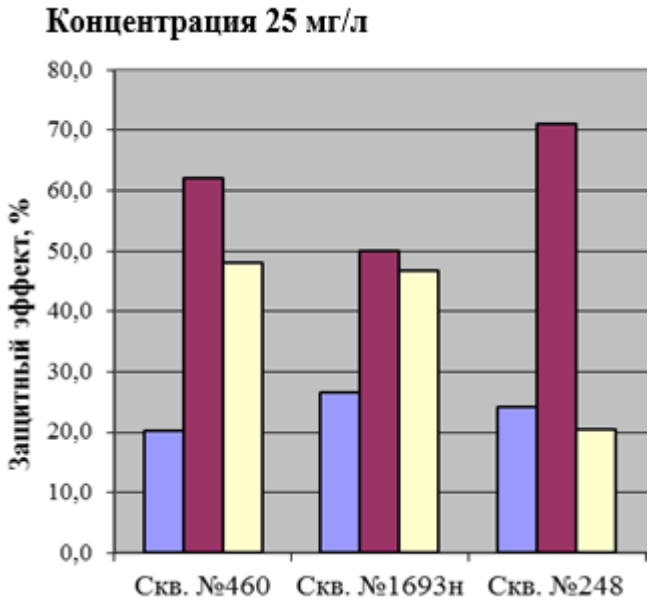
Совместимость ингибиторов коррозии с химическими реагентами

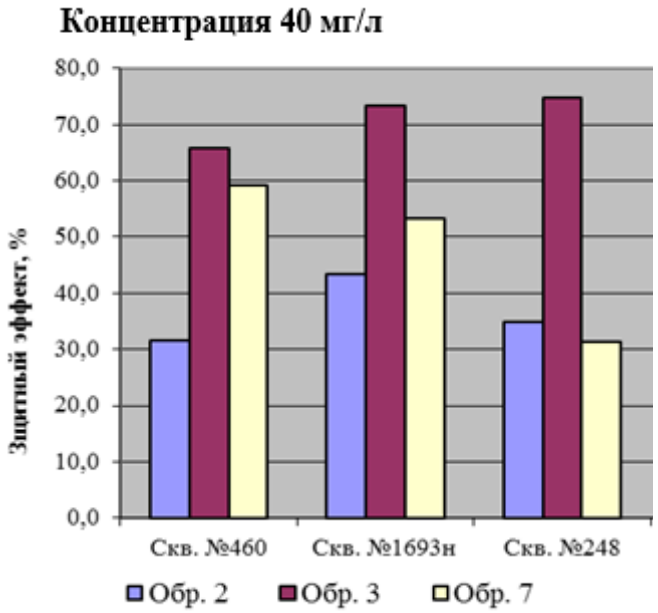
Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии

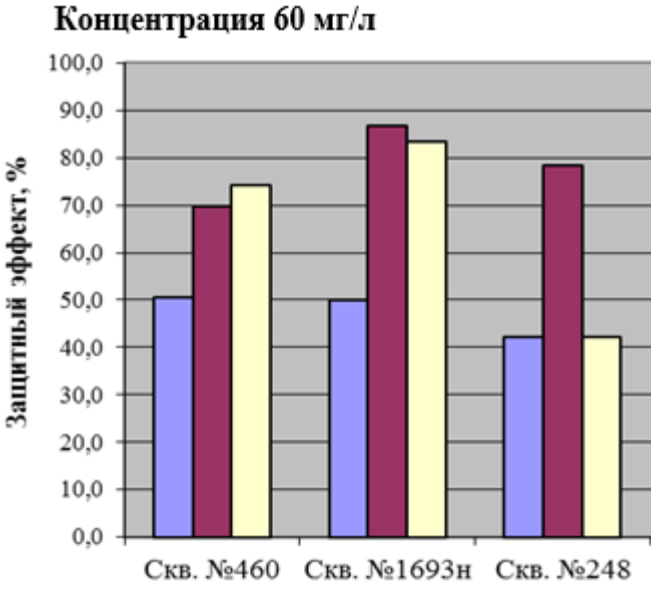
Объект	Номер пробы	Концентрация ингибитора коррозии, мг/л	Контрольная скорость коррозии, мм/год	Скорость коррозии с реагентом, мм/год	Защитный эффект, %
Скважина № 460	2	25	0,1719	0,1244	20,3
		40	0,1719	0,1067	31,6
		60	0,1719	0,0770	50,6
	3	25	0,1363	0,0593	62,0
		40	0,1363	0,0533	65,8
		60	0,1363	0,0474	69,6
	7	25	0,1600	0,0830	48,1
		40	0,1600	0,0652	59,3
		60	0,1600	0,0415	74,1
Скважина № 1693н	2	25	0,1541	0,1304	26,7
		40	0,1541	0,1007	43,3
		60	0,1541	0,0889	50,0
	3	25	0,1778	0,0889	50,0
		40	0,1778	0,0474	73,3
		60	0,1778	0,0237	86,7
	7	25	0,2015	0,0948	46,7
		40	0,2015	0,0830	53,3
		60	0,2015	0,0296	83,3
Скважина № 248	2	25	0,2133	0,1244	24,1
		40	0,2133	0,1067	34,9
		60	0,2133	0,0948	42,2
	3	25	0,1185	0,0474	71,1
		40	0,1185	0,0415	74,7
		60	0,1185	0,0356	78,3
	7	25	0,1600	0,1304	20,5
		40	0,1600	0,1126	31,3
		60	0,1600	0,0948	42,2

Оценка защитного действия опытных проб ингибиторов коррозии на средах Байтуганского месторождения

Результаты оценки защитного действия ингибиторов коррозии







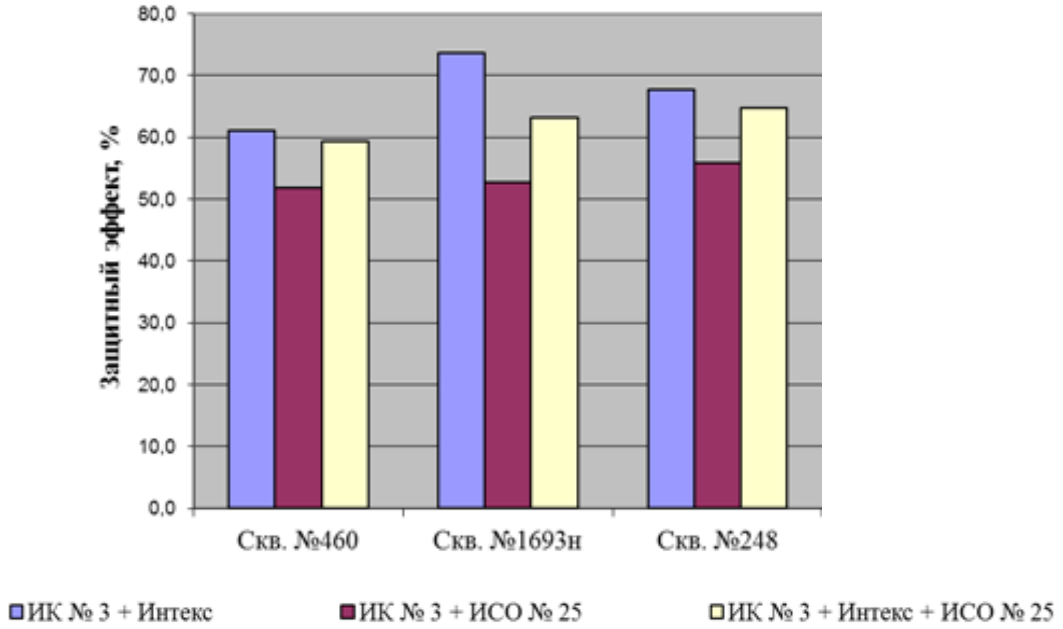
Защитное действие при различных концентрациях опытных проб ингибиторов коррозии на средах Байтуганского месторождения.

Результаты оценки защитного действия ингибитора коррозии с химическими реагентами используемыми на объектах Байтуганского месторождения

Объект	Добавляемые реагенты	Концентрация добавляемых реагентов, мг/л	Контрольная скорость коррозии, мм/год	Скорость коррозии с реагентом, мм/год	Защитный эффект, %
Скважина № 460	ИК проба № 3 + Интекс-1018С	40/50	0,3200	0,1244	61,1
	ИК проба № 3 + ИСО проба № 25	40/50	0,3200	0,1541	51,9
	ИК проба № 3 + Интекс-1018С + ИСО проба № 25	40/50/50	0,3200	0,1304	59,3
Скважина № 1693н	ИК проба № 3 + Интекс-1018С	40/50	0,2252	0,0593	73,7
	ИК проба № 3 + ИСО проба № 25	40/50	0,2252	0,1067	52,6
	ИК проба № 3 + Интекс-1018С + ИСО проба № 25	40/50/50	0,2252	0,0830	63,2
Скважина № 248	ИК проба № 3 + Интекс-1018С	40/50	0,2015	0,0652	67,6
	ИК проба № 3 + ИСО проба № 25	40/50	0,2015	0,0889	55,9
	ИК проба № 3 + Интекс-1018С + ИСО проба № 25	40/50/50	0,2015	0,0711	64,7

Оценка защитного действия ингибитора коррозии проба № 3 при совместном тестировании с деэмульгатором ИНТЕКС-1018С и ингибитором солеотложений проба № 25

Результаты оценки защитного действия ингибитора коррозии с химическими реагентами

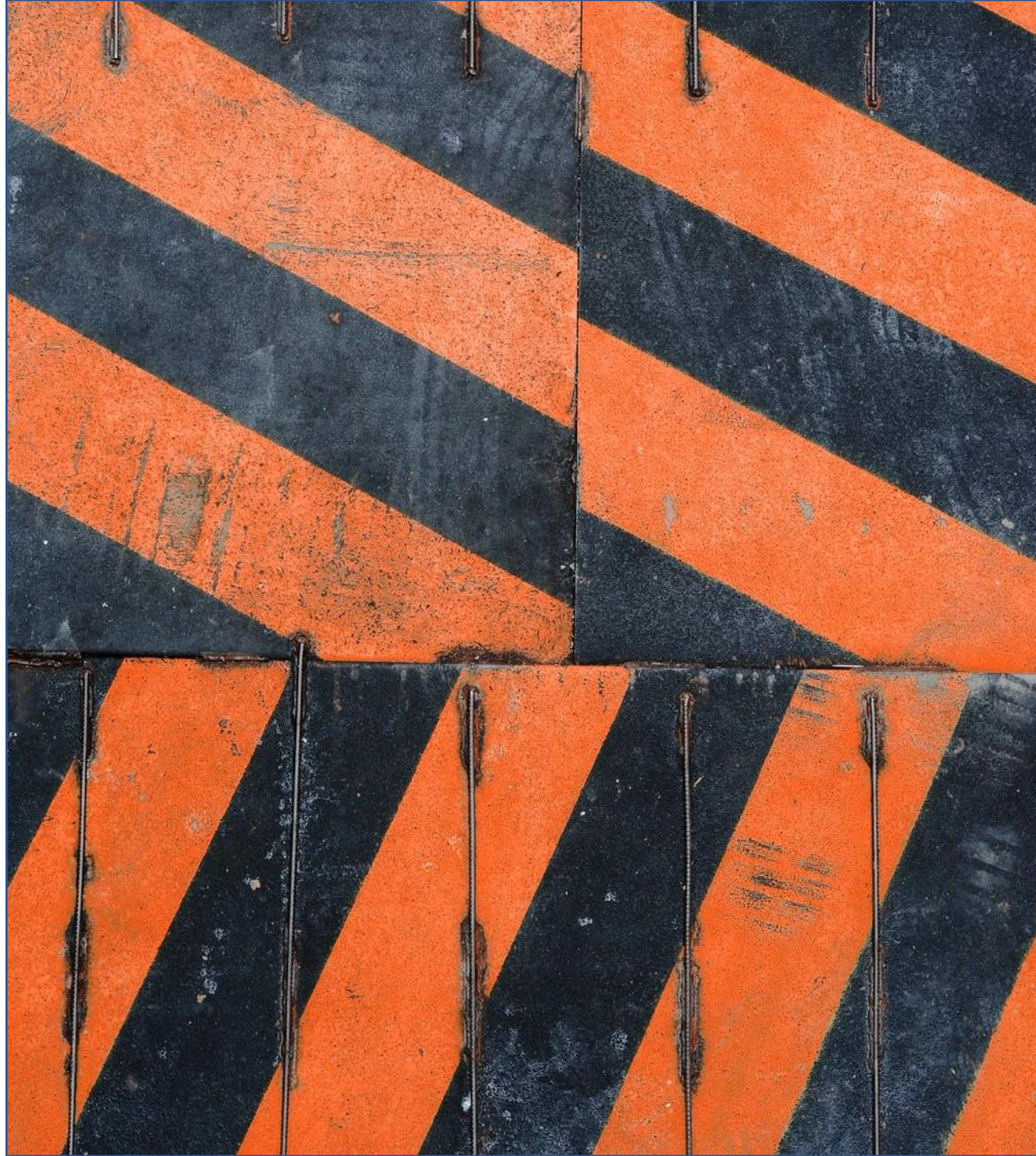


Защитный эффект пробы № 3 реагента коррозии при совместном применение с деэмульгатаром ИНТЕКС-1018С и пробой № 25 ингибитора солеотложения на объектах Байтуганского м/р

Выводы

Важно не только испытать Ингибитор Коррозии в модельной среде, но и проверить его на совместимость с химическими реагентами, которые уже используются на месторождении.

Даже реагент, который хорошо себя показал при испытании на пластовой воде, может потерять свой защитный эффект и даже ускорить коррозию при взаимодействии с другими химическими компонентами.



Ануфриев Денис Владимирович

+ 7 987 950 36 58

anufriev@its-samara.ru

VII Научно-технической конференции
«КОРРОЗИЯ И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ В НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

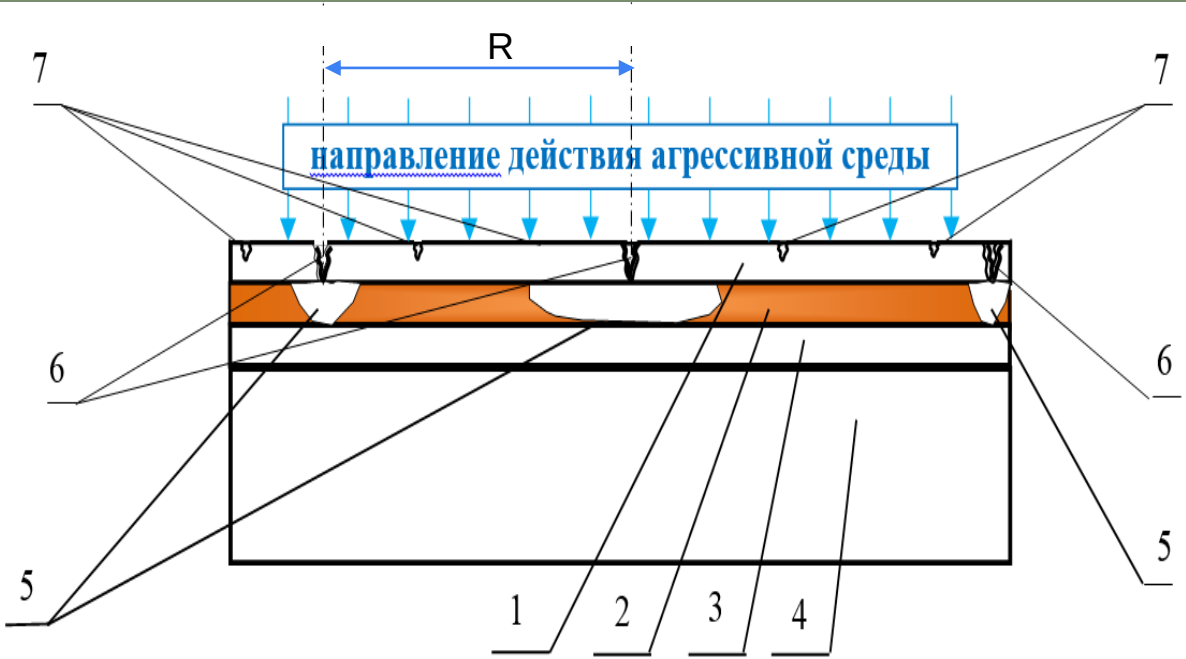
Новые металлические материалы повышенной коррозионной стойкости, работающие по принципу «внутреннего протектора»

Д.т.н., профессор
Розен Андрей Евгеньевич
E-mail: aerozen@bk.ru

Часть 1

Инновационный материал повышенной коррозионной стойкости для работы в высоко агрессивных средах

Принцип работы внутреннего протектора



1 – наружный слой; 2 – внутренний протектор; 3 – третий слой; 4 – базовый слой; 5 – линзы в протекторе из продуктов коррозии; 6 – сквозные питтинги первого слоя; 7 – питтинги, у которых прекратился рост ввиду электрохимического воздействия внутреннего протектора; R – радиус действия внутреннего протектора

1 слой	питтинговая коррозия
2 слой	контактная коррозия
3 слой	питтинговая коррозия

Техническое решение запатентовано в 11 странах.

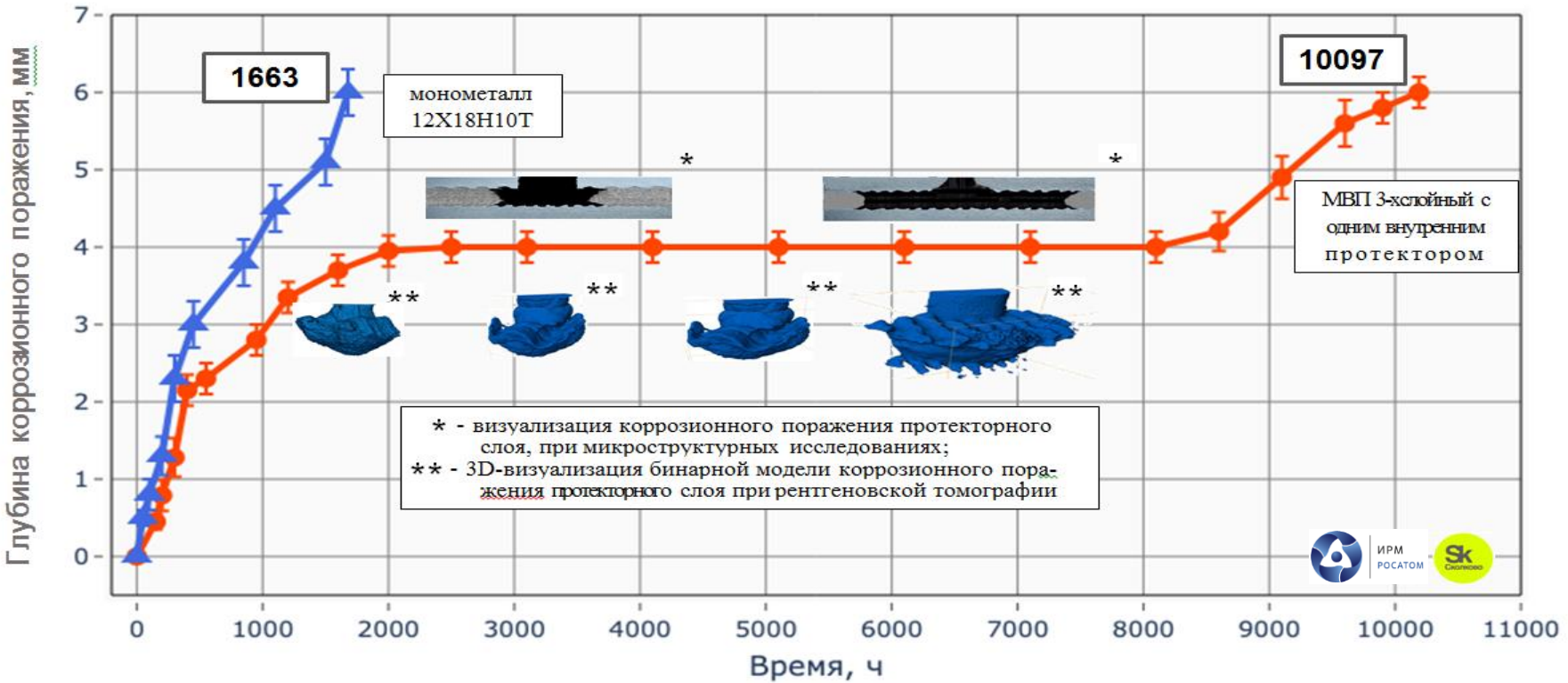
Патент № 016878 ЕАПВ:
«Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения».

Архитектура листового материала



1 – слои с высоким электрохимическим потенциалом; 2 – внутренние протекторы;
3 – основной слой, по которому рассчитывают прочность всей металлоконструкции

Сравнительные коррозионные испытания

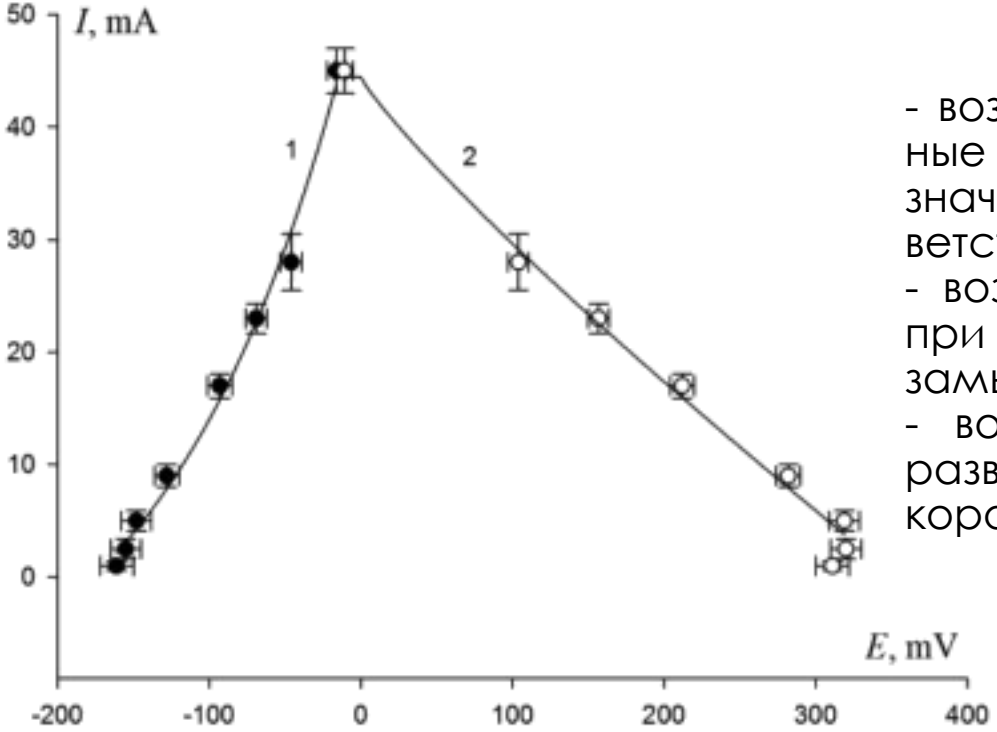


Состав агрессивной среды: 10% раствор трихлорида железа ($FeC1_3$ - $6H_2O$)

Повышение коррозионной стойкости в **6 раз** при одном ВП и в **23 раза** при двух ВП

Ускоренные коррозионные испытания

Патент РФ № 2533344
«Электрохимический метод ускоренных коррозионных испытаний МВП»



Преимущества :

- возможность исследовать коррозионные процессы при низких и высоких значениях силы тока (мкА и мА соответственно);
- возможность проводить измерения при токах, близких к току короткого замыкания;
- возможность прогнозировать развитие коррозионных процессов за короткое время (не более 2-х часов).

Зависимость электрохимических потенциалов стали 09Г2С (линия 1) и 08Х18Н10Т (линия 2) от силы тока

Локализация технологического цикла (сварка взрывом)











Максимальная площадь листа МВП за один подрыв – до **12 м²**

Иссинский КСМ

ООО «Иссинский комбинат строительных материалов», Пензенская обл., пос. Исса

Локализация технологического цикла

Аттестованы и сертифицированы лаборатории:

1. Механических испытаний
2. Коррозионных испытаний
3. Неразрушающего контроля







Локализация технологического цикла



Печь с выдвижным подом для термической обработки

Отработаны технологии:

1. Термической обработки
2. Правки на листоправильных машинах
3. Правки на листоправильных прессах



Машина листоправильная



Пресс листоправильный

Локализация технологического цикла



Многовалковый стан





Пресс листогибочный

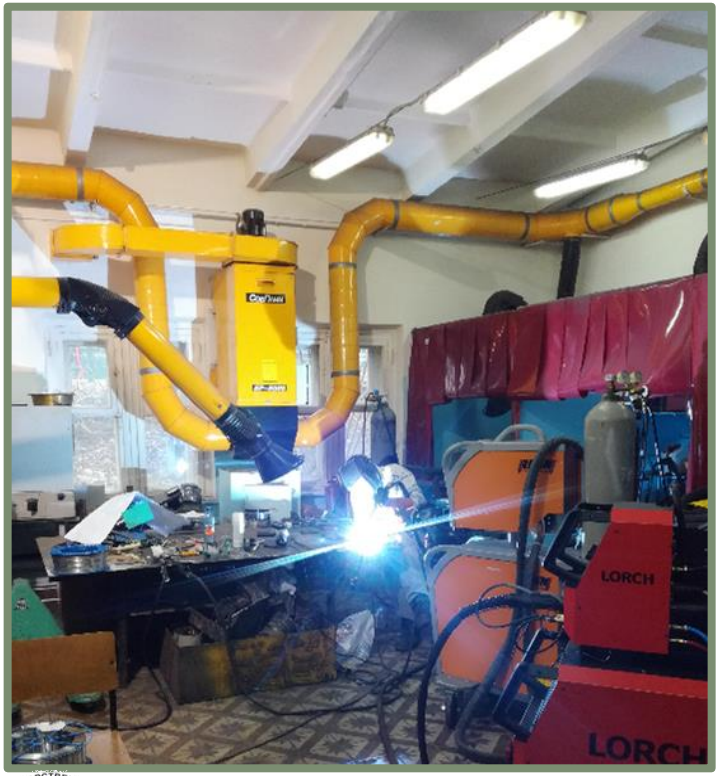
Отработаны технологии:

1. Горячего листового проката
2. Объёмной штамповки
3. Холодной гибки
4. Горячей гибки



Производство эллиптических днищ

Локализация технологического цикла



Отработаны промышленные способы дуговой сварки МВП :

- ручная дуговая покрытыми электродами (**РД**);
- ручная аргонодуговая неплавящимся электродом (**РАД**);
- механизированная аргонодуговая плавящимся электродом (**МАДП**);
- автоматическая под флюсом (**АФ**);
- автоматическая аргонодуговая неплавящимся электродом (**ААД**);
- автоматическая аргонодуговая плавящимся электродом (**ААДП**);
- автоматическая под флюсом на флюсовой подушке (**АФф**).

Работа в рамках ЕОТП ГК «Росатом»

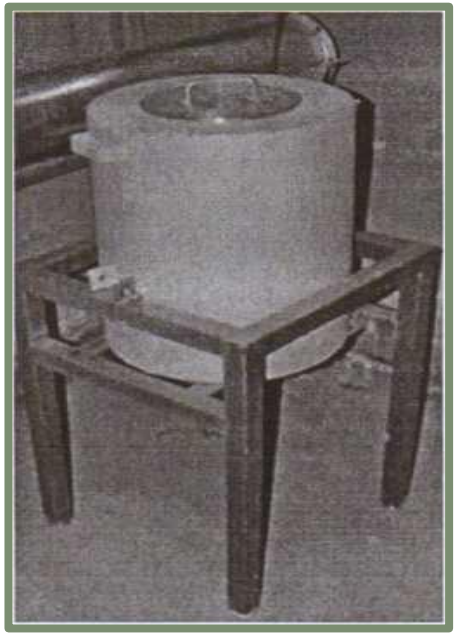
Тема: «Создание и разработка нормативных требований к новым коррозионно-стойким многослойным металлическим материалам с внутренним протектором для объектов хранения радиоактивных отходов (РАО) (ЕОТП-МТ-85)»

Уровень технологической готовности **TRL 6**

Результат: при условии обеспечения высоких механических и технологических свойств и сохранения указанных качеств в сварных соединениях при изготовлении объектов для хранения РАО коррозионная стойкость нержавеющих сталей аустенитного класса повышается в **6 раз** при наличии одного ВП и в **23 раза** при наличии двух ВП.

Команда проекта

Проведение натурных испытаний



Экспериментальный образец для натурных испытаний V=50 л

В «горячих» камерах АО «ИРМ» проведены натурные испытания опытного образца ёмкости из **МВП** с одним внутренним протектором в составе наливной (**НСК**) и контролируемой (**КСК**) спец. канализации ЖРО с добавкой от **0,3** до **10%** массовых Долей $\mathbf{FeCl_3 \cdot 6H_2O}$ в условиях радиационного воздействия.

С помощью поправочных коэффициентов произведён перерасчёт для реальных сред ЖРО.



Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ИНСТИТУТ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ»
(АО «ИРМ»)

УТВЕРЖДАЮ

ПРОГРАММА и МЕТОДИКА



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ»
(ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)

ТЕХНИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Москва, 2023

Результаты натурных испытаний

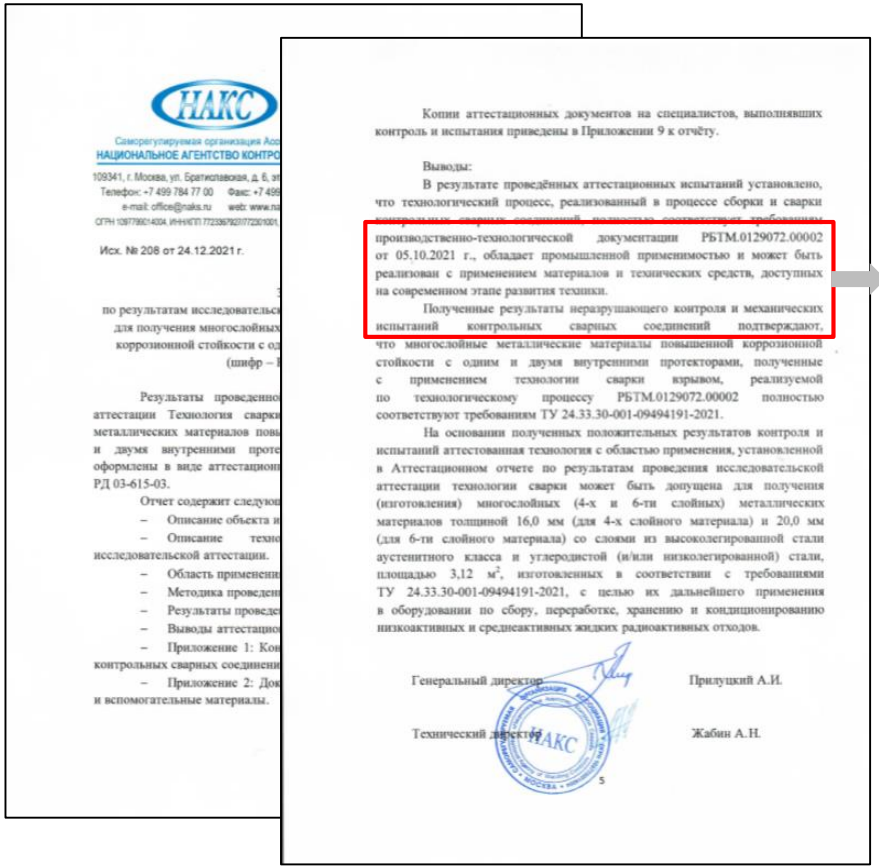
Монометалл 12Х18Н10Т → 100 лет

МВП с одним внутренним протектором → 600 лет в НСК

900 лет в КСК

Создан материал, способный с высокой степенью надёжности и экологической безопасности многократно повышать ресурс работы аппаратов и изделий в атомной промышленности

Аттестация технологии сварки взрывом (НАКС)



Копии аттестационных документов на специалистов, выполнявших контроль и испытания приведены в Приложении 9 к отчёту.

Выводы:

В результате проведённых аттестационных испытаний установлено, что технологический процесс, реализованный в процессе сборки и сварки [illegible] производственно-технологической документации РБТМ.0129072.00002 от 05.10.2021 г., обладает промышленной применимостью и может быть реализован с применением материалов и технических средств, доступных на современном этапе развития техники.

Полученные результаты неразрушающего контроля и механических испытаний контрольных сварных соединений подтверждают, что многослойные металлические материалы повышенной коррозионной стойкости с одним и двумя внутренними протекторами, полученные с применением технологии сварки взрывом, реализуемой по технологическому процессу РБТМ.0129072.00002 полностью соответствуют требованиям ТУ 24.33.30-001-09494191-2021.

На основании полученных положительных результатов контроля и испытаний аттестованная технология с областью применения, установленной в Аттестационном отчете по результатам проведения исследовательской аттестации технологии сварки может быть допущена для получения (изготовления) многослойных (4-х и 6-ти слойных) металлических материалов толщиной 16,0 мм (для 4-х слойного материала) и 20,0 мм (для 6-ти слойного материала) со слоями из высоколегированной стали аустенитного класса и углеродистой (и/или низколегированной) стали, площадью 3,12 м^2, изготовленных в соответствии с требованиями ТУ 24.33.30-001-09494191-2021, с целью их дальнейшего применения в оборудовании по сбору, переработке, хранению и кондиционированию низкоактивных и среднеактивных жидких радиоактивных отходов.

Генеральный директор Прилуцкий А.И.

Технический директор Жабин А.Н.

5

Технологический процесс:

полностью соответствуют требованиям производственно-технологической документации …

обладает промышленной примени-мостью ….

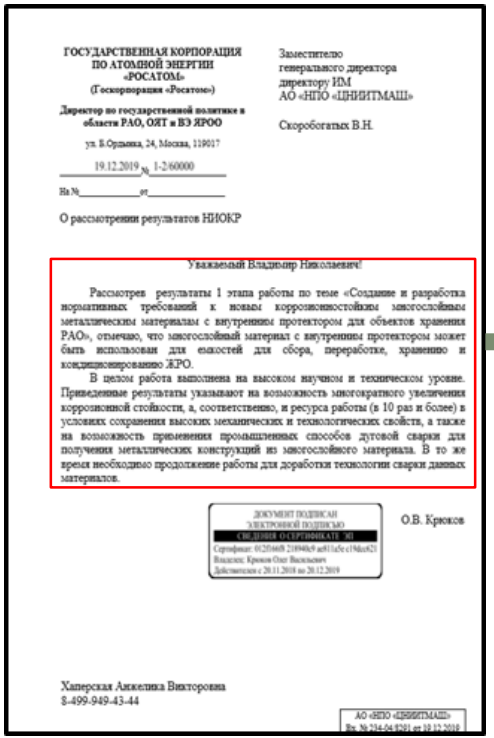
может быть реализован с применением материалов и технических средств, доступных на современном этапе развития техники.

РБТМ.0129072.00002 – Технология сварки взрывом для получения многослойных металлических материалов повышенной коррозионной стойкости с одним и двумя внутренними протекторами

Разработанная нормативная документация

1. **СТО ИСМ 001.007.18-0001-2021** Сварочные работы при производстве изделий из многослойных металлических материалов повышенной коррозионной стойкости с внутренним протектором для оборудования по сбору, переработке, хранению и кондиционированию низко- и среднеактивных ЖРО.
2. **ТУ 24.33.30-001-09494191-2021** Многослойные металлические материалы повышенной коррозионной стойкости с внутренним протектором для оборудования по сбору, переработке, хранению конденсированию низко- и среднеактивных ЖРО (документ подготовлен к регистрации).
3. **РБТМ.0129072.00002** Технология сварки взрывом для получения многослойных металлических материалов повышенной коррозионной стойкости с одним и двумя внутренними протекторами.
4. **РБТМ.6029072.00004** Операционная технологическая карта сварки взрывом многослойных металлических материалов с двумя внутренними протекторами.
5. **РБТМ.6029072.00005** Операционная технологическая карта сварки взрывом многослойных металлических материалов с одним внутренним протектором.

Отзывы на результаты НИОКР



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»
(Госкорпорация «Росатом»)
Директор по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО
ул. Б.Ордынка, 24, Москва, 119017
19.12.2019 № 1-2/60000
На №_____от_____

Заместителю генерального директора директору ИМ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»
Скоробогатых В.Н.

О рассмотрении результатов НИОКР

Уважаемый Владимир Николаевич!

Рассмотрев результаты 1 этапа работы по теме «Создание и разработка нормативных требований к новым коррозионностойким многослойным металлическим материалам с внутренним протектором для объектов хранения РАО», отмечаю, что многослойный материал с внутренним протектором может быть использован для емкостей для сбора, переработке, хранению и кондиционированию ЖРО.

В целом работа выполнена на высоком научном и техническом уровне. Приведенные результаты указывают на возможность многократного увеличения коррозионной стойкости, а, соответственно, и ресурса работы (в 10 раз и более) в условиях сохранения высоких механических и технологических свойств, а также на возможность применения промышленных способов дуговой сварки для получения металлических конструкций из многослойного материала. В то же время необходимо продолжение работы для доработки технологии сварки данных материалов.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
СВЕДЕНИЯ О СЕРТИФИКАТЕ ЭП
Сертификат: 012f04e8 218940c9 ad611a5e c19dc621
Владелец: Крюков Олег Васильевич
Действителен с 20.11.2018 по 20.12.2019

О.В. Крюков

Хаперская Анжелика Викторовна
8-499-949-43-44

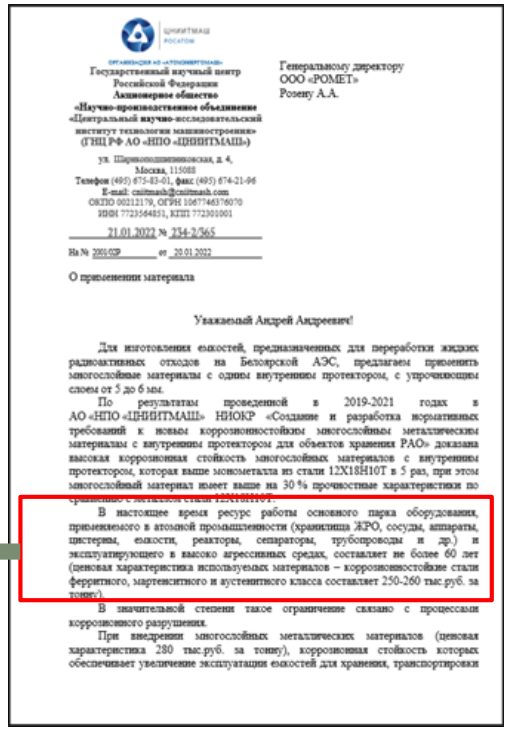
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»
Вх. № 234-04/8291 от 19.12.2019

Рассмотрев результаты работы отмечаю, что **МВП** может быть использован для емкостей по сбору, переработке, хранению и кондиционированию ЖРО. Работа выполнена на высоком научном и техническом уровне.
Приведенные результаты указывают на возможность многократного увеличения коррозионной стойкости, а, соответственно, и ресурса работы в условиях сохранения высоких механических и технологических свойств.

Директор по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО О.В.Крюков

По результатам проведённой НИОКР доказана высокая коррозионная стойкость многослойного металли-ческого материала с одним внутренним протектором, которая выше монометалла из стали 12Х18Н10Т в 6 раз, а прочностные характеристики - на 30 %.

Первый зам. ген. Директора ГНЦ РФ АО ЦНИИТМАШ С.В.Ефимов



ЦНИИТМАШ РОСАТОМ
Государственный научный центр Российской Федерации
Акционерное общество
«Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения»
(ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)
ул. Шарикоподшипниковская, д. 4, Москва, 115088
Телефон (495) 675-83-01, факс (495) 674-21-96
E-mail: cniimash@cniimash.com
ОКПО 00211279, ОГРН 1067746376070
ИНН 7723564851, КПП 772301001
21.01.2022 № 234-2/365
На № 2001/ОДР от 20.01.2022

Генеральному директору ООО «РОМЕТ» Розену А.А.

О применении материала

Уважаемый Андрей Андреевич!

Для изготовления емкостей, предназначенных для переработки жидких радиоактивных отходов на Белоярской АЭС, предлагаем применить многослойные материалы с одним внутренним протектором, с упрочняющим слоем от 5 до 6 мм.

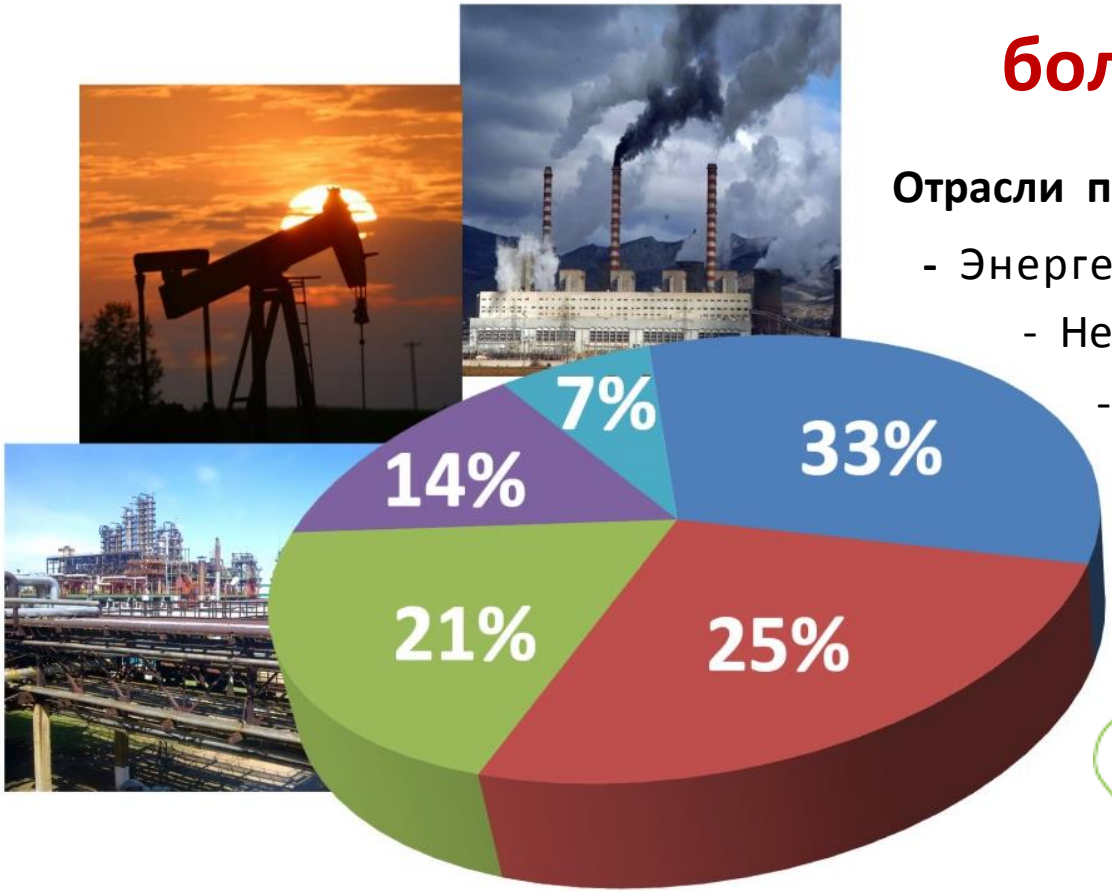
По результатам проведенной в 2019-2021 годах в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» НИОКР «Создание и разработка нормативных требований к новым коррозионностойким многослойным металлическим материалам с внутренним протектором для объектов хранения РАО» доказана высокая коррозионная стойкость многослойных материалов с внутренним протектором, которая выше монометалла из стали 12Х18Н10Т в 5 раз, при этом многослойный материал имеет выше на 30 % прочностные характеристики по сравнению с металлом стали 12Х18Н10Т.

В настоящее время ресурс работы основного парка оборудования, применяемого в атомной промышленности (хранилища ЖРО, сосуды, аппараты, цистерны, емкости, реакторы, сепараторы, трубопроводы и др.) и эксплуатирующего в высоко агрессивных средах, составляет не более 60 лет (ценовая характеристика используемых материалов – коррозионностойкие стали ферритного, мартенситного и аустенитного класса составляет 250-260 тыс.руб. за тонну).

В значительной степени такое ограничение связано с процессами коррозионного разрушения.

При внедрении многослойных металлических материалов (ценовая характеристика 280 тыс.руб. за тонну), коррозионная стойкость которых обеспечивает увеличение эксплуатации емкостей для хранения, транспортировки

Мировой объем рынка коррозионностойких материалов



более $ 900 000 000

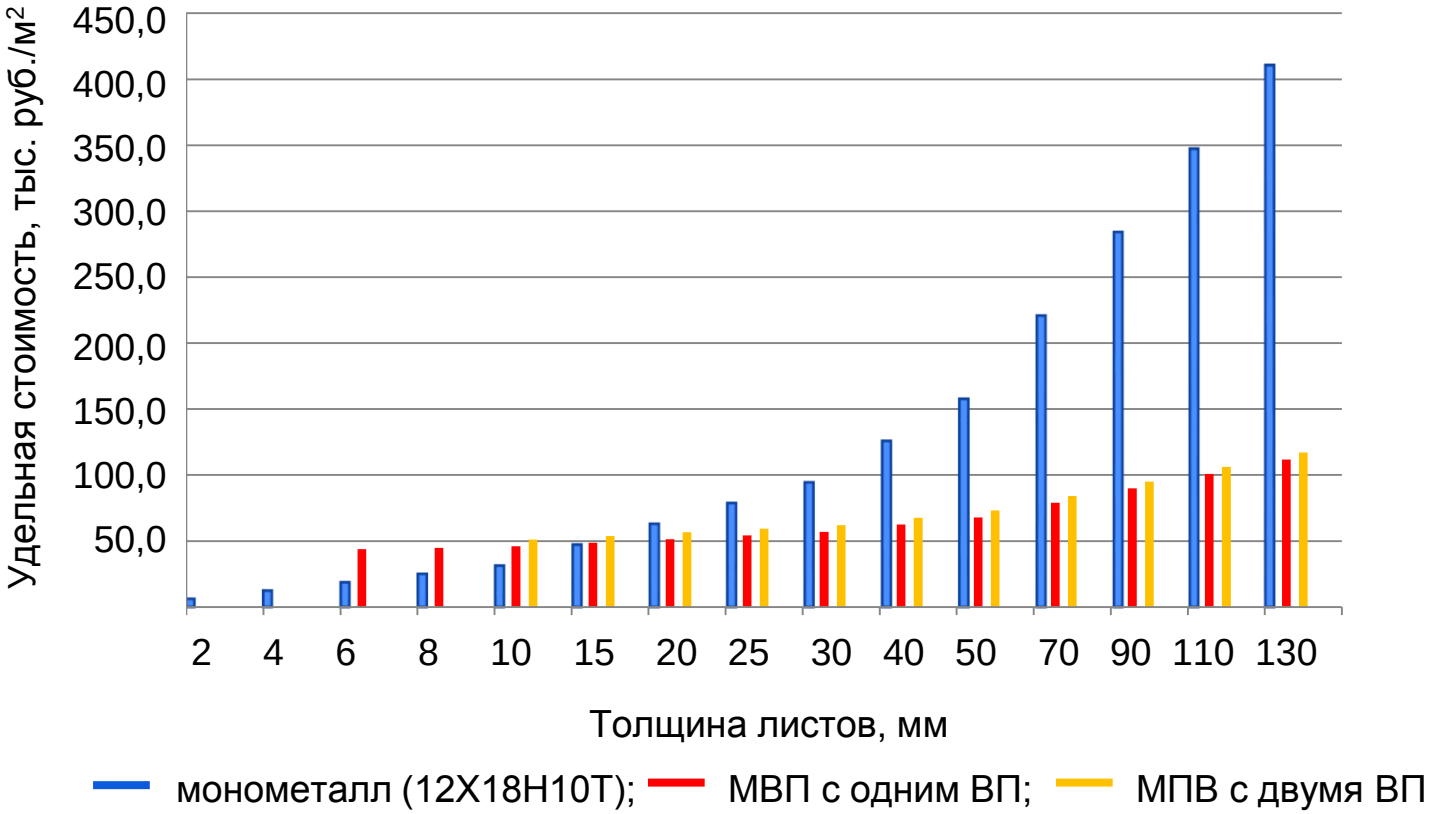
Отрасли потребления нержавеющей стали

- Энергетическая (33%)
- Нефтеперерабатывающая (25%)
- Химическая (21%)
- Атомная (14%)
- Судостроение (7%)

Анализ рынка был проведен компанией ООО «ЦКИ»

ЦЕНТР КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИЙ

Сравнительная стоимость нержавеющей стали и МВП



Эффективность применения МВП

Техническая характеристика	Архитектура листового материала								
	Монометалл 12Х18Н10Т			**МВП с одним ВП**			**МВП с двумя ВП**		
Толщина листа, мм	25,0	70,0	130,0	25,0	70,0	130,0	25,0	70,0	130,0
Удельная стоимость, тыс. руб./ м^2	79.0	221,2	410,8	54,2	78,9	111,9	59,4	84,1	117,1
Ресурс работы, отн. ед.	1.0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	23,0	23,0	23,0
Ударная вязкость, (не менее) **KCU**, кДж/м^2	215	215	215	290	290	290	290	290	290
Предел прочности (не менее) $\sigma_в$, Н/мм^2	550	550	550	640	640	640	640	640	640

МВП может осуществить **импортозамещение** толстолистовой нержавеющей стали при значительном снижении стоимости материала, увеличении механических свойств и ресурса работы.

Ключевые достижения

1. Сравнительными коррозионными испытаниями доказано повышение коррозионной стойкости **МВП** в сравнении с высоколегированными нержавеющими сталями аустенитного класса (12Х18Н10Т) :
   - в **6 раз** при наличии одного **ВП**;
   - в **23 раза** при наличии двух **ВП**.
2. За **3 года** произведено более **200 м²** 3-х, 4-х и 6-тислойных МВП с одним и двумя внутренними протекторами.
3. Локализованы все виды технологической обработки в пределах Пензенской области:
   - сварка взрывом;
   - термическая обработка;
   - правка (прокатка);
   - штамповка;
   - дуговая сварка;
   - сертификация произведённого материала.
4. В пределах Пензенской области подготовлена технологическая база для производства **МВП** до **12 тыс. м²** **в год** с поставками конечной продукции в течение **20** дней.

Ключевые достижения (продолжение)

5. Разработаны и утверждены нормативные документы:
- стандарт Организации **СТО ИСМ 001.007.18-0001-2021**;
- технические условия (**ТУ 24.33.30-001-09494191-2021**);
- технология сварки взрывом (**РБТМ.0129072.00002**);
- операционные Технологические Карты (**РБТМ.6029072.00004, РБТМ.6029072.00005**).

6. Проведены натурные испытания опытного образца в составе наливной и контролируемой спец. канализации ЖРО, которые подтвердили возможность повышения их ресурса работы со **100** до **600** и **900 лет,** соответственно.

7. Создан материал высокой степени новизны и перспективности применения, который по ценовой категории находится в одном ряду с высоколегированными нержавеющими сталями аустенитного класса, а по величине коррозионной стойкости сопоставим с палладием, никелем и хастеллоем.

8. Уровень технологической готовности **TRL 6**.

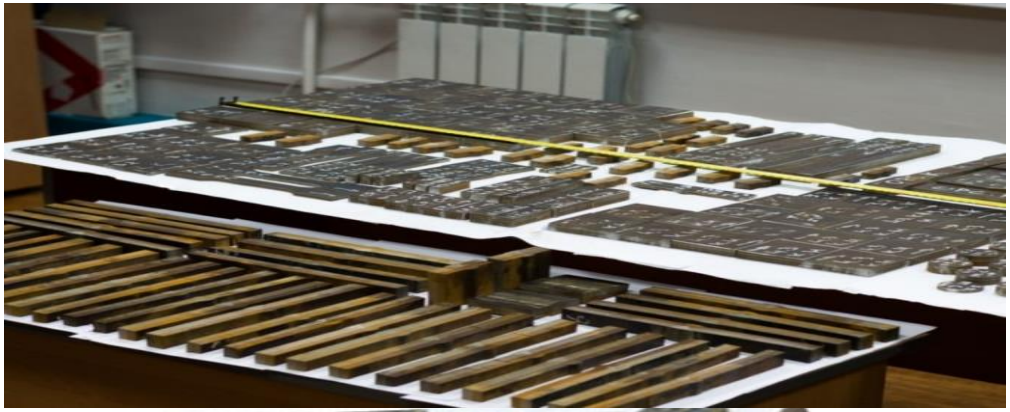
9. Возможность замены толстолистовых (более **20 мм**) материалов из нержавеющей стали с аустенитной структурой на **МВП** с повышенным ресурсом работы и низкой себестоимостью (пример **импортозамещения**).

Часть 2

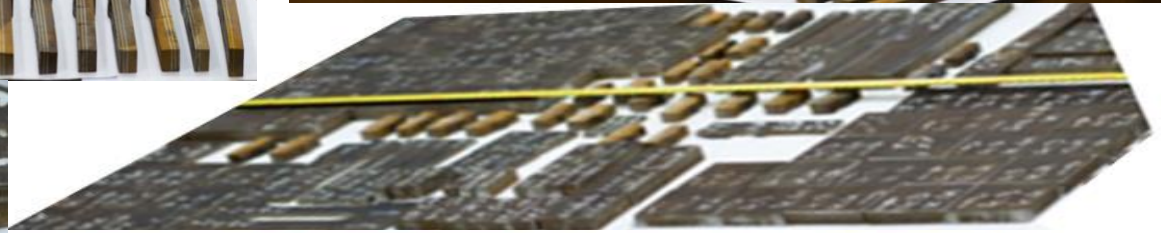
Механические, технологические и эксплуатационные свойства слоистых металлических материалов с «внутренним протектором»

Образцы для испытаний



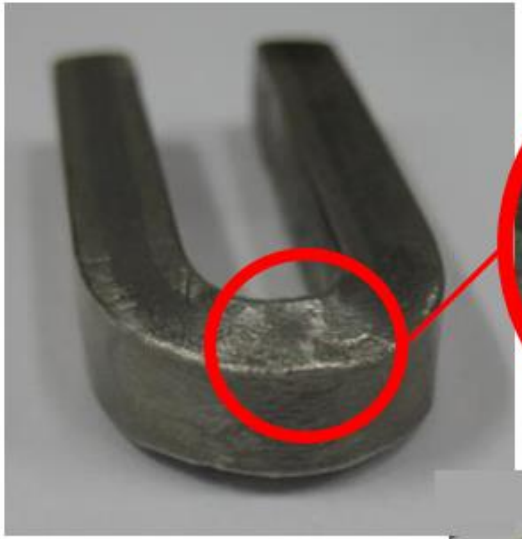








Статический изгиб сварного соединения МВП





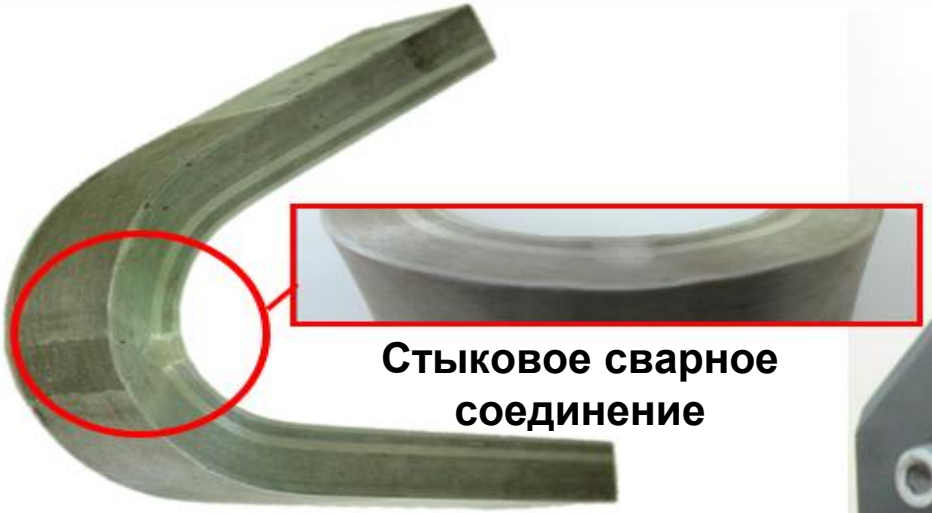




Испытания до параллельности сторон – 180 град.

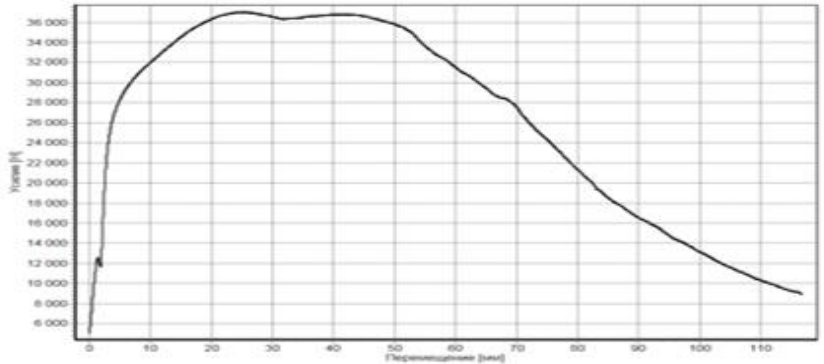
Испытания до определённого угла - 105 град.

Статический изгиб сварного соединения МВП



Стыковое сварное соединение





Эксплуатационные характеристики

Техническая характеристика	Архитектура листового материала			
	Монометалл 12Х18Н10Т	**3-хслойная с одним ВП**	**4-хслойная с одним ВП**	**6-тислойная с двумя ВП**
Прочность сцепления слоёв на каждой межслойной границе, $\sigma_{ср}$, (не менее) Н/мм^2	—	320		
Временное сопротивление на разрыв основного слоя, $\sigma_в$, (не менее) Н/мм^2	550	640	640	
Ударная вязкость основного слоя, (не менее) **KCU**, кДж/м^2	215	290	290	
Угол загиба, ***α*** град, не менее	180	180	180	147
Время коррозионного поражения защитного слоя, ч (сут) *	**1663 (70)**	**10097 (420)**	**10097 (420)**	**38270 (1600)**

– эксплуатационные характеристики вновь созданного материала (МВП);

* – толщина слоя противокоррозионной защиты при 1 ВП – 6мм, 2 ВП – 10 мм.

Наши партнеры

Министерство обороны РФ

МИНПРОМТОРГ РОССИИ

РОСАТОМ

Российский научный фонд

ФОНД СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ малых форм предприятий в научно-технической сфере

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОСИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Sk Сколково

Фонд развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий

Благодарю за внимание!



Д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Сварочное, литейное производство и материаловедение», Пензенский государственный университет

Розен Андрей Евгеньевич

E-mail: aerozen@bk.ru

+7 (927) 380 - 93 - 81

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Разработка модели прогноза и управления процессом формирования и удаления неметаллических включений на технологических этапах производства НЛЗ

АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

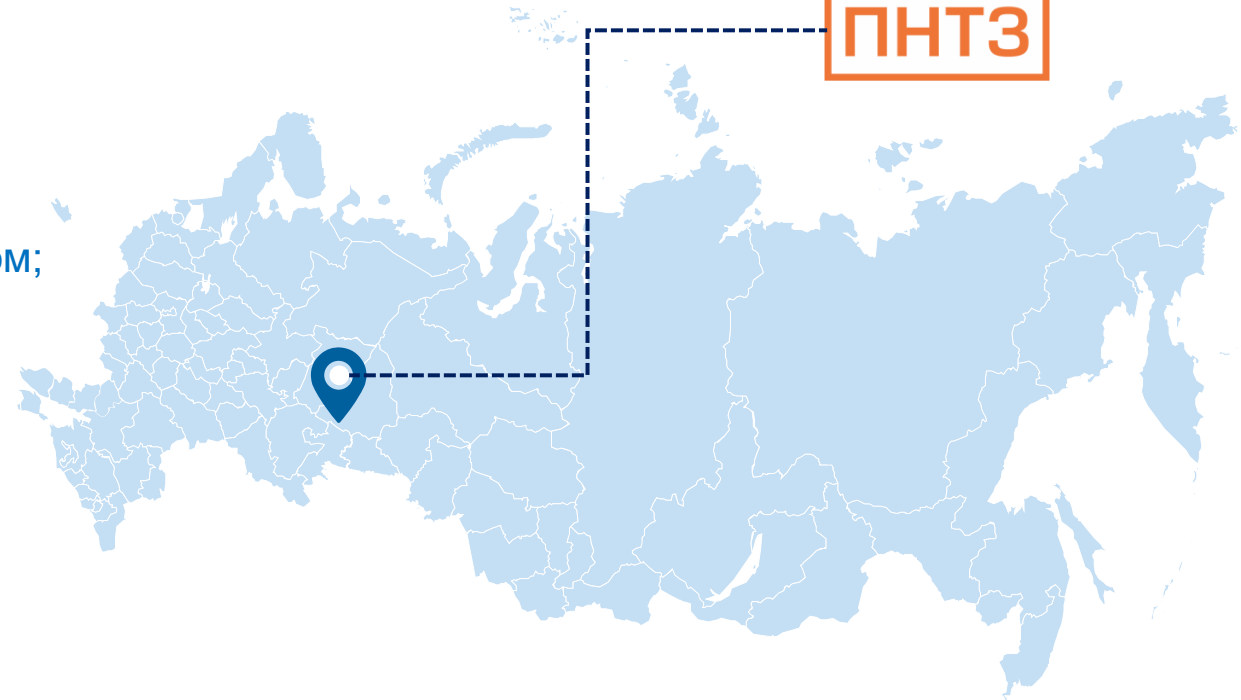
Мальгинов Антон Николаевич
Заведующий лабораторией

07.09.2023

Цель работы

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Определение возможности разработки модели прогноза и управления процессом формирования и удаления неметаллических включений по ходу выплавки, внепечной обработки и разливки стали для принятых и перспективных схем производства стали на АО «ПНТЗ»



Обеспечение гарантированного уровня свойств и качества изделий может быть достигнуто за счет:

- контроля и управления технологическим процессом;
- проведения на основании учета фактических значений комплекса технологических параметров предиктивного анализа возникновения дефектов, влияющих на качество заготовки и труб на этапах технологического передела;
- проведения углубленных аналитических исследований для анализа причин возникновения брака, выявления резервов производства, повышения качества продукции

Методология

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

- оценка влияния с помощью методов машинного обучения каждой стадии технологического процесса (выплавка, обработка металла на установке АКП, разливка на МНЛЗ) на количество сформировавшихся НВ и вызванных их присутствием различных видов брака готовой продукции. Выявление существенно влияющих признаков для каждой стадии процесса и определение для них оптимальных областей значений;
- разработка предварительных моделей, позволяющих прогнозировать выявленные существенные признаки в реальном времени на основе имеющейся технологической информации;
- оценка влияния расчетных по моделям признаков на количество сформировавшихся НВ и вызванных их присутствием различных видов брака готовой продукции;
- оценка влияния расчетных по моделям признаков предыдущей стадии технологического процесса на расчетные признаки следующей стадии процесса;
- определение оптимальных областей значений для расчетных признаков и реальных параметров технологического процесса с целью выработки конкретных рекомендаций ведения и коррекции процесса;
- оценка эффективности предложенного комплекса предварительных моделей в совокупности с рекомендуемыми параметрами технологического процесса с точки зрения снижения содержания НВ и вызванных их присутствием случаев возникновения брака



Концепция проекта

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Физическая модель

Статистическая модель

- ❑ физико-химические законы, описывающие термодинамику и кинетику процессов:
  - расчет количества шлака;
  - расчет распределения и содержания фосфора;
  - расчет распределения и содержания серы;
  - расчет вводимых легирующих элементов;
  - расчет количества алюминия на раскисление стали;
  - расчет десульфурации и др.
- ❑ закон сохранения массы;
- ❑ закон сохранения энергии

Ансамбль моделей

- Модель 1 (продукт)
- Модель 2 (продукт)
- Модель n (продукт)

Выполнение на основе методов машинного обучения анализа параметров технологического процесса, выявление их влияния на моделируемую величину, отбор наиболее значимых и выстраивание моделей с разной степенью значимости, которые консолидируются в ансамбли, повышающие уровень прогнозности и устойчивости их работы

+ компьютерное моделирование

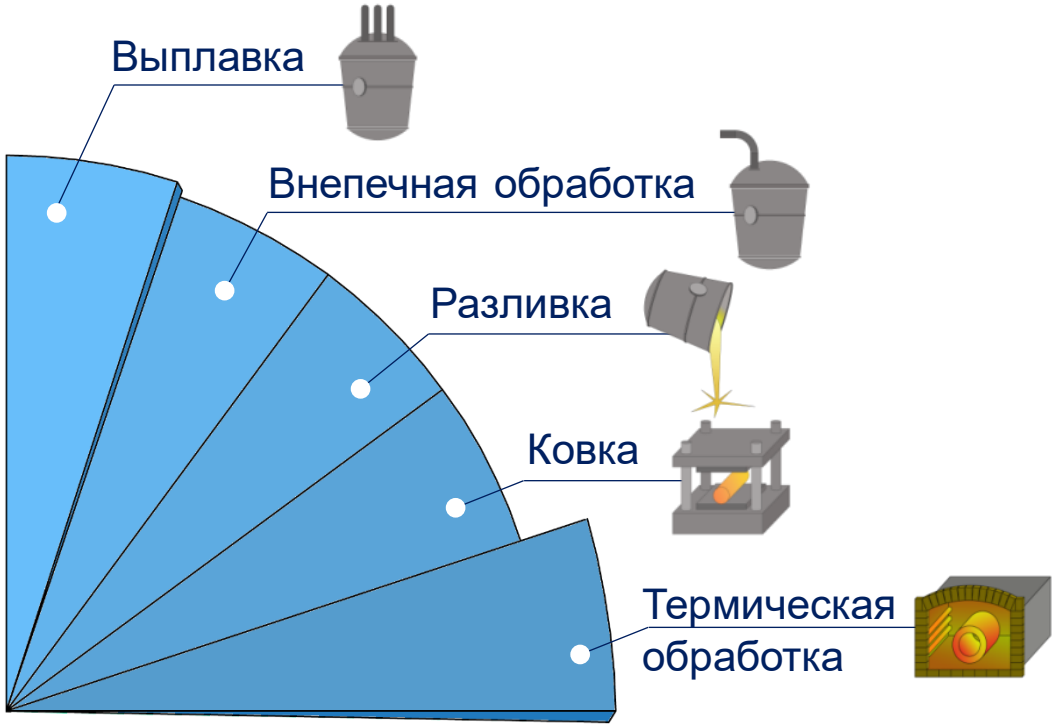
Способы машинного обучения:

- ❑ k-ближайших соседей;
- ❑ лес деревьев;
- ❑ градиентный бустинг;
- ❑ линейная регрессия и др.

python

Java

Существующее решение

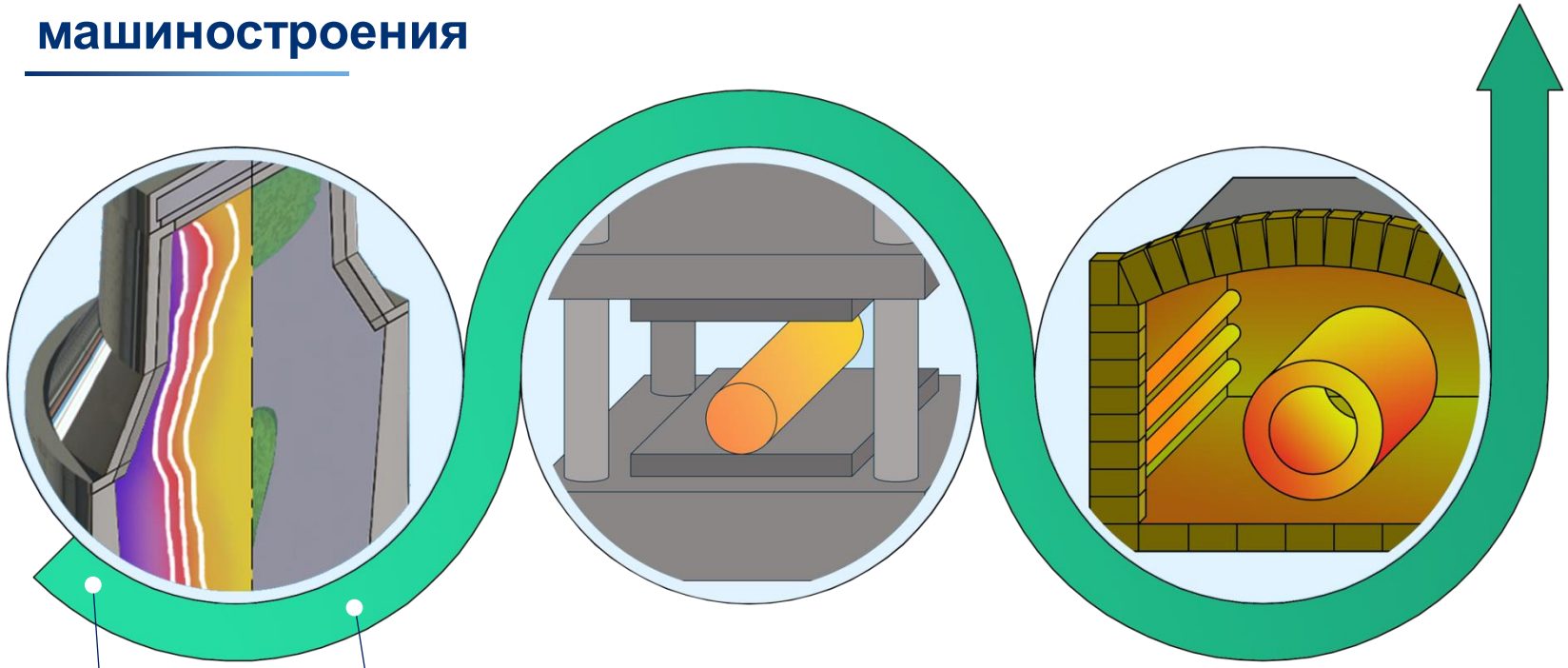


ПРОГНОЗ
КОНТРОЛЬ
УПРАВЛЕНИЕ

Концепция проекта. Сквозное моделирование

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Существующее решение для машиностроения



Реализация сквозного моделирования

Характеристики «заданного состояния»

- Физическая неоднородность
- Структурная неоднородность
- Химическая неоднородность

BIG DATA

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Источники формирования базы данных для обучения моделей

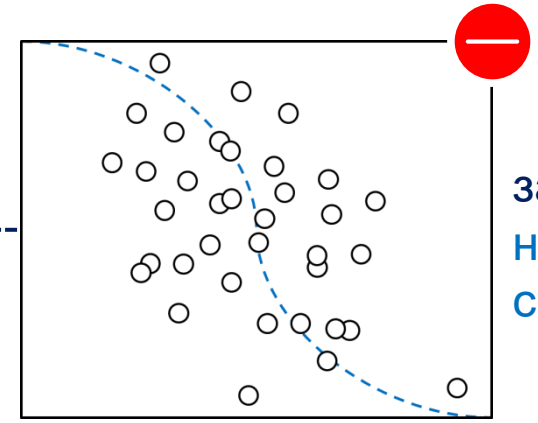
ПЛАВКИ (ДСП и АКП):

Период: 2020…2022 годы
Количество: 27851
(2965 – с браком по НВ)

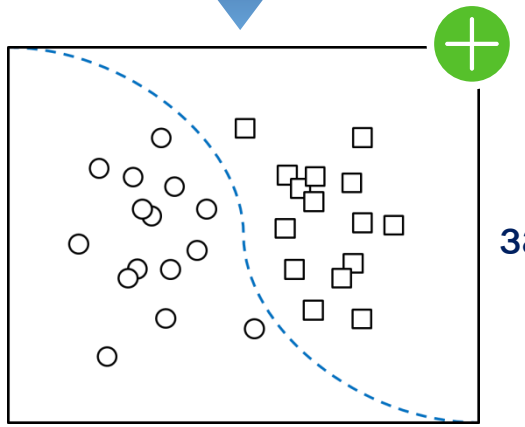
ПРОКАТКА:

Период: 2020…2022 годы
Выборки по браку: 4 стана
(30-102, 140, 160, 220)





задача регрессии:
низкая прогнозная способность



задача классификации

Оценка значимых параметров процессов. Тест

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Выплавка полупродукта в ДСП

СИЛИКАТЫ НЕДЕФОРМИРУЕМЫЕ



Оценка значимых параметров процессов. Тест

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Обработка стали на АКП

СИЛИКАТЫ НЕДЕФОРМИРУЕМЫЕ

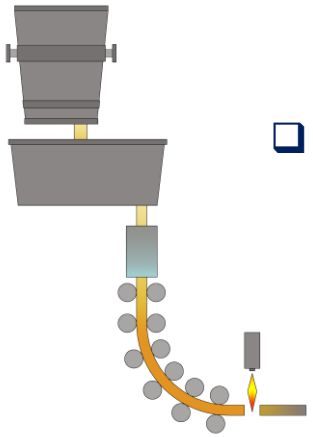


Оценка значимых параметров процессов. Тест

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Разливка стали на МНЛЗ

- превышение среднего значения параметра эрозии -6 мм/период способствует повышению содержания НВ и случаев возникновения дефектов;
- при значениях параметра зарастания, близких к нулю, количество НВ возрастает. Далее с ростом зарастания количество НВ снижается, но, начиная с величины 10…15 мм/период, имеет место рост НВ и случаев возникновения брака за счет увеличения случаем смывов отложений;
- скорость разливки на установке НЛЗ. Для диаметра заготовок 145, 150, 156 мм предпочтительна скорость 3,5…4 м/мин, для диаметров 170, 180 и 220 мм – 2,5…3 м/мин (для среднеуглеродистого сортамента);
- превышение максимального отклонение уровня металла в кристаллизаторе от среднего 5…7 мм ведет к увеличению уровня загрязненности НВ и возникновения случаев брака;
- превышение изменения равновесного содержания кислорода в металле при кристаллизации 0,6 ppm ведет к увеличению уровня загрязненности НВ и возникновения случаев брака



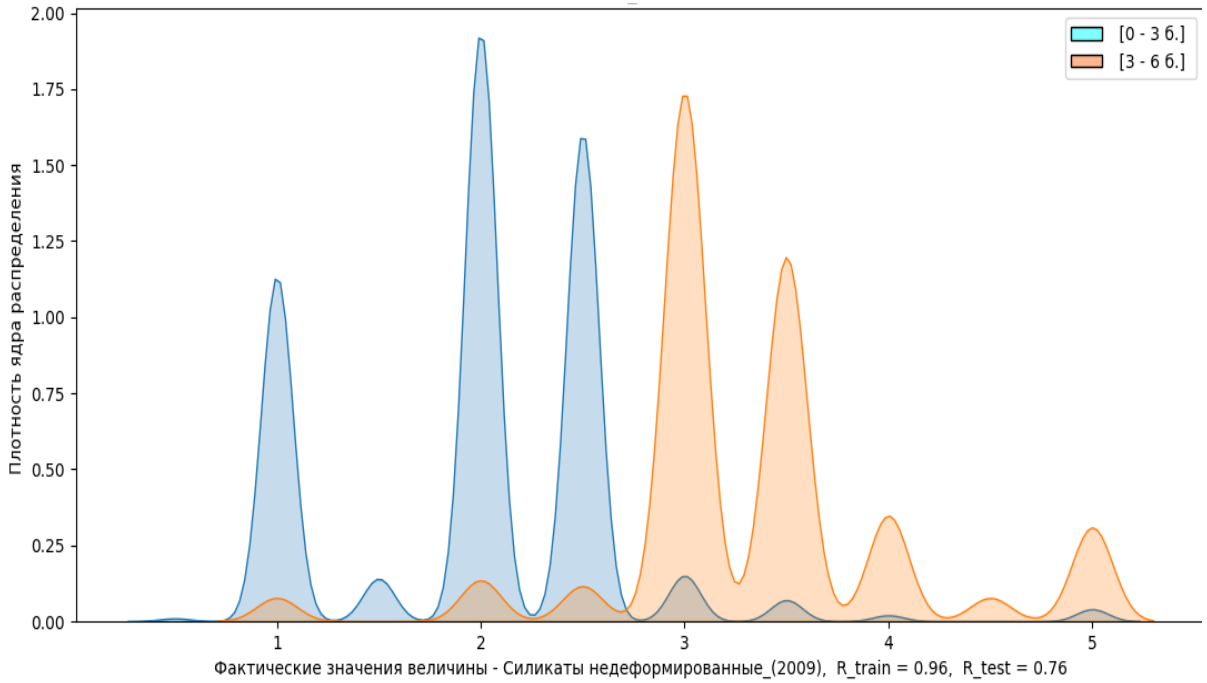
Построение моделей

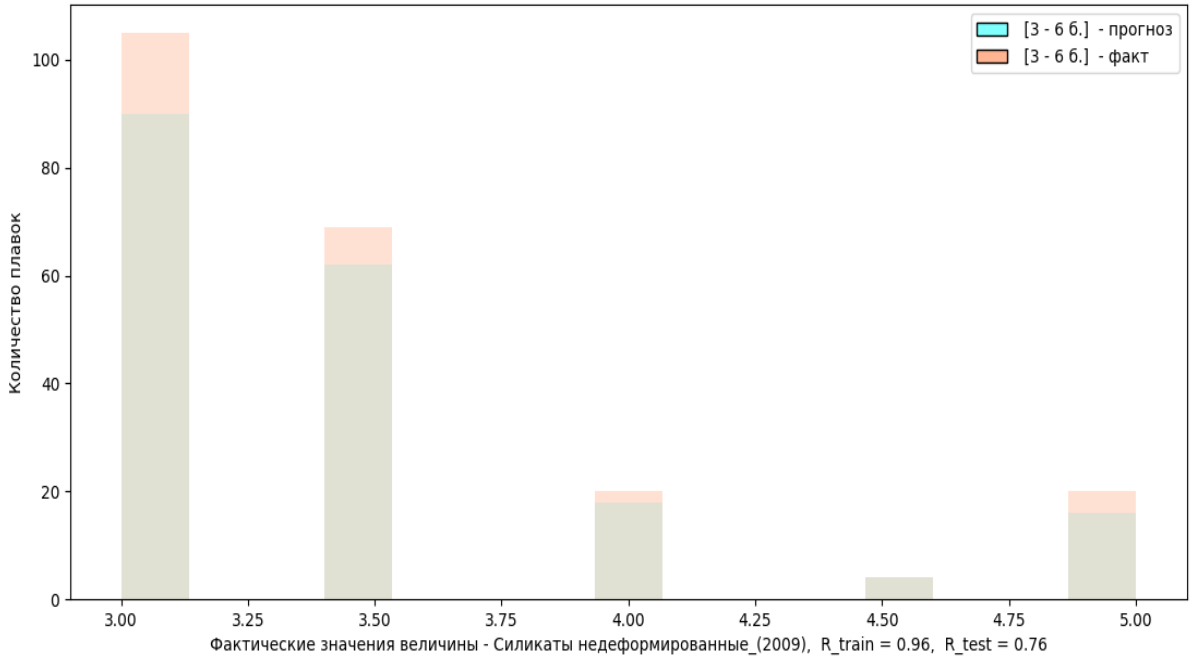
ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Прогноз формирования и удаления НВ на базе классификационных методов

Неметаллические включения. Сталь 06Х1ФБ

0…3 балла **3…6 баллов**





ВЫВОДЫ

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ



1. Выявлены основные признаки технологических процессов выплавки полупродукта в ДСП, обработки стали на АКП и ее разливки на МНЛЗ, влияющие на формирование НВ
2. На базе регрессионных методов машинного обучения построены модели прогноза наличия неметаллических включений в зависимости технологических признаков металлургического передела. Разработанные модели имеют достаточно высокую степень достоверности описания процессов формирования и удаления неметаллических включений на обучающем наборе данных (коэффициенты корреляции 0,8…0,9), однако на тестовых наборах данных показали низкую прогностическую способность (коэффициент корреляции 0,1…0,2). Это позволило прийти к выводу о том, что использование регрессионных моделей для прогноза и управления наличием неметаллических включений в металле НЛЗ не представляется возможным
3. На базе классификационных методов машинного обучения построены модели прогноза наличия неметаллических включений в зависимости технологических признаков металлургического передела. Разработанные модели имеют достаточно высокую степень достоверности описания процессов формирования и удаления неметаллических включений на обучающем наборе данных (коэффициент детерминации 0,9…1), а также на тестовых наборах данных (коэффициент детерминации 0,76…0,8). Количество правильно предсказанных плавок с повышенной загрязненностью НВ в пределах 3…6 балла составляет свыше 90 % от фактического количества плавок с НВ в пределах 3…6 балла
4. Построенные модели образования и удаления НВ при изготовлении труб обладают высокой степенью достоверности, прогностической способности и могут быть использованы для управлениями процессами производства НЛЗ с заданным уровнем чистоты по НВ, изготовления труб требуемого уровня качества

Спасибо за внимание !

Мальгинов Антон Николаевич

ANMalginov@cniitmash.com

07.09.2023

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Сочетание композиционного и технологического подходов при обеспечении качества заготовок из супердуплексных сталей

Седьмая научно-техническая конференция
«Коррозия и управление рисками в нефтяной и газовой промышленности»
атомной отрасли «КОМАНДА-2023»

Ксения Николаевна Уткина, ведущий научный сотрудник

Л.Я. Левков, Е.Л. Корзун, И.А. Иванов, М.В. Ульянов

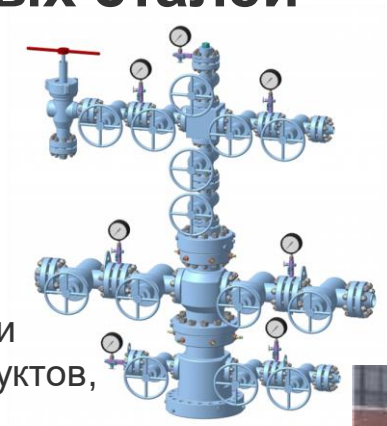
05-07 сентября 2023 г.

Актуальность применения супердуплексных сталей

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Добыча нефти и газа

Запорно-регулирующая арматура, оборудование шельфовой и наземной добычи





Химическая промышленность

Котлы сульфатной варки целлюлозы, установки рециклинга карбамида, емкости для промпродуктов, сосуды высокого давления



Машиностроение

Оборудование по очистке сточных вод, объекты гражданского строительства, включая несущие конструкции мостовых опор



Атомная энергетика

Опреснительные установки и трубопроводы морской воды АЭС



Рынок дуплексных и супердуплексных сталей

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Металлургические заготовки из дуплексных и супердуплексных сталей, востребованные на рынке:

- литье
- поковки и штамповки
- листовой прокат
- сортовой прокат
- трубы бесшовные
- сварочная проволока

Мировой рынок:
250-280 тыс.т/год
рост 3-5 %/год

Основные производители оборудования: Cameron; Vetco Gray; Weatherford; Sumitomo, Kawasaki, FMC TECHNOLOGIES; General Electric; One Subsea, Axon; Mokveld Valves; Baker Hughes; Halliburton; Schlumberger и металлургических заготовок: Sandvik; Outokumpu; Böhler; AK Steel; Arcelor Mittal; POSCO; Baosteel и др.

Перспектива – замещение импорта заготовок и оборудования

Металлургические и машиностроительные предприятия-изготовители:

ОАО «Русполимет»; АО «АЭМ-Спецсталь»; АО «МЗ Электросталь»; ООО «ЛМЗ «МашСталь»; Группа ТМК; АО «Новомосковский МЗ»; ООО «ПОЛЕМА»; АО «Гранком»; ООО «Завод НГО «Техновек» и др.

Отрасли потребления СДС



Ключевые заказчики/ потребители:

Нефть/газ: Газпром, Роснефть, Транснефть, Лукойл,Татнефть, Новатэк

Химия и насосное оборудование: Сибур, Фосагро, НКНХ,Танэко, ГМС

Опреснительное, теплообменное и очистное оборудование: Росатом, ГМК, ЦБК, городское коммунальное хозяйство

Сочетание композиционного и технологического подхода при создании нового материала

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Совершенствование химического состава ЗИ-130 (03Х24Н6АМ3) ⟶ 03Х23Н6М4Д3АБ-Ш:

C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	N	Mo	Nb	Al	S	P
н.б. 0,03	0,3-0,5	0,9-1,2	5,8-7,0	22,5-24,0	3,0-3,3	0,16-0,25	3,5-4,8	0,27-0,37	н.б. 0,04	н.б. 0,015	н.б. 0,008

Композиционный подход

- регулирование соотношения феррит- и аустенитобразующих элементов
- легирование N, Nb, Cu;
- модифицирование РЗМ и Ca



Технологический подход

- обеспечения высокой технологической пластичности;
- повышения прочности путем дисперсионного упрочнения материала;
- обеспечение плотной макроструктуры, физической однородности слитка и, как следствие, отсутствия проблем дендритной ликвации Cr, Ni, Mn и Mo;
- повышения чистоты стали по коррозионно-активным неметаллическим включениям

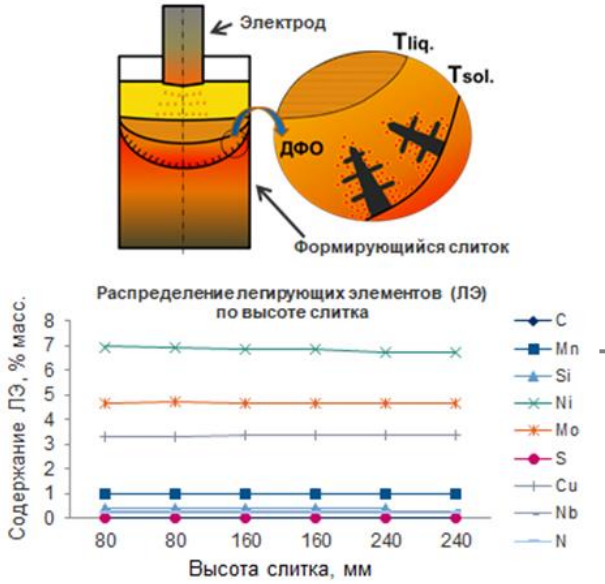
Использование инструментов компьютерного моделирования термодинамики и кинетики фазового состава позволило определить оптимальный химический состав

Дуплексная нержавеющая сталь для производства запорной и регулирующей арматуры / Левков Л.Я., Уткина К.Н., Шурыгин Д.А., Баликоев А.Г., Ефимов В.М., Калугин Д.А., Марков С.И., Орлов С.В., Толстых Д.С. / Патент на изобретение RU 2693718 C2

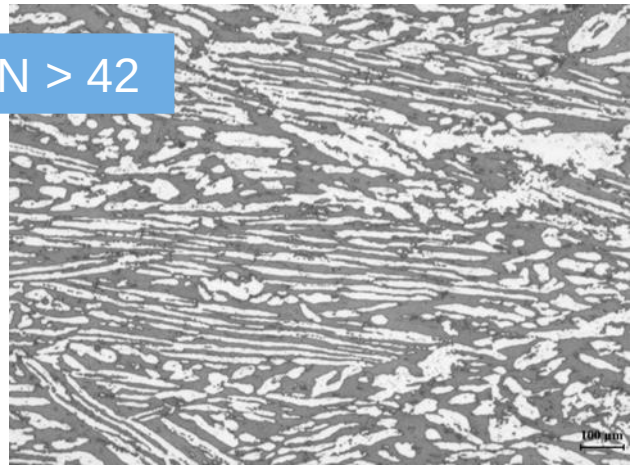
Реализация преимуществ новой марки супердуплексной стали

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

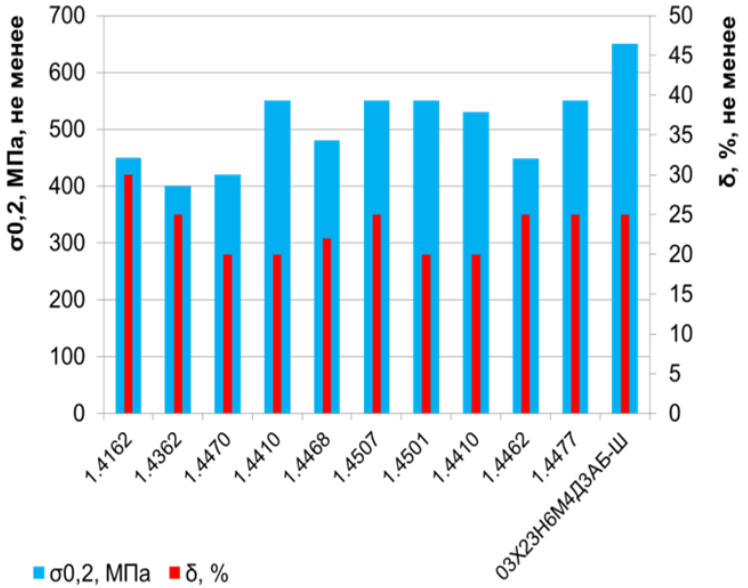
Максимальное использование отходов собственного производства	Обеспечение химической, физической и структурной однородности слитка	Обеспечение высоких скоростей деформации без захолаживания поверхности	Закалка из состояния твердого раствора δ/γ≈ 1	Высокое качество поверхности - условие коррозионной стойкости
Выплавка	ЭШП	Горячая пластическая деформация	Термообработка	Механическая обработка



PREN > 42



Микроструктура и механические свойства стали 03Х23Н6М4Д3АБ-Ш



Возможности технологической площадки АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Участок выплавки и разливки



Печь ИСТ-0,16



УНУ электрошлакового переплава ЭШП 0,5У с источниками питания 0-10 Гц и 50 Гц



Печь ОКБ-716

Участок термодеформационного передела



молот с массой падающих частей 750 кг



электропечь сопротивления камерная СНО-8.16.5/12,5-И1





Закалочный бак с системой циркуляции потока не менее 3 м/с

- Выплавка и разливка заготовок массой до 150 кг по жидкому металлу;
- Получение заготовок ЭШП Ø до 250 мм сплошного сечения и Ø 275х60 мм полого сечения;
- Охлаждение заготовок и сталей массой до 70 кг с использованием специальных условий закалки;

Научно-практический задел АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

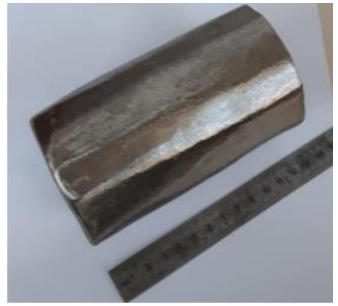
ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Разработка технологии производства заготовок корпуса арматуры и ВКУ из супердуплексной коррозионностойкой стали типа 03Х23Н6М4Д3АБ

Вид заготовки	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	Ψ, %
Поковка	825	643	27,0	61,0
Отливка	743	570	22,5	22,0



Отливка втулки

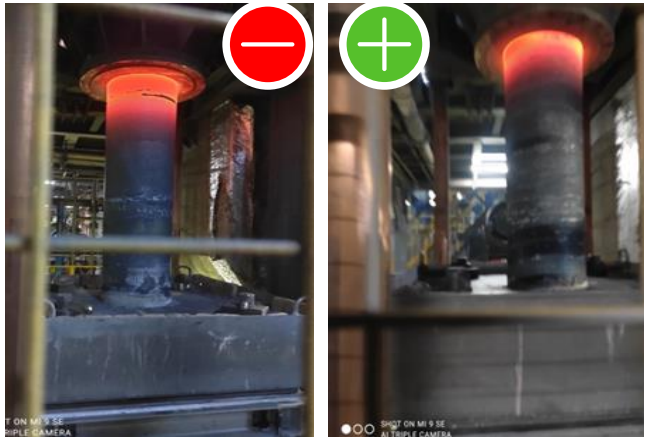


Поковка диска

Реализация схемы производства кованых на прессе или радиально-ковочной машине заготовок диаметром или стороной квадрата 127- 255 мм с применением ЭШП (S 32750)

Принудительное охлаждение «горячей» зоны слитка препятствует развитию диффузионных процессов формирования вторичных фаз, в т.ч. обеспечивает высокие скорости охлаждения в температурном интервале Т=1000-600 ℃

$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	Ψ, %	KCV^{-46}, Дж/см^2
min 810	min 620	min 35,0	min 70,0	min 177



Перспектива: Освоение отечественными металлургическими и машиностроительными заводами технологии производства заготовок из супердуплексной стали

Научно-практический задел АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Применение инструментов цифрового материаловедения для управления формированием вторичных фаз в супердуплексной стали

Модель расчета ударной вязкости, учитывающая:

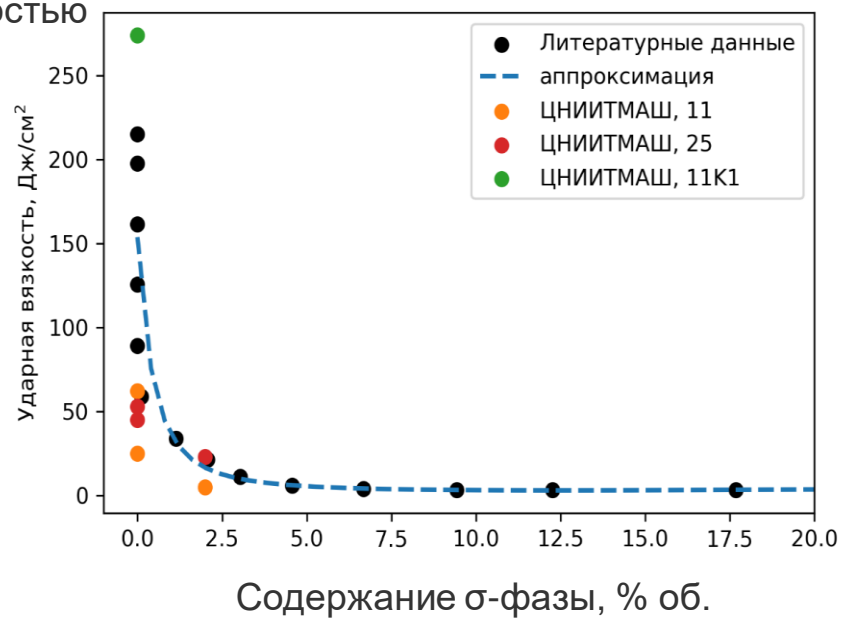


Зависимость критической скорости охлаждения от химического состава стали аппроксимирована линейной регрессией (R^2 = 0,995):

$$lg\, v_{cr} = -1,23[C] - 0,55[Si] - 0,10[Mn] + 1,82[Ni] + 0,17[Cr] + 1,17[Cu] + 9,40[N] + 3,75[Mo] - 1,12[Nb] - 36,30\ °C/c$$

Зависимость ударной вязкости от доли σ-фазы аппроксимирована приведенной зависимостью (R^2=0,945):

$$\frac{1}{KCV} = -0,01\ \sigma^2 + 0,15\ \sigma + 0,005$$



Перспектива:

Практический инструментарий для технолога, обеспечивающий отсутствие σ-фазы при назначенном режиме охлаждения

Работа выполнена совместно с ФГУП ВНИИА им. Духова Н.Л.

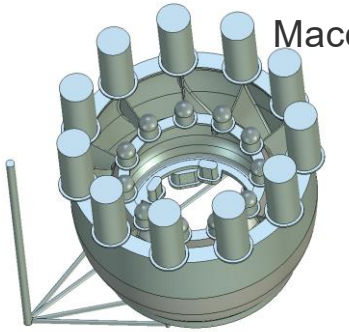
Перспективные направления развития производства супердуплексных сталей

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

- Разработка технологии и изготовление опытной партии бесшовных горячедеформированных труб из коррозионностойкой супердуплексной стали диаметром 60-219 мм на рабочее давление 34,5-69 Мпа

- Разработка технологии и изготовление опытной партии коррозионностойких тяжелонагруженных элементов насосных агрегатов из супердуплексной стали

Масса 17685 кг



3D-модель Колеса рабочего 73-53323

Масса 7631кг



Корпус направляющей лопасти

Применение дуплексной стали 1.4468 для изготовления отливок рабочего колеса насосного агрегата MLBe 2200 для блоков №3 и №4 АЭС «Куданкулам»

1. Для насосных агрегатов водообеспечения АЭС морской водой с годовой потребностью, оцененной в 400 т выгода может составить 350 млн. руб.;
2. Для теплообменного и опреснительного оборудования с годовой потребностью, оцененной в 50 т выгода может составить 30 млн. руб.

- Разработка сварочных материалов и технологии сварки деталей оборудования из супердуплексных сталей

Схема организации взаимодействия предприятий по производству заготовок и оборудования из супердуплексных сталей

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Машиностроительные и металлургические предприятия РФ

- АО «ЗиО-Подольск»,
- АО «СвердНИИхиммаш»,
- АО «НМЗ»,
- Ливгидромаш,
- МКТ-АСДМ,
- АО «Армалит»,
- ООО «Завод НГО «Техновек»,
- АО «Петрозаводскмаш»,
- Севкабель,
- АО «Русполимет»,
- АО «АЭМ-Спецсталь»,
- Группа ТМК
- ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»



Предприятия ГНХ, атомной энергетики

- ГК «Росатом» в лице АО «АСЭ»,
- ПАО «ФосАгро»,
- ООО «Газпром»,
- НК «Роснефть»,
- Группа «Лукойл»,
- ПАО «Татнефть»,
- ПАО «Транснефть»,

Заявка на выполнение ОКР/НИОКР

- Министерство промышленности и торговли РФ
- Министерство образования и науки РФ

Одобрение заявки путем проведения конкурсной процедуры. Финансирование за счет бюджетных средств ОКР/НИОКР

Головная материаловедческая организация

Заключение

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

- Имеющийся научно-практический задел служит основанием для выполнения опытно-конструкторских и опытно-технологических работ, ориентированных на применение супердуплексных сталей в изделиях, подверженных высоким механическим нагрузкам в контакте с морской водой;
- Специалисты АО «НПО «ЦНИИТМАШ» готовы разработать сквозные технологии литья, ковки, штамповки, термической и механической обработки изделий из дуплексных сталей в соответствии с потребностями заказчиков, а также выполнить цикл испытаний и подготовить портфель научно-технической документации.

Спасибо за внимание

Уткина Ксения

KNUtkina@cniitmash.com

05– 07 сентября 2023 г.

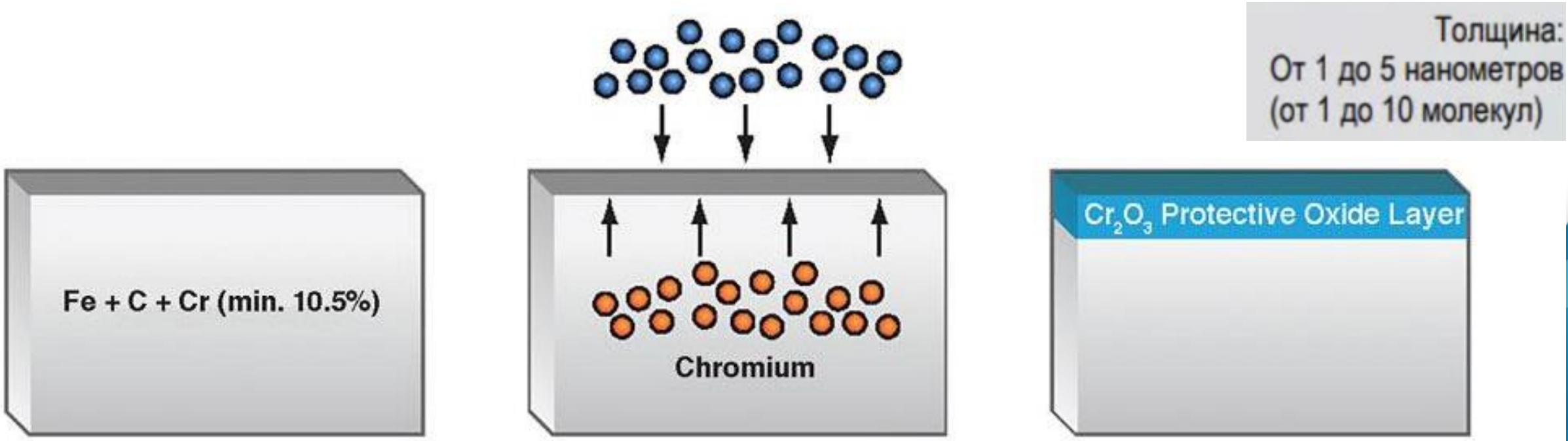
ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР
«САМАРА»

Особенности применения высоколегированных сталей в коррозионно-активных средах

Докладчик: Начальник аналитического отдела, к.ф.-м.н. Петров Сергей

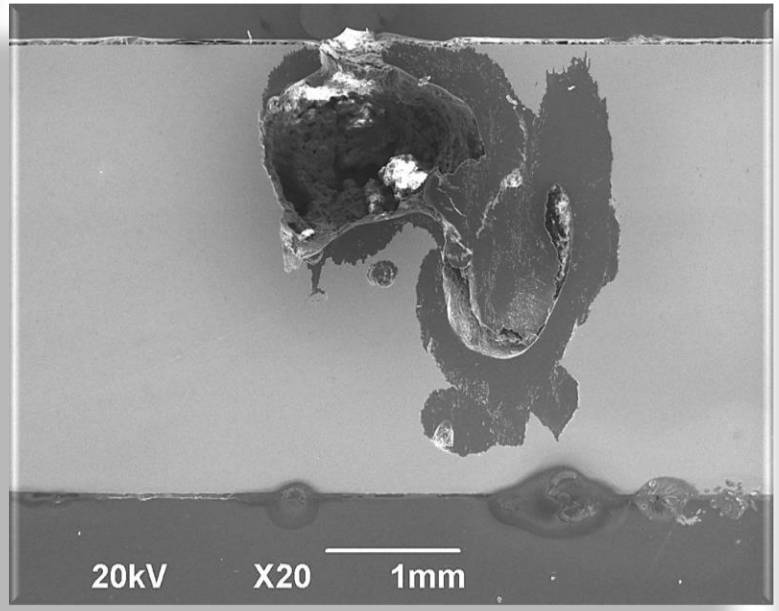
Легированные стали

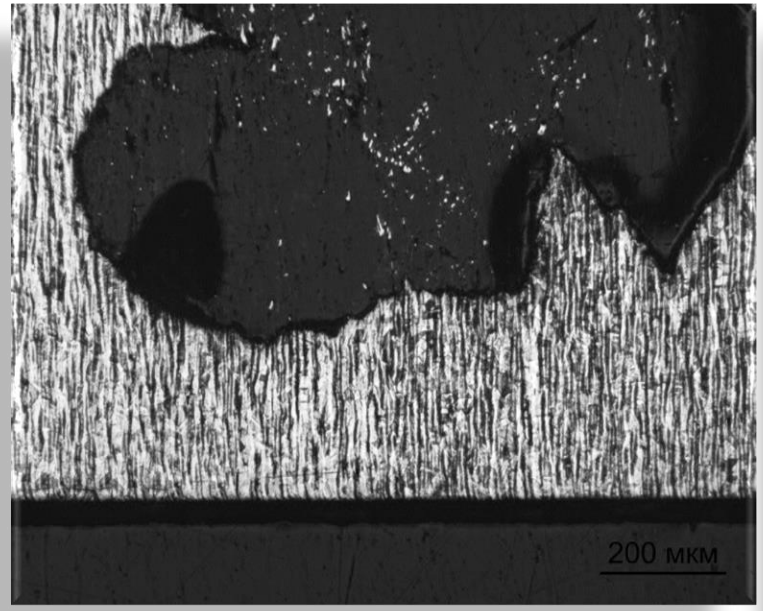
1.Ферритные содержат мало углерода (не более 0,15 %) и до 30 % хрома.
2.Аустенитные содержат не менее 7 % никеля и около 18 % хрома.
3.Мартенситные содержат 11–13 % хрома и до 0,5 % углерода.
4.Ферритно-аустенитные содержат 18–28 % хрома и 4,5–8 % никеля.

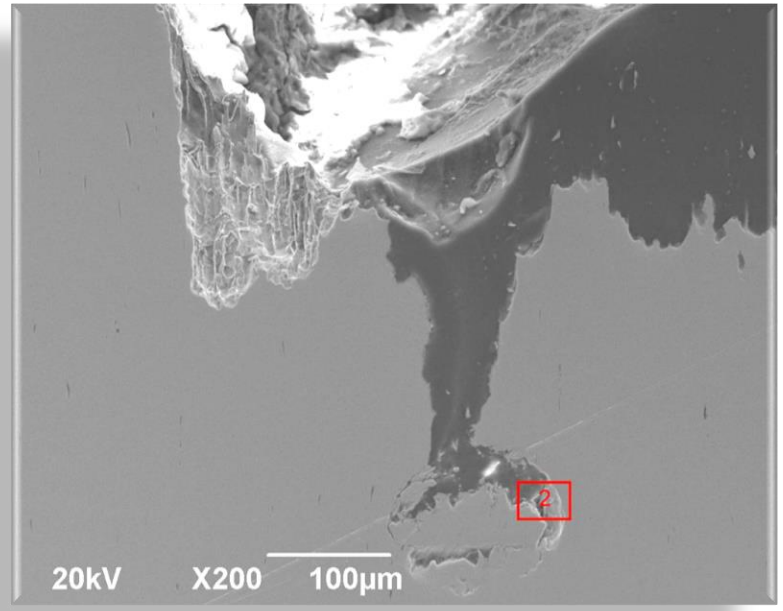


Корпус расходомера 316L (03Х17Н14М3)

Условия эксплуатации: морская вода, температура до 35 С.
Срок эксплуатации 3 месяца.







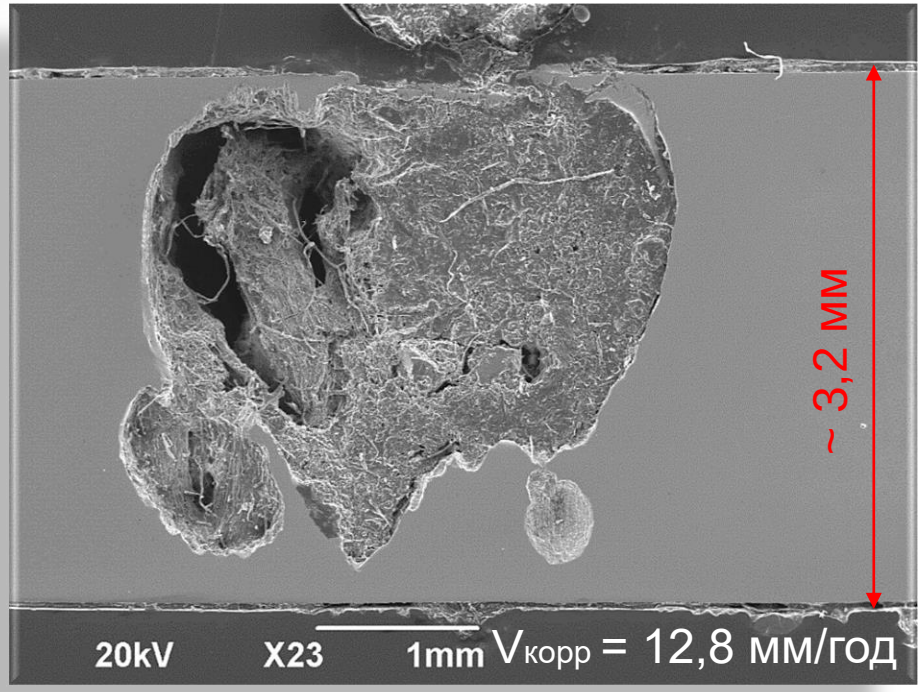
Химический состав металла, масс. %

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Mo
1	0,03	0,51	1,77	16,8	9,19	0,05	0,01	0,43	1,80

Химический состав ПК, масс. %

Элемент	C	Si	Cr	Ni	S
1	22,26	1,17	15,96	4,41	0,81

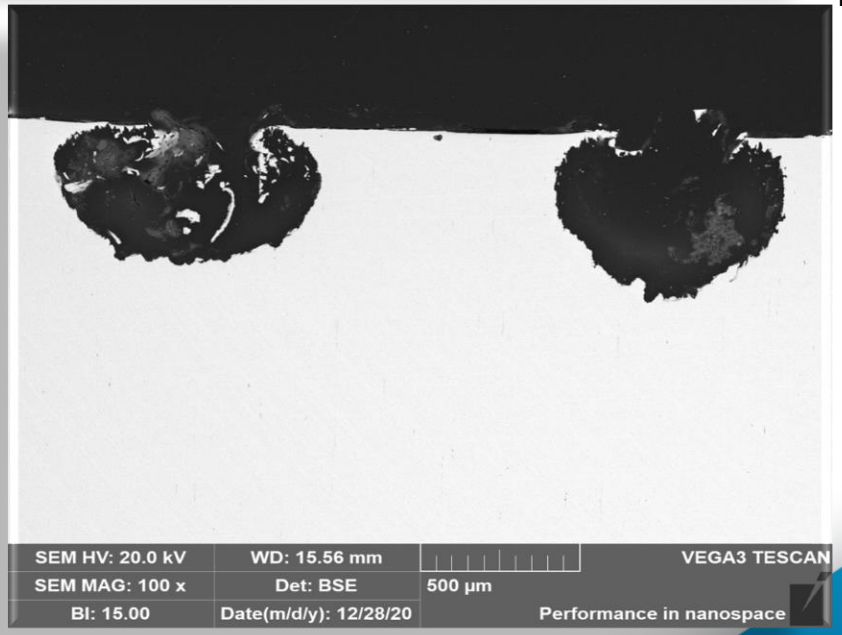
Корпус расходомера 316L (03Х17Н14М3)



Причина разрушения: коррозионное разрушение под действием хлора

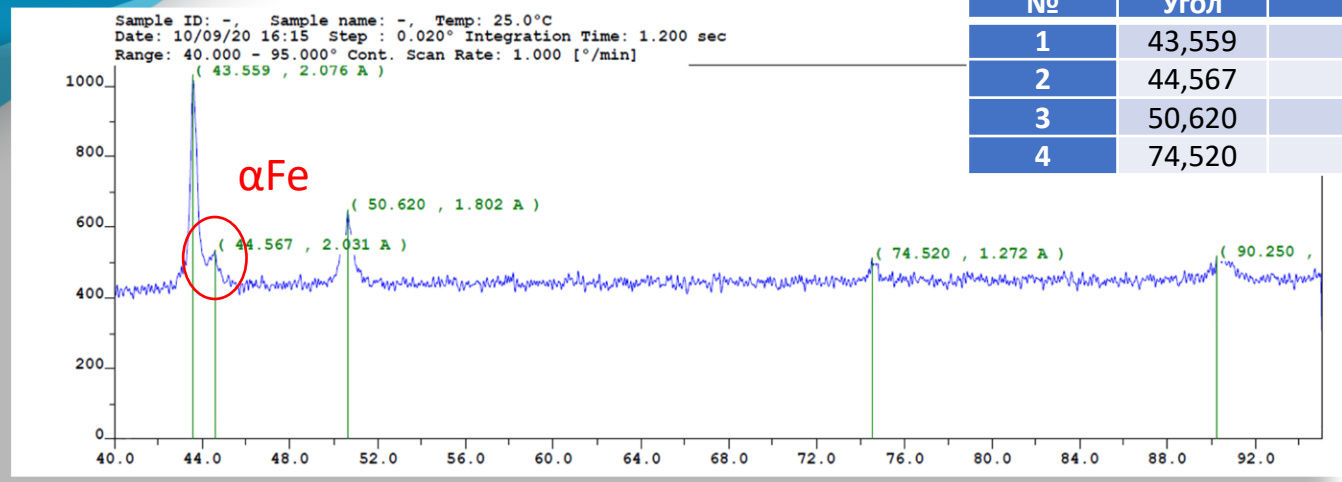


FeCl3



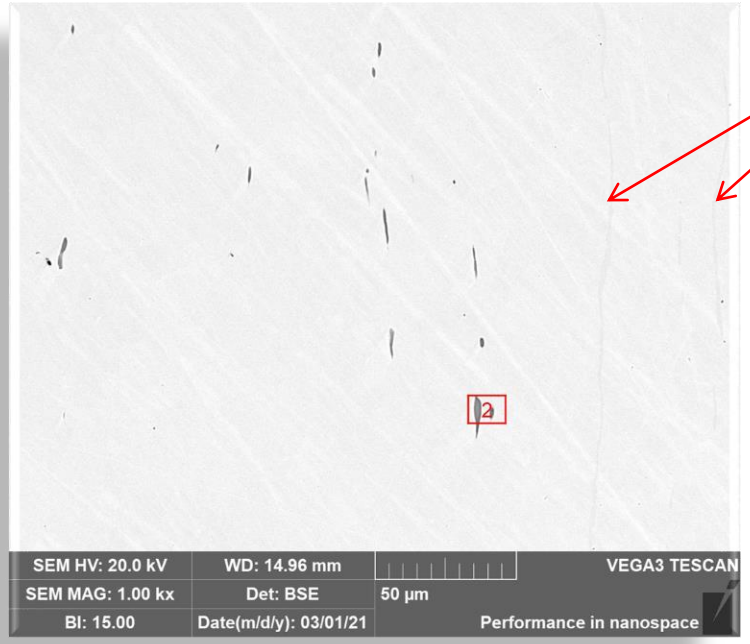
5 часов моделирования

Корпус расходомера 316L (03Х17Н14М3)

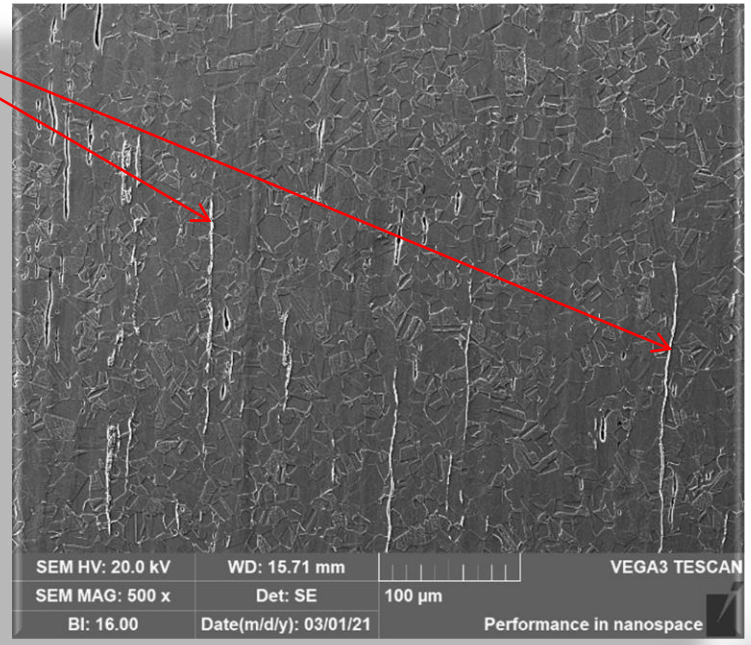


№	Угол	Межплоскостное расстояние, А	Фаза
1	43,559	2,076	Feγ
2	44,567	2,031	Feα
3	50,620	1,802	Feγ
4	74,520	1,272	Feγ

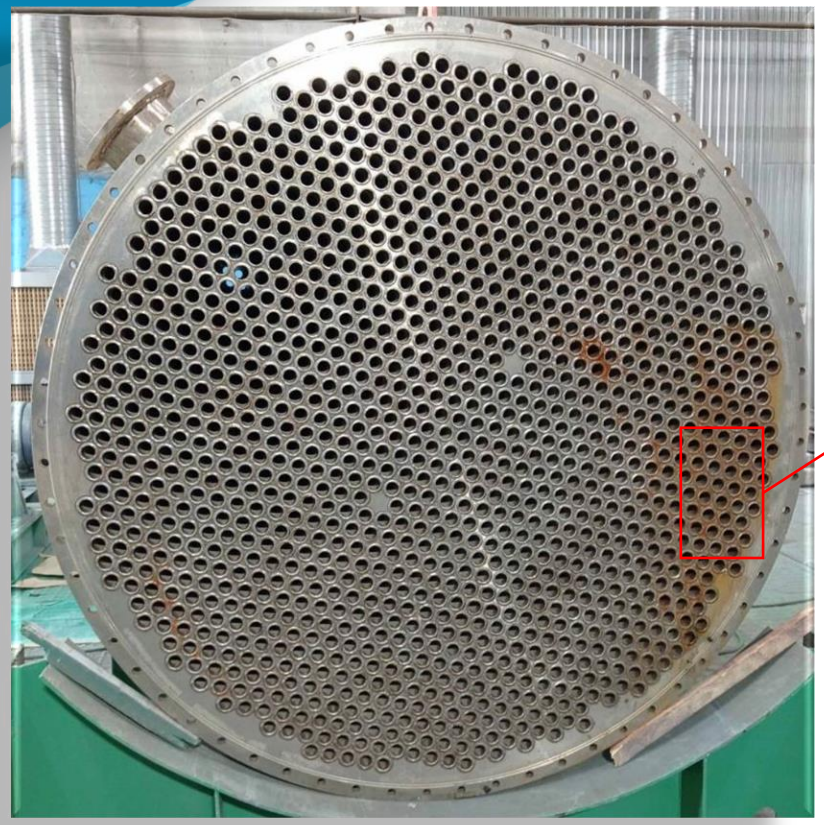
Наличие α – фазы в металле ***не является нарушением условий поставки,*** но на практике не допустимо.



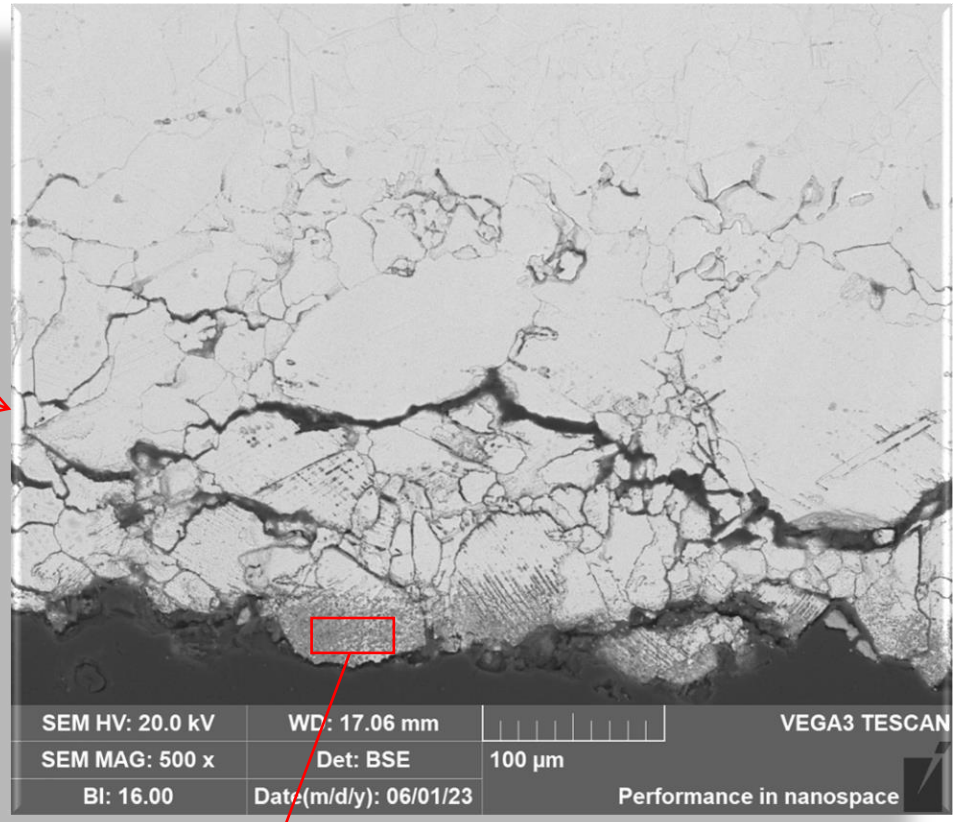
αFe



Трубный пучок теплообменного аппарата (12Х18Н10Т)





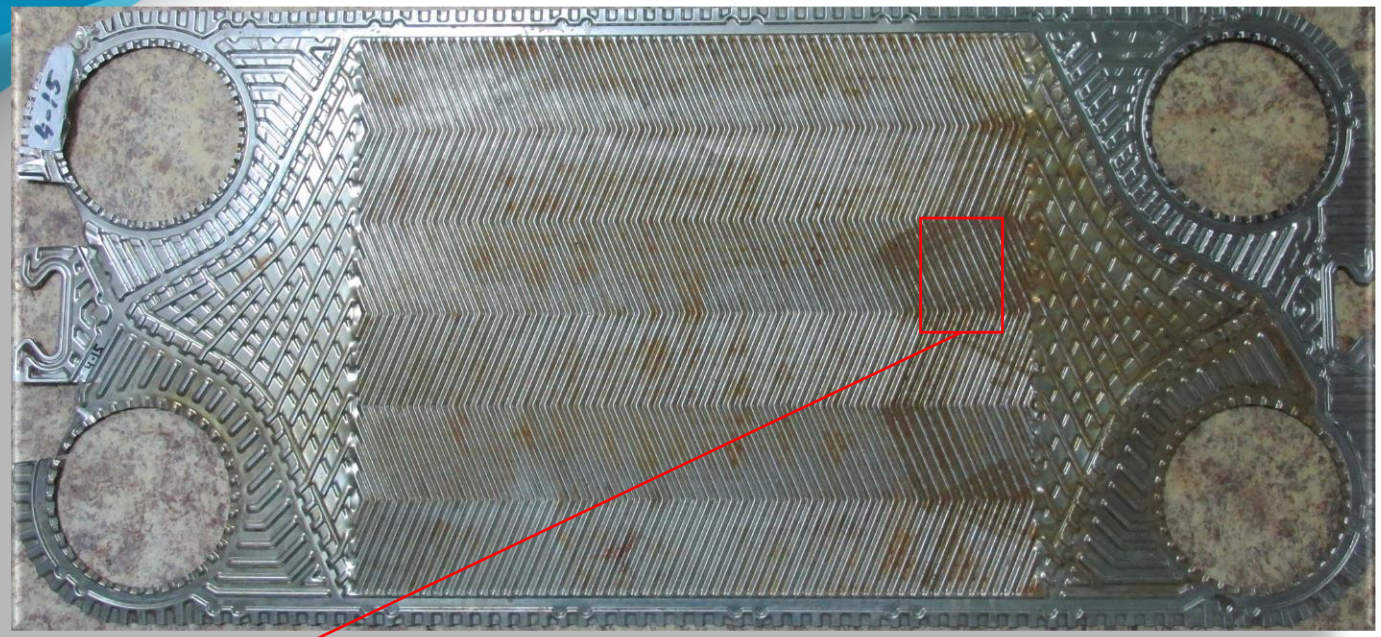


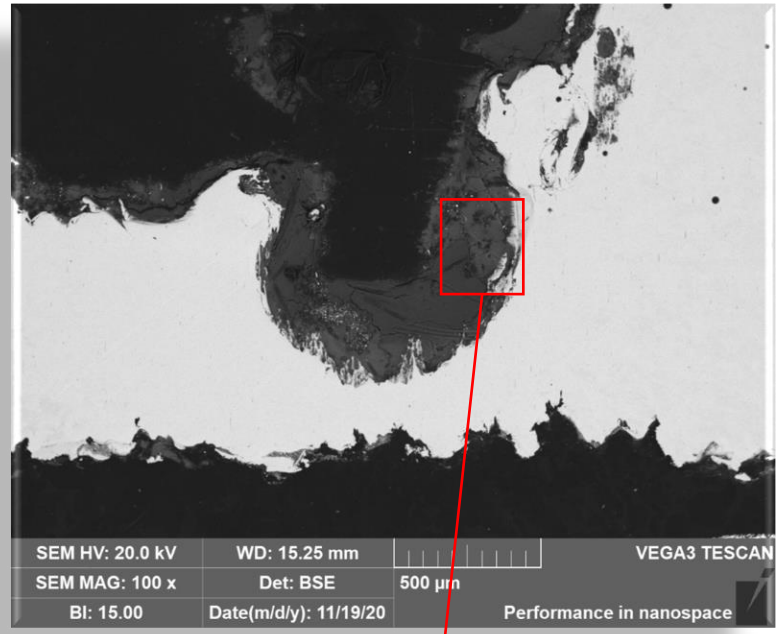
Причина разрушения: взаимодействие внутренней поверхности трубок с рабочей средой, содержащей высокую концентрацию хлора

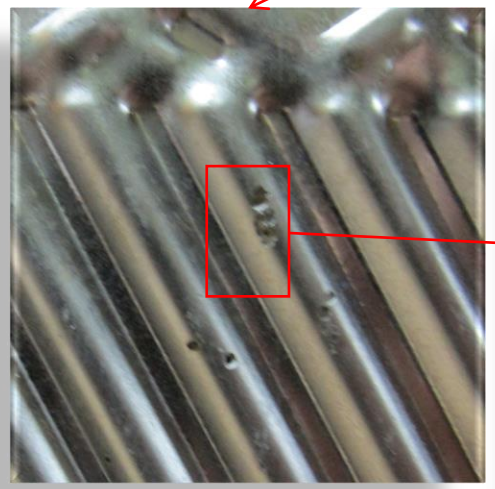
Химический состав, масс. %

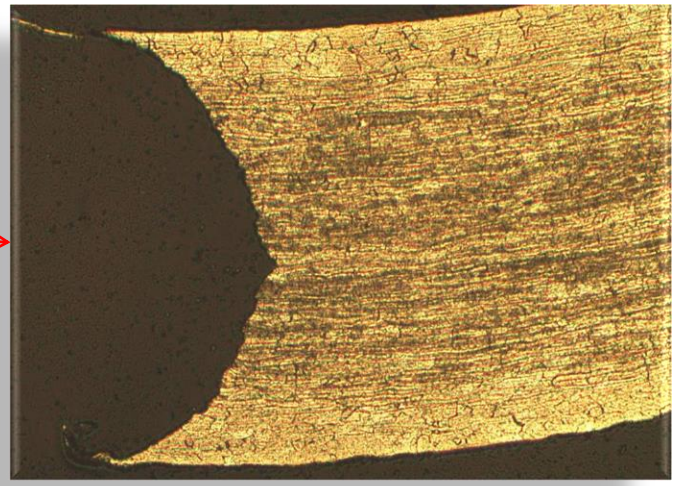
Элемент	C	O	Cl	Cr	Fe	S	Ni	Si
1	18,0	24,93	2,38	14,60	36,78	0,56	2,50	0,25

Пластины теплообменника сталь 304 по ASTM (08Х18Н10)









Химический состав, масс. %

Элемент	C	O	Cl	Cr	Fe	Ni	Si
1	24,05	32,17	2,14	13,81	36,78	4,70	0,14

Причина разрушения: коррозионное разрушение под действием хлора

Механизм разрушения

Питтинговая (точечная) коррозия – электрохимический процесс, старт образованию питтинга дает повреждение защитной оксидной пленки (пассивного слоя) на поверхности стали.



Условия возникновения:

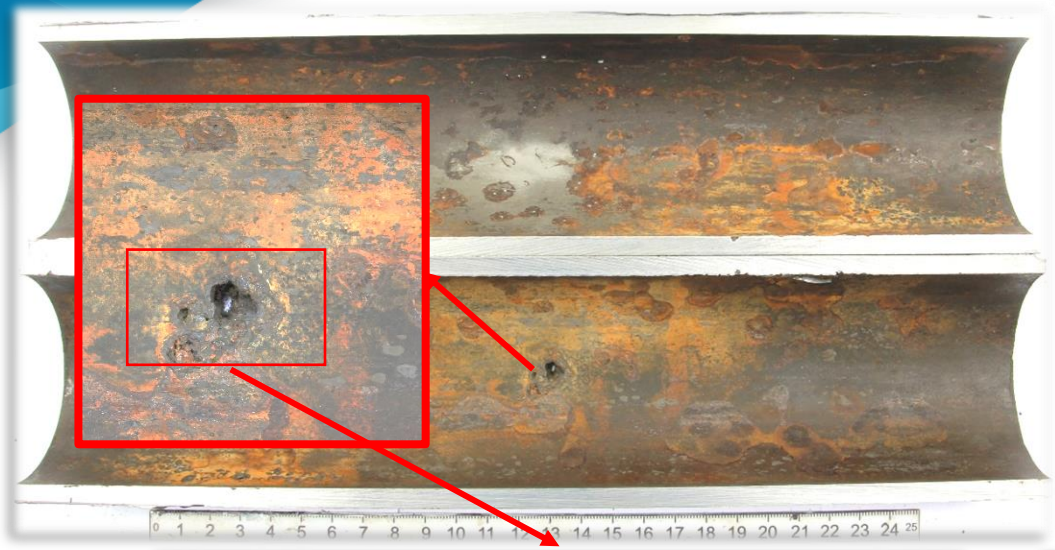
- Пассивирующая среда (наличие защитной пленки);
- Наличие в растворе аниона-активатора, выше критической концентрации;
- Наличие в растворе окислителя;
- Электрический контакт с другими металлами, наличие осадкой, загрязнения металла, замкнутое пространство.

Скорость зарождения зависит от температуры, концентрации ионов хлора.

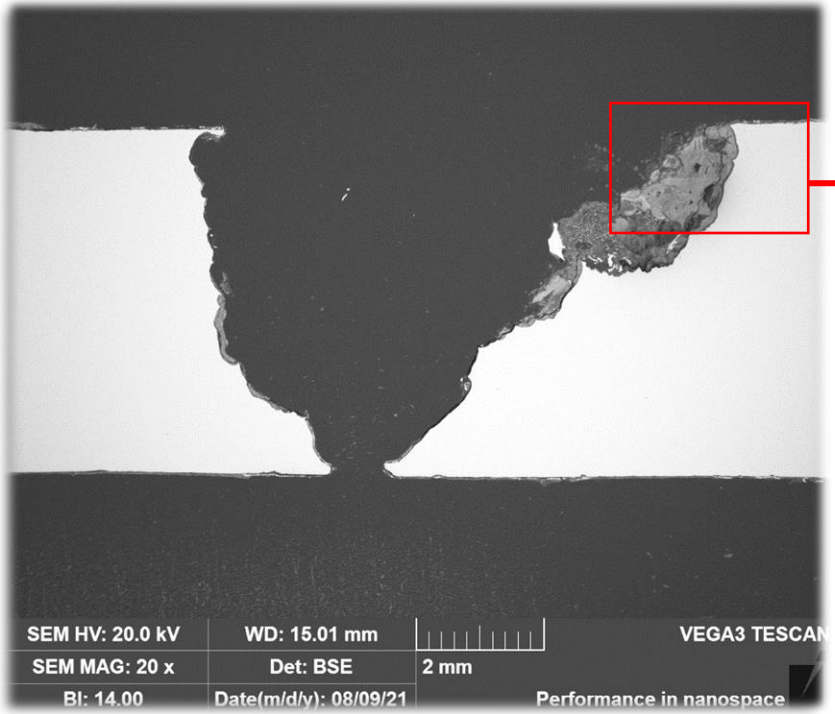
Стойкость к ПК зависит от содержания (Cr, Mo, N) ЭСП/PREN

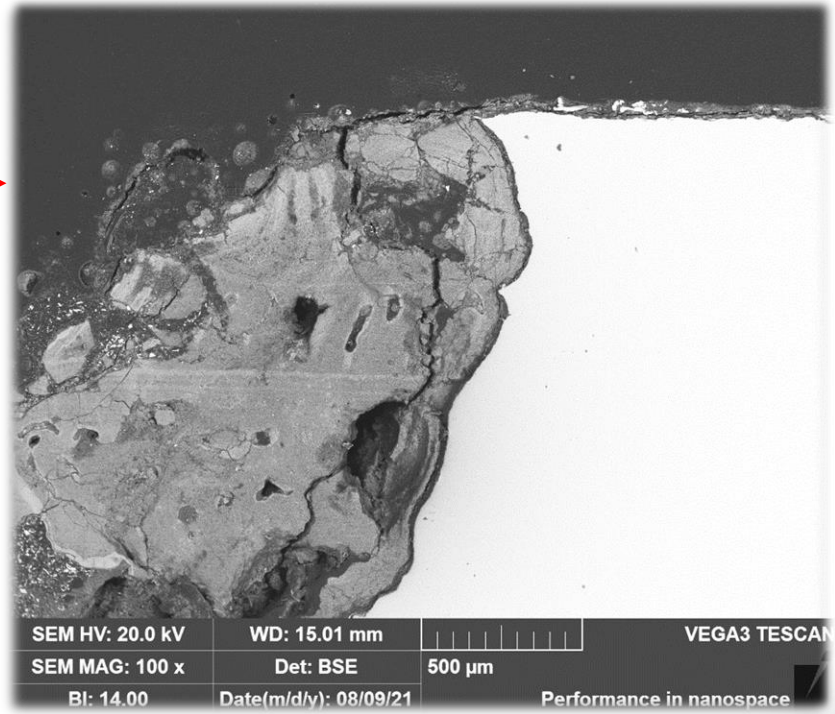
Разрушение мартенситных сталей

«L-80 тип 13Cr» с резьбовым соединением ТМК UP PF Наработка на отказ – 362 суток



Сквозное повреждение НКТ произошло в результате нарушения целостности пассивирующей пленки железа, вследствие электрохимического воздействия из-за ***нарушения изоляции кабельной линии***. После нарушения целостности пассивирующей пленки разрушение трубы протекало по механизму карбонатной коррозии.





Озек-Суатского месторождения, ООО «РН-Ставропольнефтегаз»

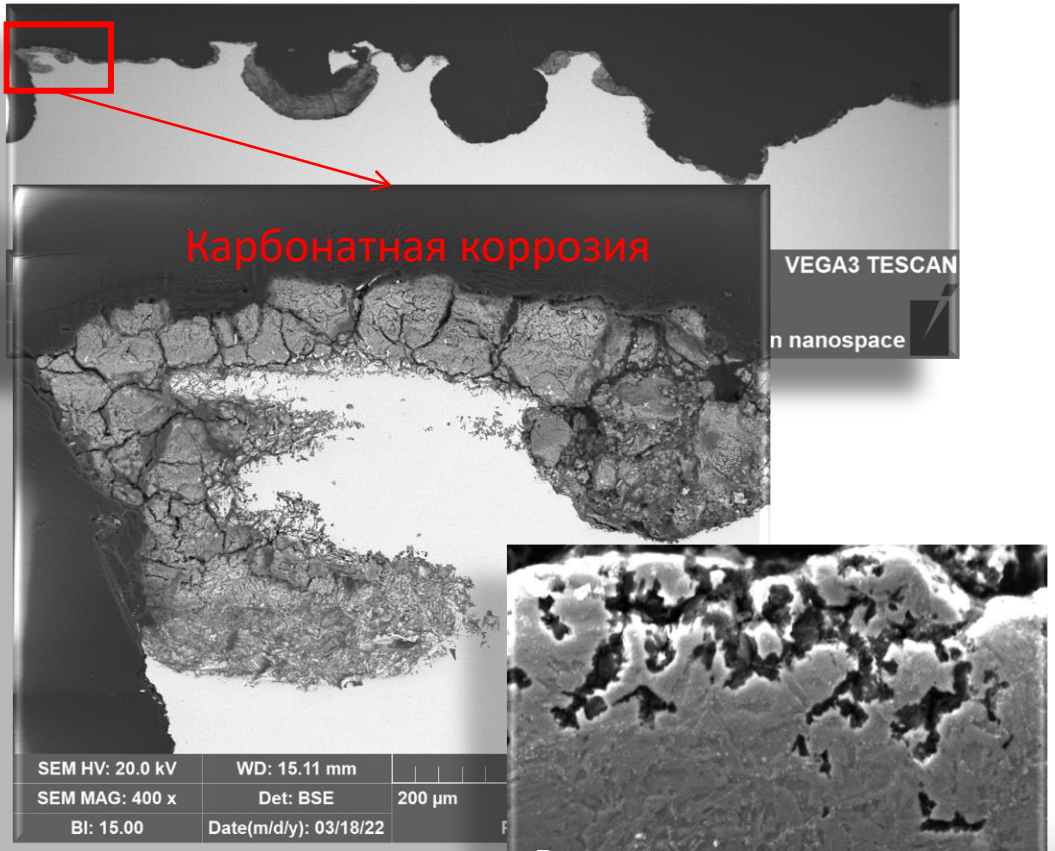
НКТ TMK UP PF 114,3х8,56 мм 13Cr, P110
куст №19G, Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ)
Наработка на НКТ составляет 178 суток.



Наружная поверхность

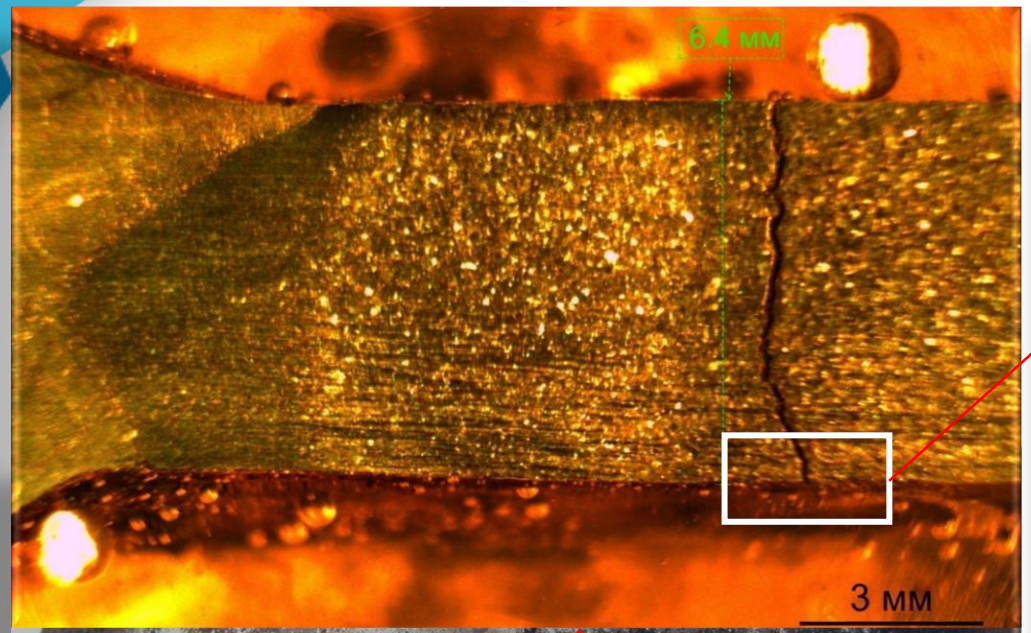
Коррозионные повреждения

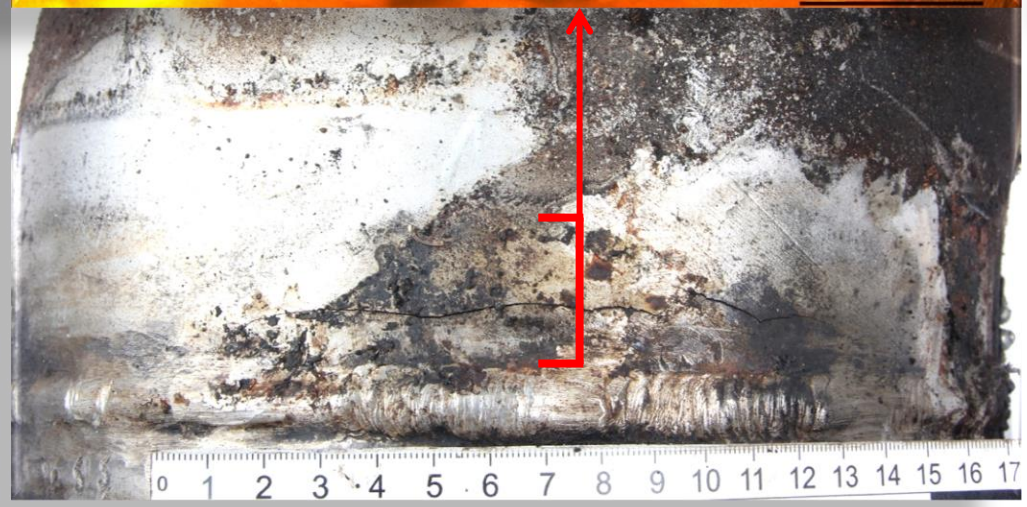
Внутренняя поверхность

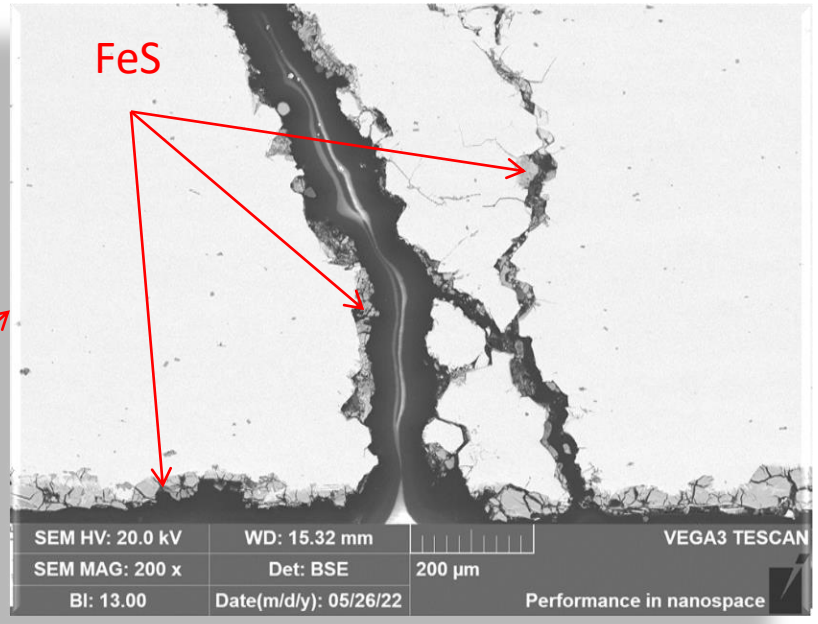


Коррозионное повреждение НКТ произошло в связи с разрушением пассивирующей хромистой пленки в результате ***механического воздействий*** и агрессивной транспортируемой среды, содержащей ионы хлора.

Отвод Ø273х6 мм (12Х18Н10Т) после эксплуатации на технологическом трубопроводе МНС им. А.Алабушина, ТПП «Лукойл- Усинскнефтегаз» ООО «Лукойл-Коми»



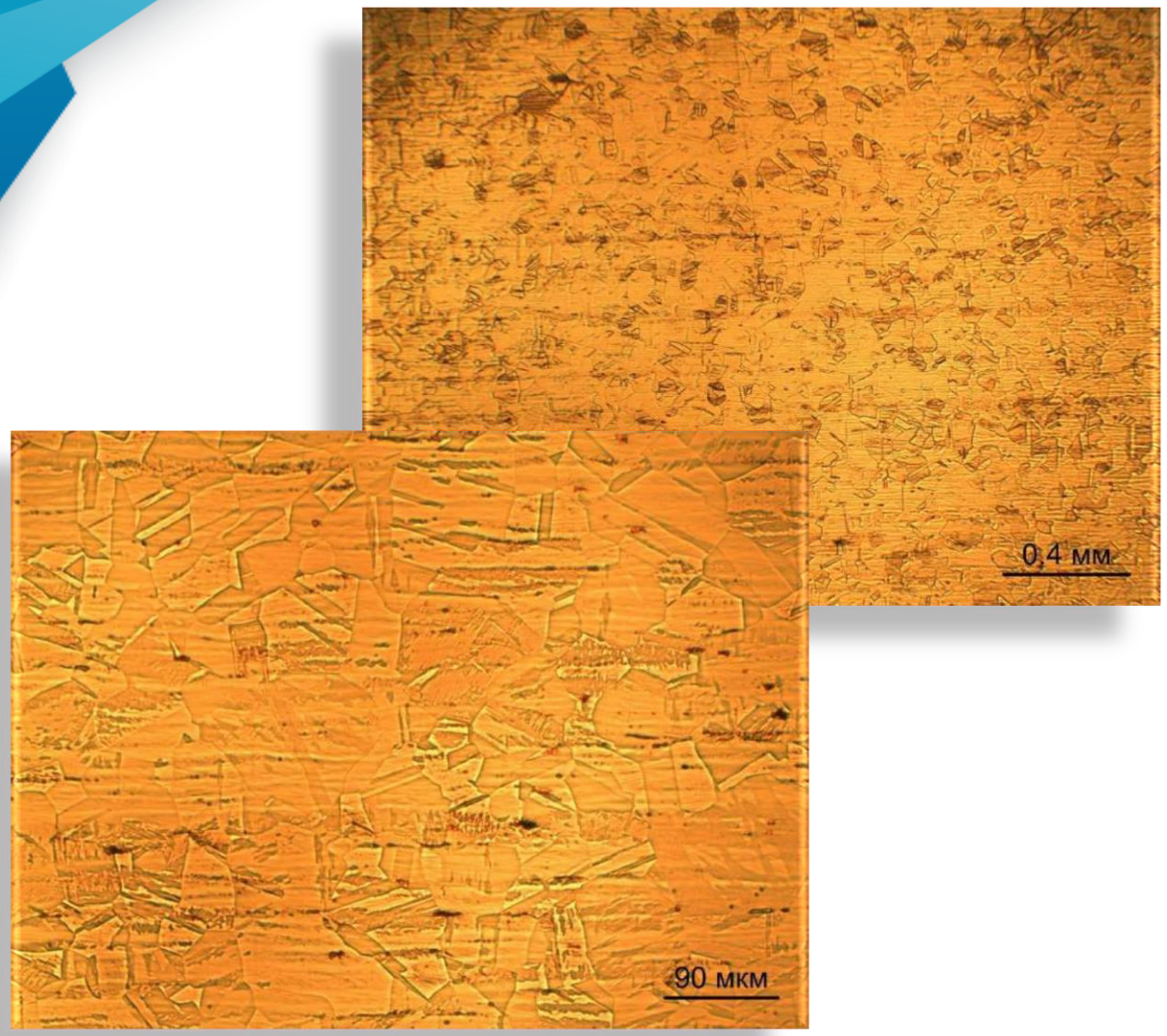




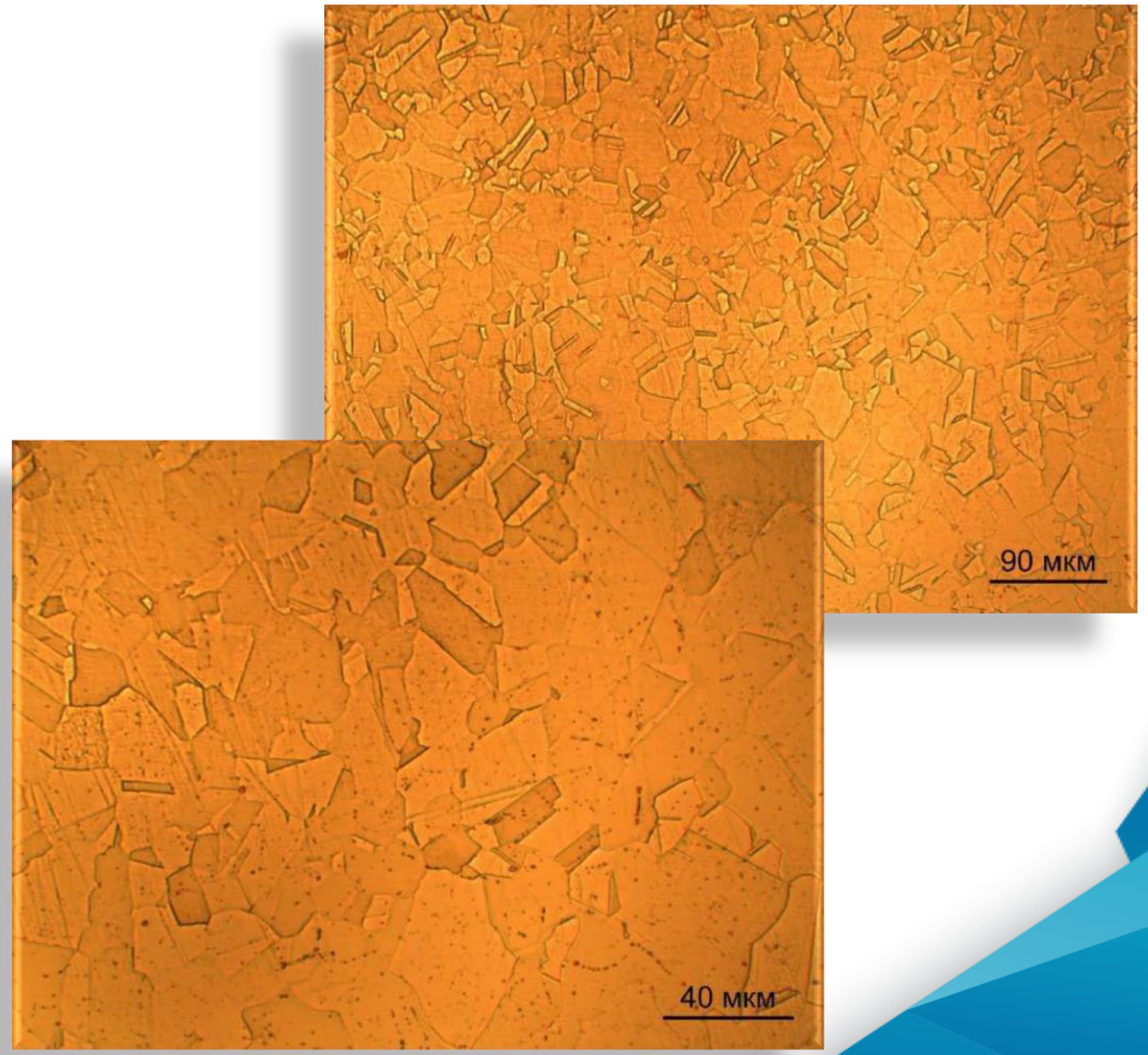
Разрушение (образование трещин) отвода произошло в результате совместного воздействия транспортируемой среды, содержащей коррозионно-агрессивные компоненты (сероводород) и действующих в околошовной зоне сварного стыкового шва отвода напряжений по механизму ***сульфидного-коррозионного растрескивания под напряжением (СКРН).***

Отвод Ø273х6 мм (12Х18Н10Т) после эксплуатации на технологическом трубопроводе МНС им. А.Алабушина, ТПП «Лукойл- Усинскнефтегаз» ООО «Лукойл-Коми»

Исходная структура



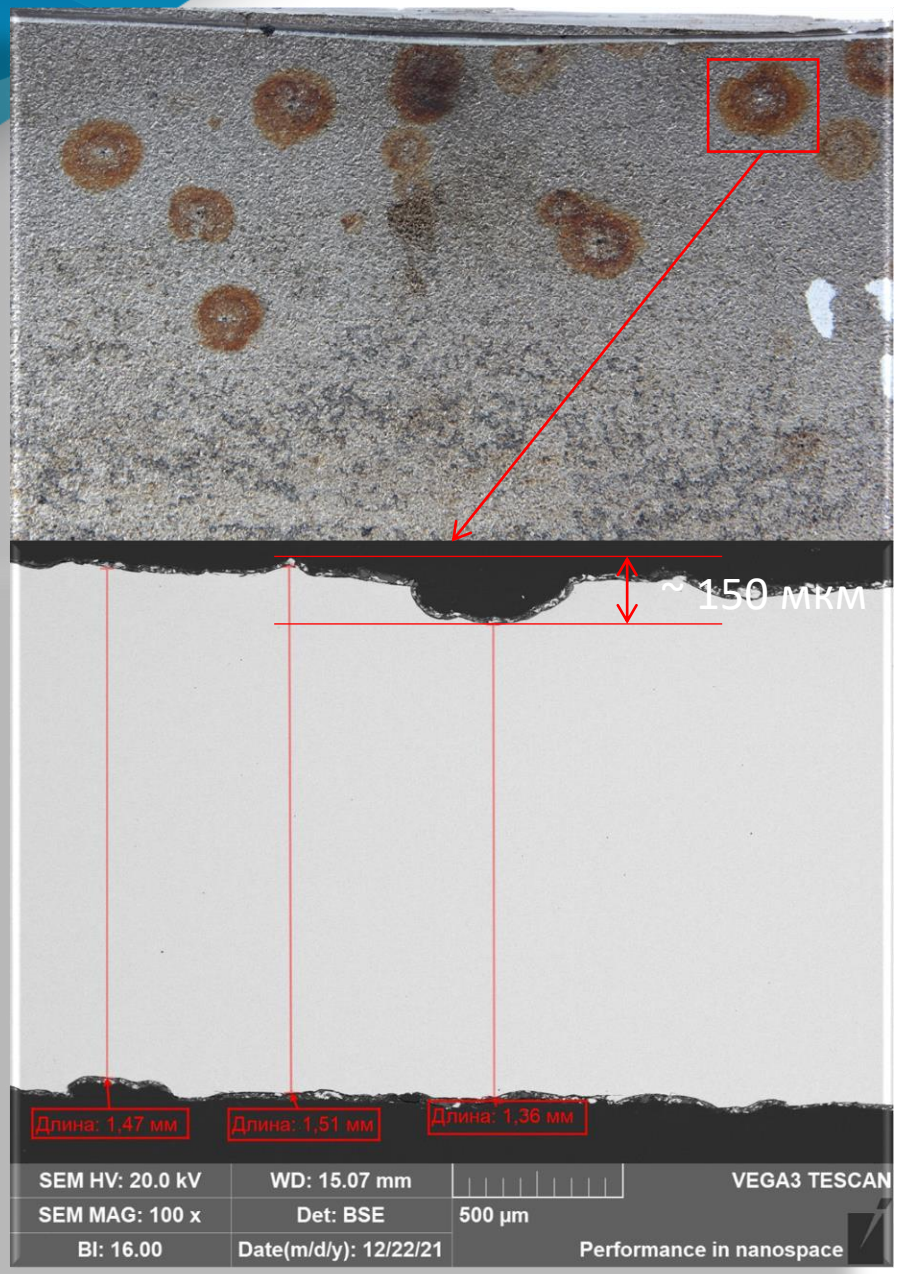
Структура после ТО

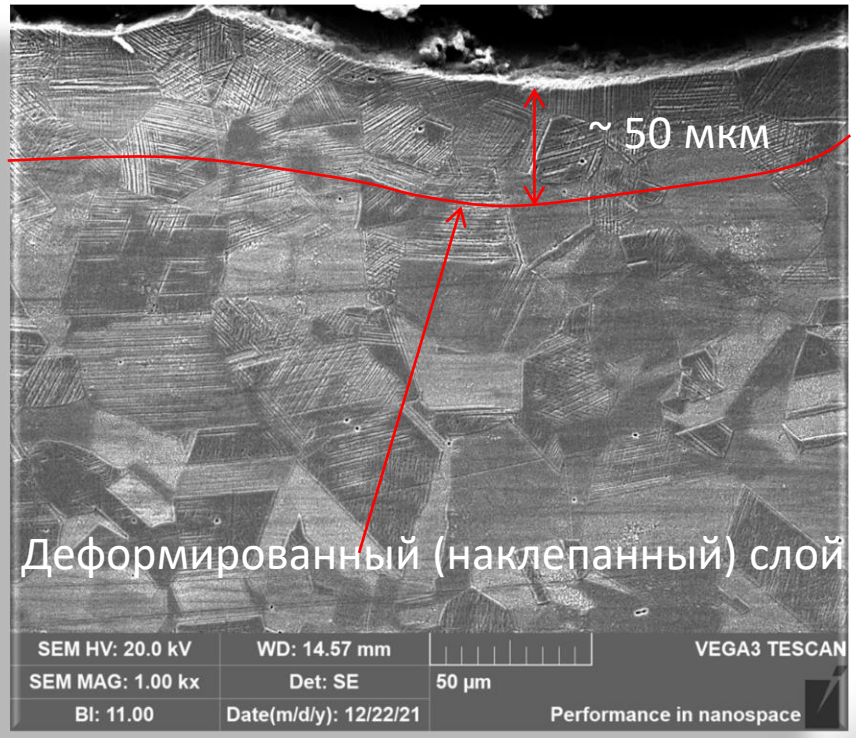


Причина возникновения разрушений: нарушение технологии изготовления СДТ

Втулка, после эксплуатации, в составе трубопровода т.п.40-т.вр.39, ТПП «Когалымнефтегаз, ООО «Лукойл-Западная Сибирь». Наработка ~ 1 год.

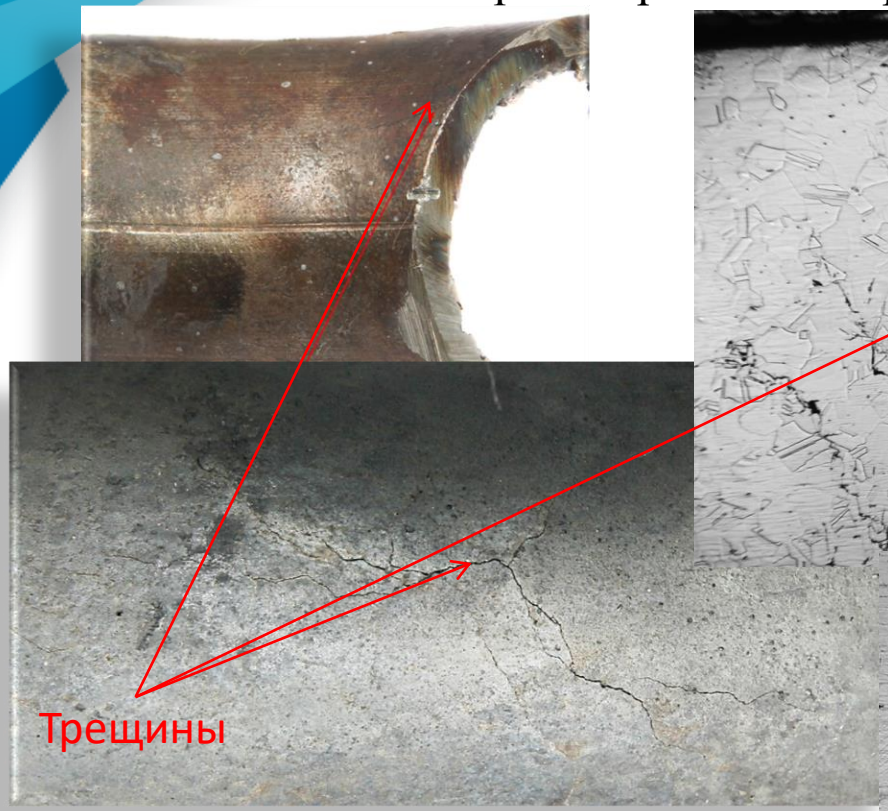
Наблюдается зарождение единичных коррозионных процессов с дальнейшим развитием вглубь металла втулки, что обусловлено наличием ***наклепанного слоя металла,*** образованного в результате проведения механической обработки поверхности втулки

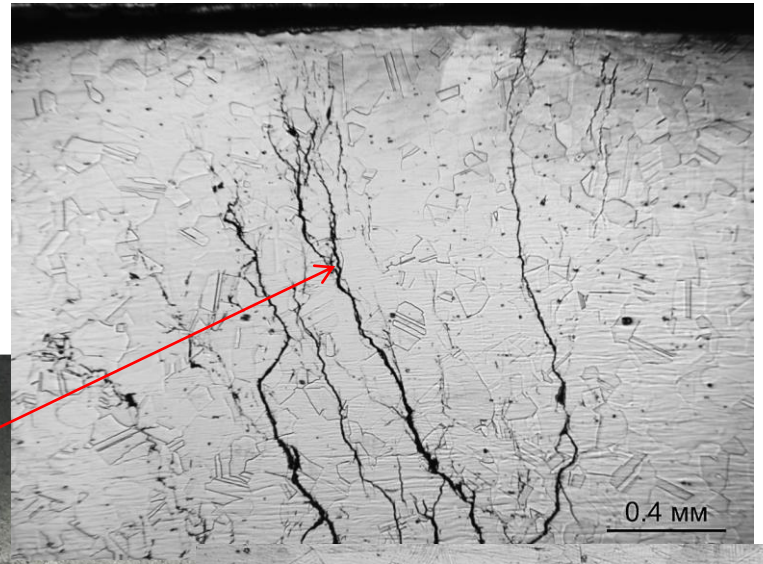




Разрушение аустенитных сталей

Отвод Ø32х3 трубопровода транспортировки водородсодержащего газа (установка изомеризации)
Ориентировочная наработка – 5 лет



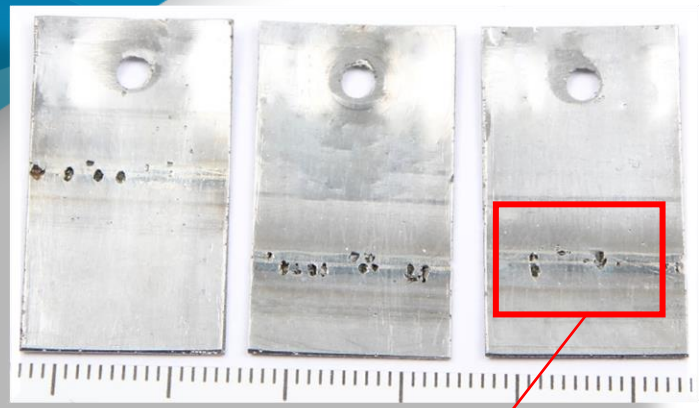




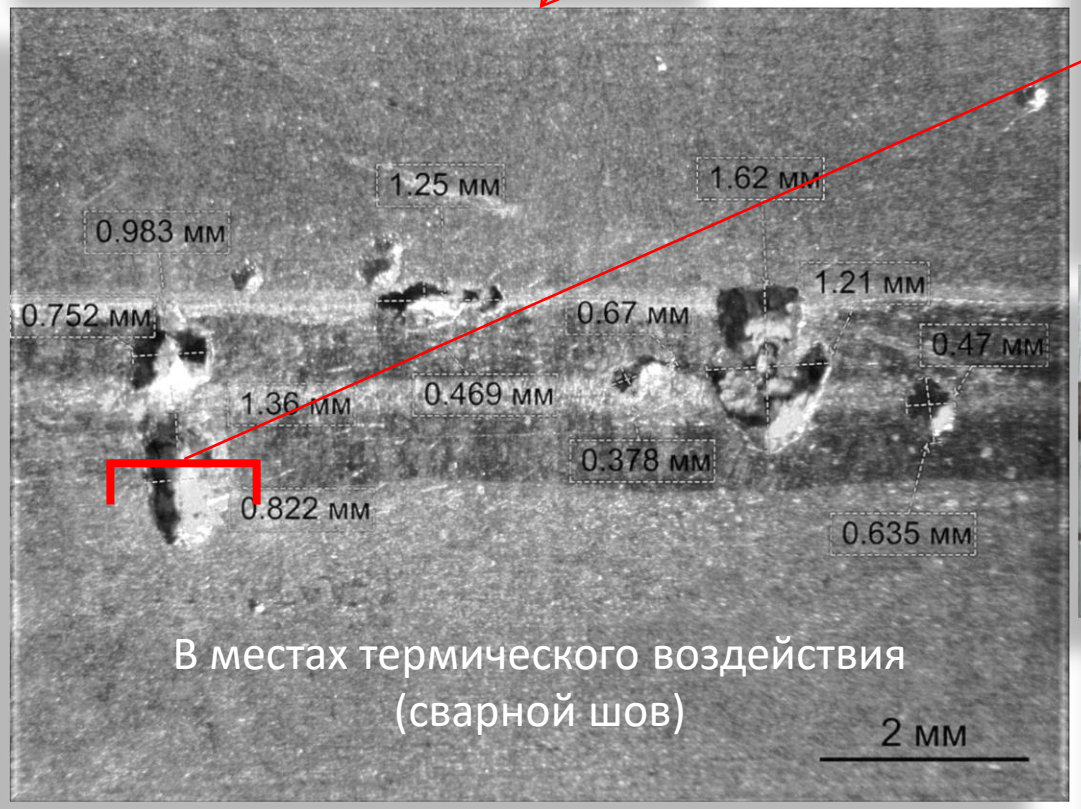
Образование трещин является следствием совокупного воздействия коррозионной сероводородсодержащей среды и ***структурной неоднородности металла***, вызванной нарушением технологии изготовления

В теле аустенитных зерен наблюдаются множественные двойники деформации. ***Двойники деформации*** - дефекты структуры, наличие которых обусловлено снижением температуры деформации. При двойниковании кристаллит делится скачкообразно плоскостью двойникования на две части, и кристаллическая решетка в одной его части становится зеркальным отображением решетки в другой части. Наличие двойников деформации способствует образованию неоднородной структуры и снижению технологической пластичности, что является причиной растрескивания стали. Кроме того, известно, что сталь, в которой активно развивается двойникование, является более склонной к наводораживанию.

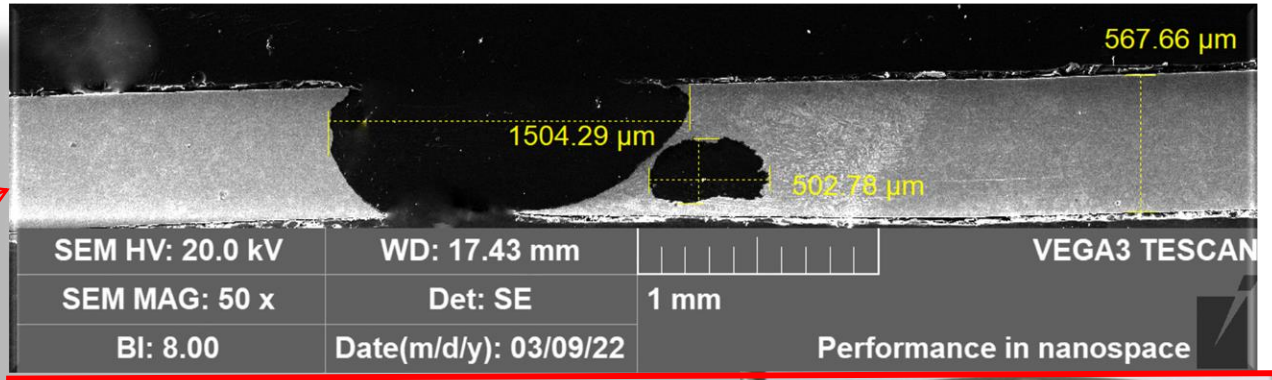
Наглядный пример коррозии аустенитных сталей с разным фазовым составом



	Массовая доля элементов, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
Сталь марки 316L по ASTM A240									
≥	-	-	-	-	-	16,0	10,0	2,0	-
≤	0,030	0,75	2,0	0,045	0,030	18,0	14,0	3,0	-
Образец	0,016	0,47	1,7	0,002	0,028	19,1	8,3	0,1	0,1



В местах термического воздействия (сварной шов)











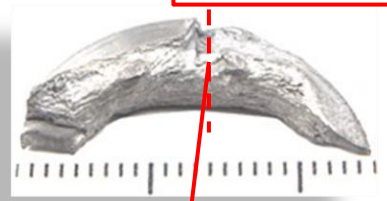
В местах пластической деформации (места изгиба)

Разрушение титанового сплава

Образцы разрушенного корпуса расходомера из сплава Ti-6Al-4V после эксплуатации в составе водородопровода.
Наработка порядка 3 месяцев

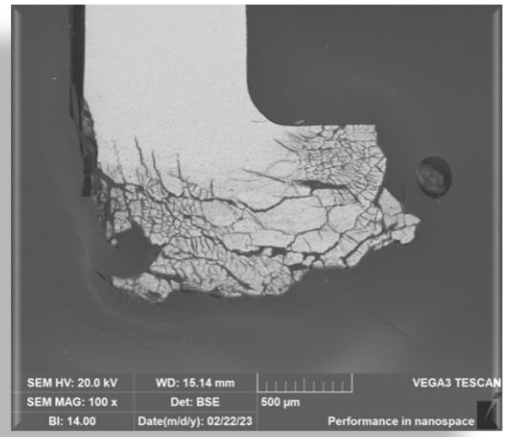


Плоскость шлифа для металлографических исследований

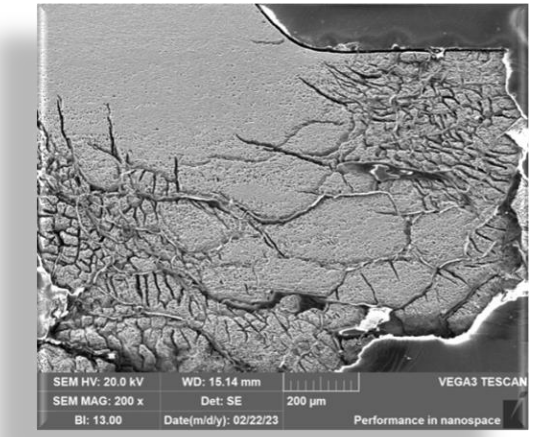


Плоскость шлифа для металлографических исследований

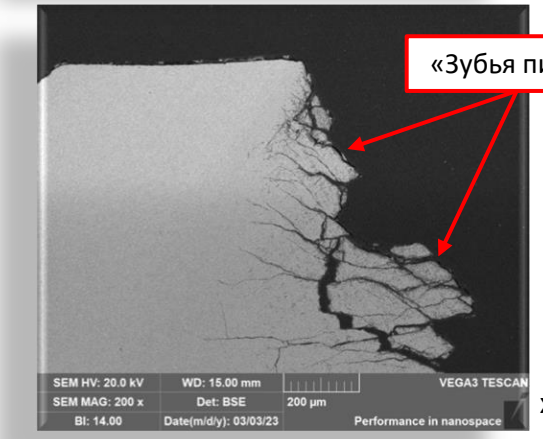
Металлографические исследования профиля излома



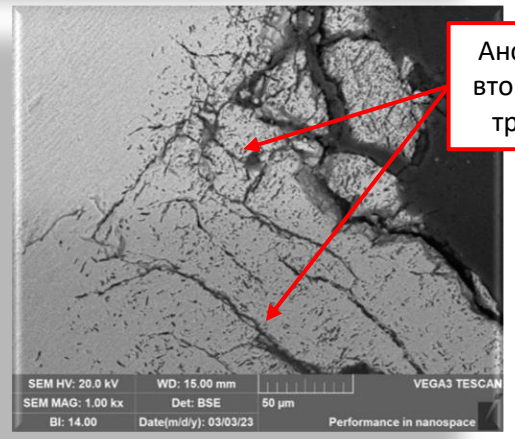
x100



x200



x200



x1000

В строении излома присутствуют так называемые «зубья пилы», возникающие при водородном охрупчивании титанового сплава. Отчетливо наблюдается ансамбль вторичных трещин и взаимодействие их с магистральной трещиной

Шкала оценки коррозионной стойкости металлов (ГОСТ 5272-50)

Группа стойкости	Скорость коррозии металла, $K_г$ мм/год	Балл
Совершенно стойкие	Менее 0,001	1
Весьма стойкие	0,001 до 0,005	2
	0,005 до 0,01	3
Стойкие	0,01 до 0,05	4
	0,05 до 0,1	5
Пониженно стойкие	0,1 до 0,5	6
	0,5 до 1,0	7
Малостойкие	1,0 до 5,0	8
	5,0 до 10,0	9
Нестойкие	Более 10,0	10

Краткие выводы:

13 Cr (стали мартенситного класса)

Необходимо избегать любых воздействий (кислотные обработки, механический износ), способных повредить пассивирующий слой, поскольку перепассивация в процессе добычи не происходит.

Стали аустенитного класса:

1. Необходим контроль ТО, структуры, наличия α-фазы на всех стадиях производства, особенно при проведение сварочных работ и любых видов деформации.
2. Аустенитные стали требовательны к технологии сварки, которая не должна ограничиваться контролем механических свойств.
3. Проводить подбор материалов под условия нефтепромыслов (температура, содержание ионов Cl^-, наличие H_2S, наличие O_2, кислотные обработки и т.д.).

Титановые славы:

Не стойкие для трубопроводов, транспортирующих водород.

ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР
«САМАРА»

Спасибо за внимание!

Контакты: petrov@npcsamara.ru,тел. +7(906)344-32-25



ES System
Биметаллическая НКТ с упрочненными муфтами

inteco

Основные причины аварийности НКТ

Насосно-компрессорные трубы могут выходить из строя по различным причинам: сквозная коррозия НКТ; трещина в теле НКТ; износ НКТ истиранием; износ и утечки по резьбе. В условиях осложненной добычи средняя наработка на отказ НКТ оказывается в несколько раз ниже нормативного срока службы труб.

Коррозия тела и муфт НКТ



Коррозия резьбы трубы НКТ и муфты

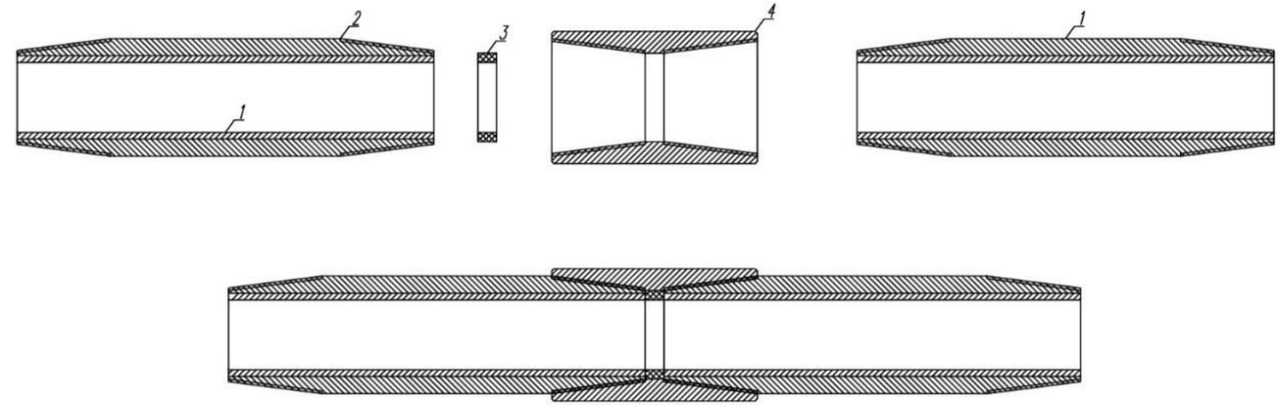


Механические повреждения резьбы труб и муфты



ES System - Система защиты НКТ и муфт





ES System – система разработанная для многократного увеличения срока службы труб НКТ и включает в себя:

- Установку нержавеющего лайнера в тело НКТ;
- Нанесение антикоррозионного покрытия и сухой смазки на резьбу НКТ;
- Нанесение антикоррозионного покрытия на резьбу муфты НКТ и ее упрочнение;
- Уплотнитель из фторполимеров;

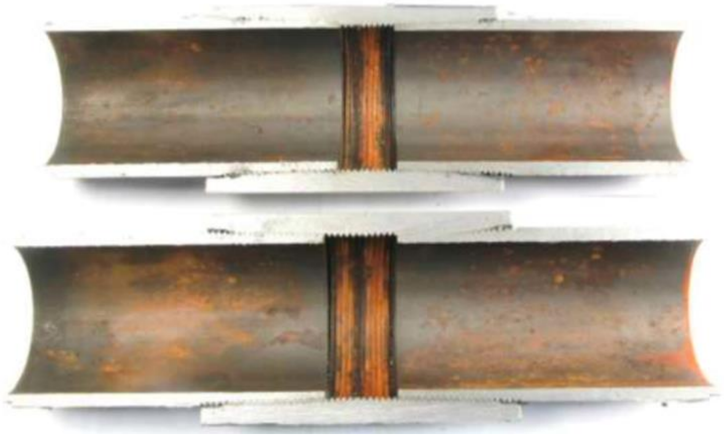
Основные характеристики ES-System: БНКТ и муфт с упрочненной резьбой



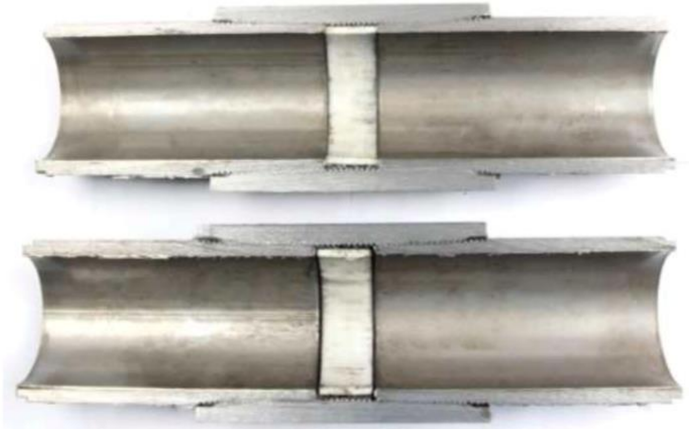
- Сортамент БНКТ: Ø60-114 мм любой группы прочности, в том числе с премиальными резьбами;
- Футеровка НКТ из углеродистой стали тонкостенной (0,8-1,5 мм) трубой из нержавеющей стали 304 или 316 серии;
- Комбинированное металлизированное покрытие на поверхности резьбы НКТ повышает их антикоррозионную стойкость, но главным образом служит антифрикционным покрытием;
- Недорогая одноразовая прокладка из фторполимера специальной формы надежно предотвращает абразивный износ центральной части внутренней поверхности муфты;
- Упрочнение и специальная антикоррозионная обработка внутренней поверхности муфт;

Коррозионные Испытания системы ES Systems

Сравнительные коррозионные испытания на циркуляционном стенде в среде: водный раствор 5 % NaCl, насыщенный CO2, газовая фаза CO2 0,5 МПа, при температуре 70 °C, длительность 1000 часов, общее давление 0,5 МПа.



На внутренней поверхности сборки НКТ без внутренней защиты, имеются множество локальных язвенных коррозионных повреждений. Максимальная глубина язв, в исследуемых сечениях, составляет 316 мкм (0,32 мм) по впадине профиля резьбы муфты (межниппельное пространство) и 120 мкм (0,12 мм) на внутренней поверхности НКТ. Язвы частично заполнены продуктами коррозии.



На внутренней поверхности сборки НКТ с лейнером, свинченные через обработанную муфту в области межниппельного пространства (резьба муфты), а также внутренней поверхности свинченных НКТ с лейнером, после испытаний на циркуляционном стенде при заданных параметрах, коррозионные повреждения отсутствуют.

Ресурсные Испытания системы ES Systems

Ресурсные испытания проводились на муфтонаверточном станке по РД 39-136-95.



Внешний вид ниппеля до испытаний



Внешний вид ниппеля после испытаний



Внешний вид резьбы муфты до испытаний



Внешний вид резьбы муфты после испытаний

Проведено 70 циклов свинчивания/развинчивания муфты и ниппеля до потери герметичности. Повреждений резьбы муфты при этом не выявлено.

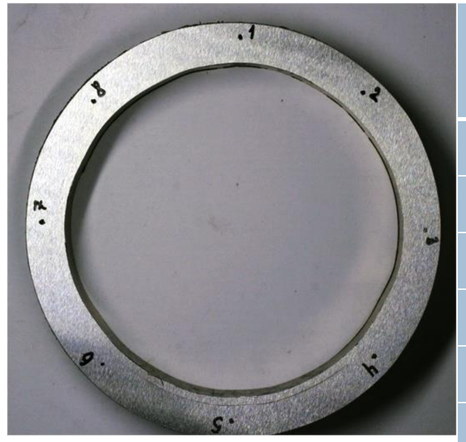
Испытания на сдвиг системы ES Systems

Испытания на сдвиг лайнера проводились на прессе с контролем усилия.



Неочищенная труба

Точка замера	Зазор, мкм
1	250
2	50
3	100
4	50
5	250
6	100
7	50
8	150



Очищенная труба

Точка замера	Зазор, мкм
1	6
2	12
3	9
4	25
5	10
6	4
7	6
8	6



Средние значения на неочищенной трубе 2240 кг.с на метр трубы или более 22 тонн на трубу.
Средние значения на очищенной трубе 3020 кг.с на метр трубы или более 30 тонн на трубу.

Преимущества ES System



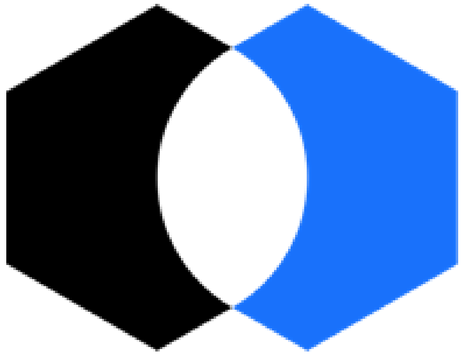
- Лайнеры из нержавеющей стали позволяют повысить антикоррозионную стойкость внутренней поверхности БНКТ при экстремальных механических нагрузках и высоких температурах переменного характера в сильноагрессивных средах, что на порядки продляет ресурс НКТ;

- Абразивная стойкость лейнеров ES System выше **в 5 раз**, шероховатость поверхности препятствует образованию на внутренней поверхности различных отложений (АСПО);

- Термостойкость нержавеющих лейнеров составляет **270°С**, что значительно превышает термостойкость любого ЛКМ;

- За счет металлизированного покрытия эксплуатационный ресурс резьбы увеличивается минимум **в 3 раза**;

- Сокращение объемов закупок черных насосно-компрессорных труб для осложненного фонда **в 5 раз**;



INTECO

Общество с ограниченной ответственностью «ИНТЕКО»

443052, г.Самара, ул.Земеца, 4

телефон/факс: (846) 212-97-57

e-mail: info@cps63.ru

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Моделирование язвенной коррозии в условиях лаборатории

Ведущий инженер сектора CO_2-коррозии ООО «ИТ-Сервис»
Казадаев Дмитрий Сергеевич

Общие сведения

Стойкость низколегированных марок стали к углекислотной коррозии определяется составом и структурой продуктов коррозии, образующихся на их поверхности.

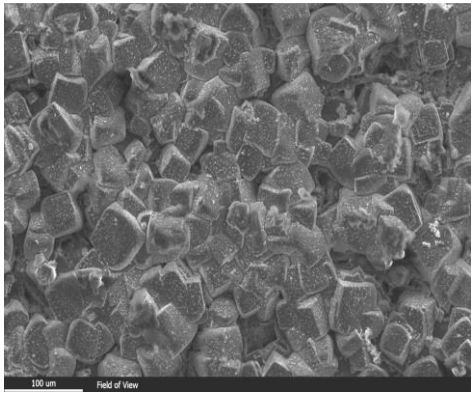
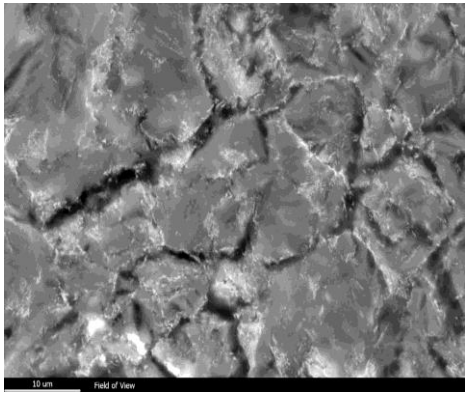
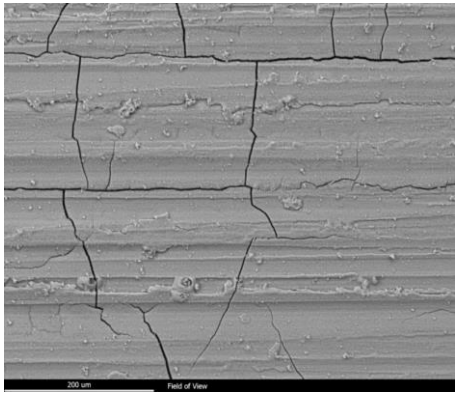
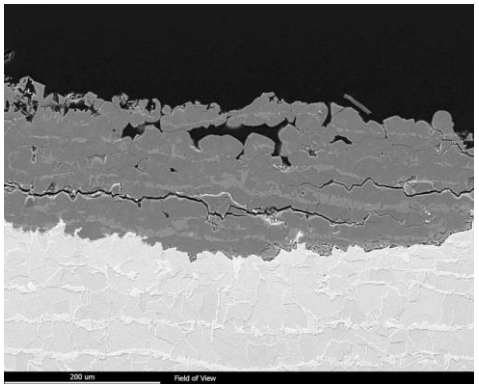
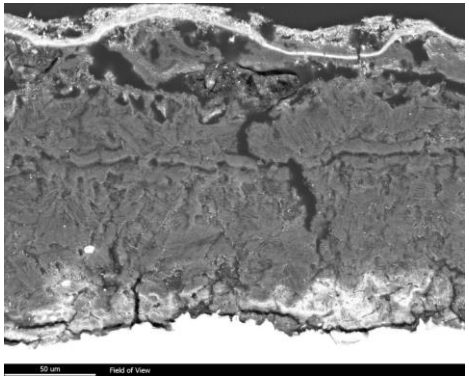
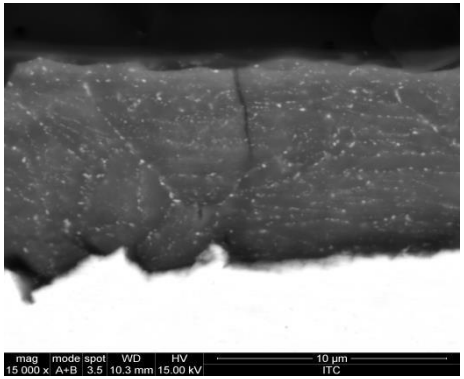
В настоящее время существуют методики лабораторных коррозионных испытаний, сравнивающие между собой только общие скорости коррозии:

- ГОСТ Р 9.905-2007 «Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Методы коррозионных испытаний»;
- методика «Оценка скорости общей коррозии в модельной co_2-содержащей среде» ООО «ИТ-Сервис»;
- методика 01.02.04 01 ПАО «Газпром Нефть»;
- методика №966814 006 59337752 2014 ЗАО «НИПЦ « НефтеГазСервис » и другие.

Недостатки Данные методики не учитывают структуру и свойства продуктов коррозии и описывают скорость коррозии как равномерный (общий) процесс растворения металла

Равномерная углекислотная коррозия

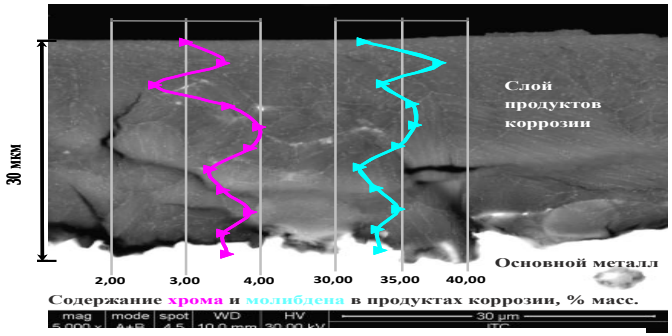
Примеры образованных продуктов коррозии для сталей

	Без хрома	Хрома 1-3 %	Хрома более 5%
Вид сверху			
Вид в сечении			

Методы изучения продуктов углекислотной коррозии

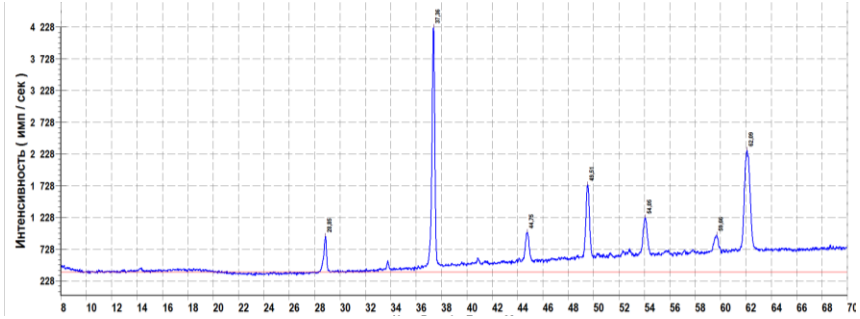
Испытания на равномерную коррозию можно использовать в качестве инструмента для изучения механизма коррозионного разрушения сталей

1. Энергодисперсионный анализ

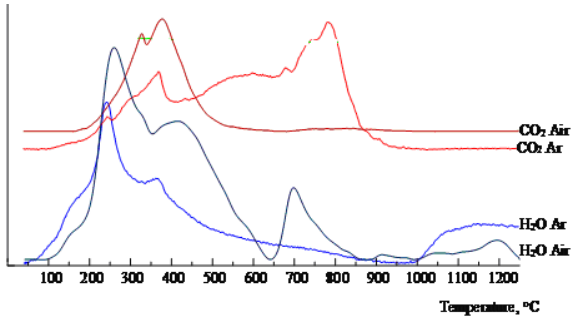


Содержание молибдена и хрома в продуктах коррозии, % масс.

2. Дифракционный анализ



3. Синхронный термический анализ (TG-DTA-MS)



4. Химический анализ

Сталь	pH, ед	$C(CO_2)$, мг/л	$C(Fe^{2+})$, мг/л
09Г2С	6,04	698	450
15Х5М	5,31	458	113

Язвенная углекислотная коррозия

Вид коррозионных поражений на образцах после промысловых испытаний



Вид внутренней поверхности образца трубы из стали из стали 08ХМФА после 2-х лет эксплуатации в байпасе

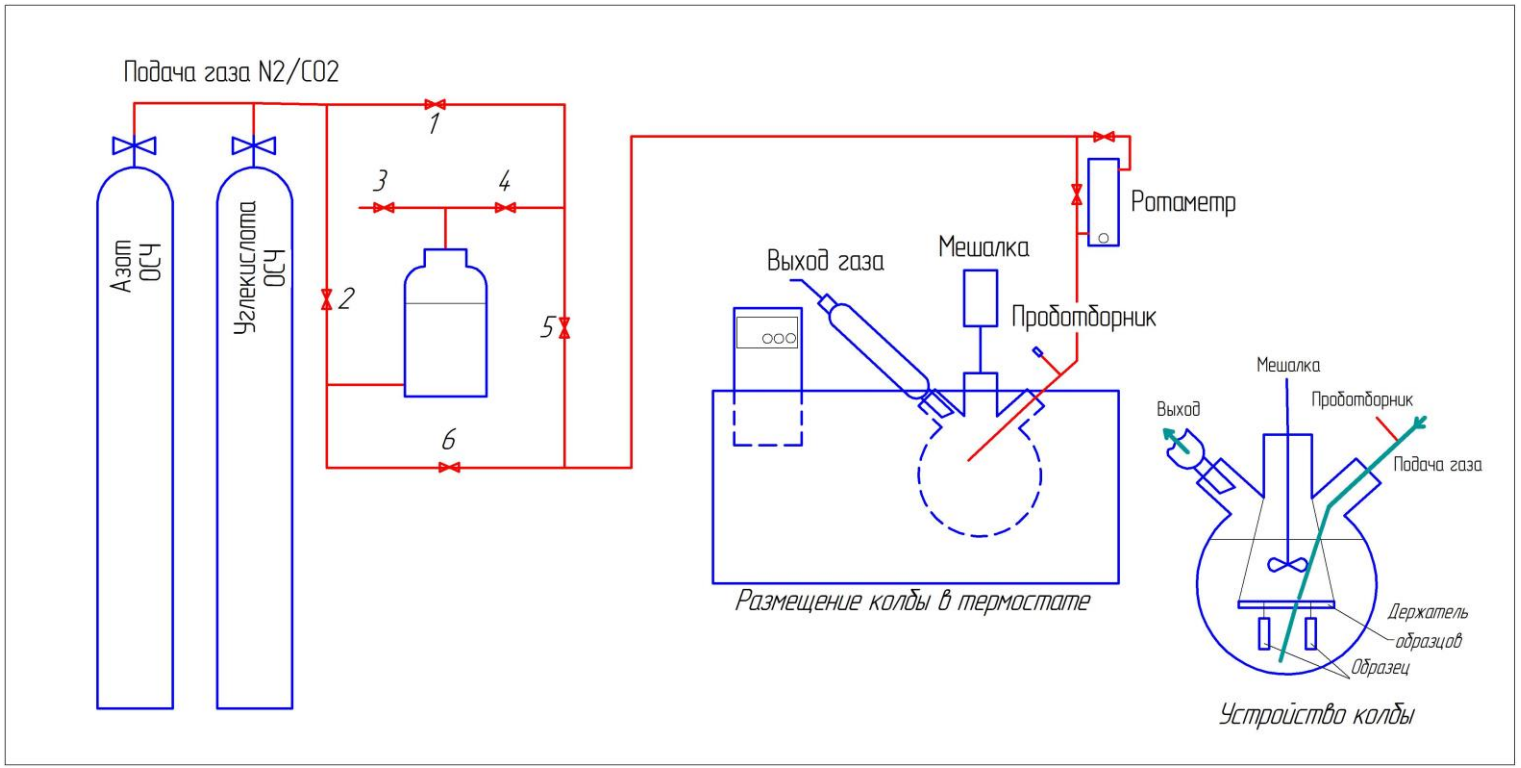




Язвенная коррозия внутренней поверхности патрубка из стали марки 09Г2С после 2-х лет эксплуатации в байпасе

Язвенная углекислотная коррозия

Лабораторное моделирование язвенной коррозии

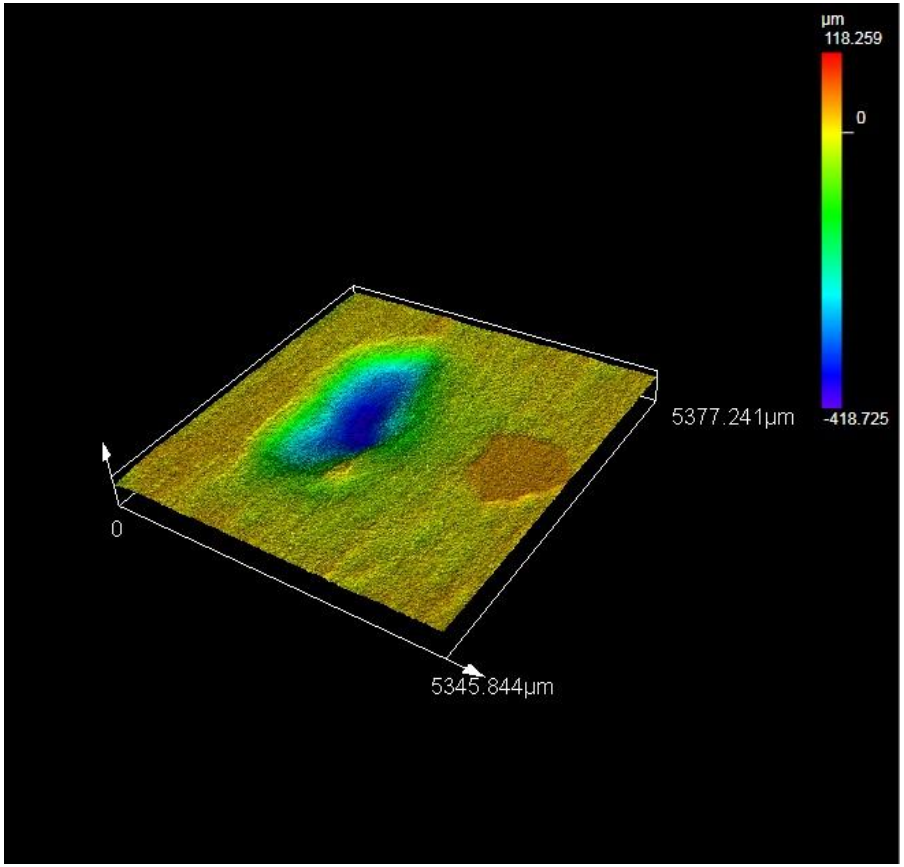


Один из способов моделирования образования язвенных дефектов на поверхности металла – периодическая замена испытательного раствора

Параметры среды:
Температура 65 ^{0}C
Давление атмосферное

Язвенная углекислотная коррозия

Вид язвы, полученной при выдержке образца металла в течении 200 часов в углекислотной среде лабораторной установки





1



2

Образец стали 09Г2С
с лицевой и обратной сторон

3D-изображение язвы, построенное при помощи **конфокальной микроскопии**

Язвенная углекислотная коррозия

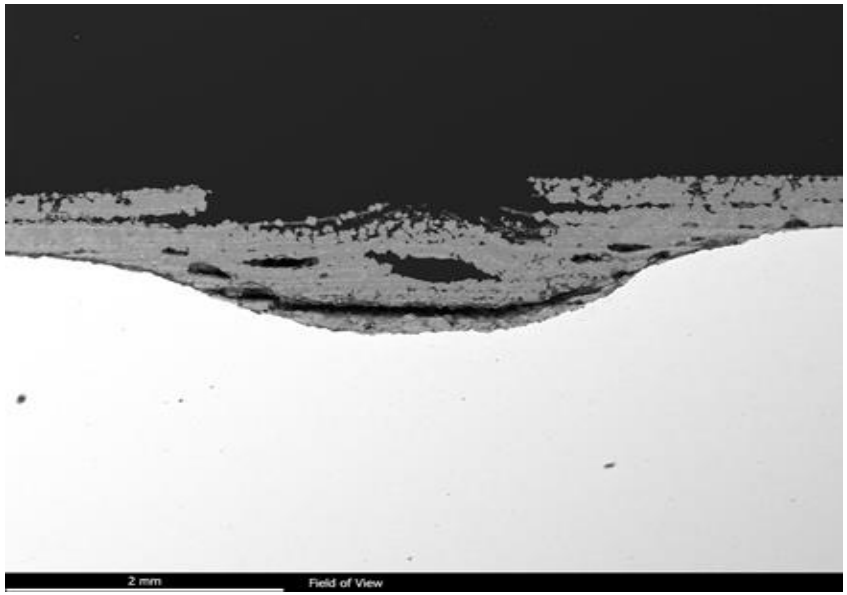
Вид язвы, полученной при повторной выдержке образца металла в течении 200 часов в углекислотной среде лабораторной установки



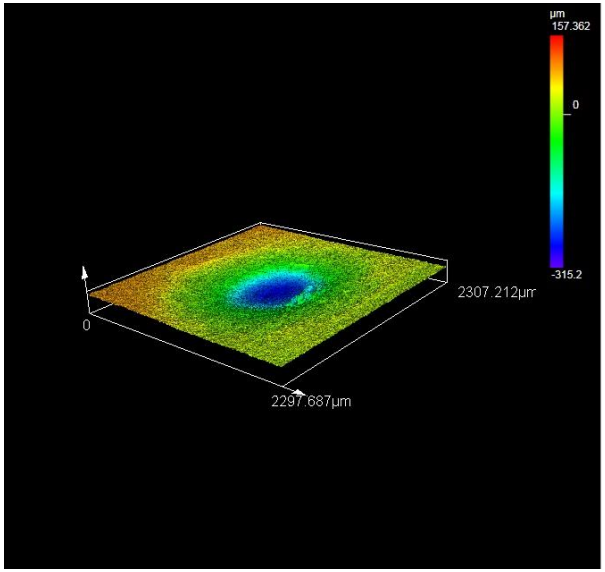
Образец стали 09Г2С с ПК

Образец стали 09Г2С без ПК





Сечение по язве

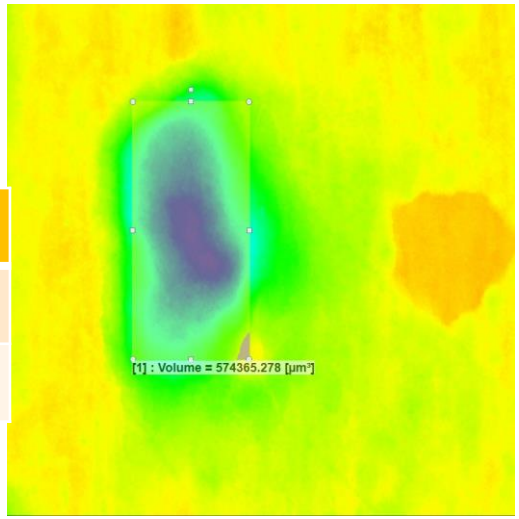


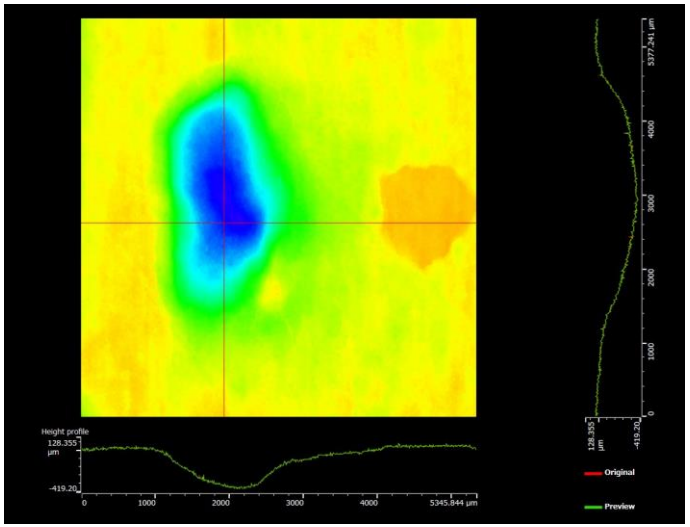
3D-изображение язвы

Язвенная углекислотная коррозия

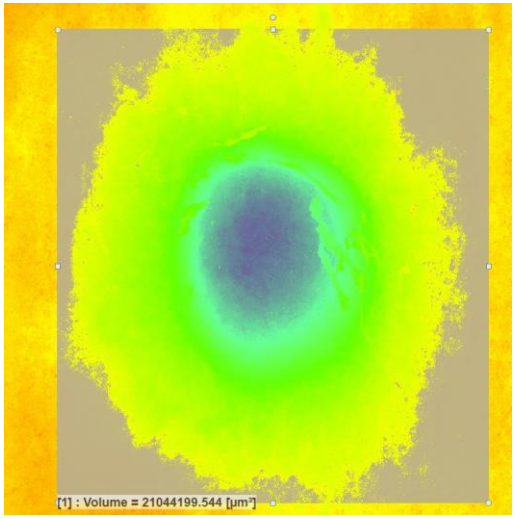
	Параметры язвы, µm		
	H max	L max	N max
1	-3650	3179	1890

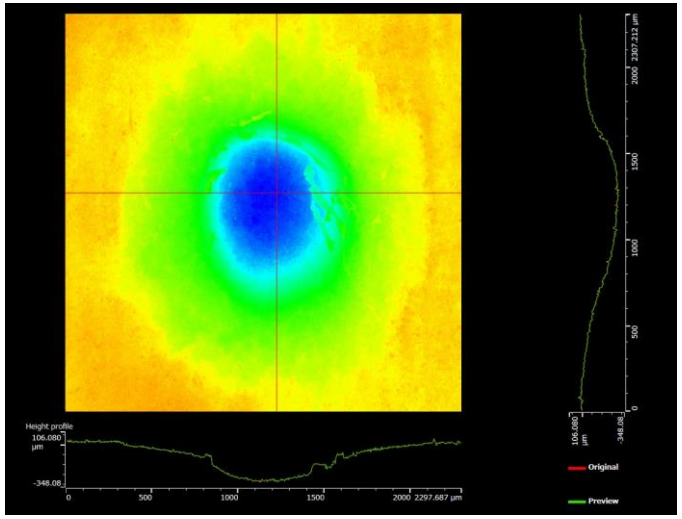
$V_{max} = 5{,}7x10^5 \mu m^3$





Площадь и сечение язвы 1





Площадь и сечение язвы 2

	Параметры язвы, µm		
	H max	L max	N max
2	-3150	7720	6960

$V\ max = 2{,}1x10^7 \mu m^3$

Сравнение язв, полученных на образцах металла в промысловых условиях, с лабораторными образцами



Промысловый образец. Сталь 09Г2С



Лабораторный образец. Сталь 09Г2С

Характер образования	Диаметр	Тип
Промысловая	D1 = 9 мм	сквозная
Лабораторная	D2 = 7 мм	Не сквозная

Язвенная углекислотная коррозия

Выводы:

1. Испытания на равномерную коррозию можно использовать в качестве инструмента для изучения механизма коррозионного разрушения сталей.
2. В настоящее время отсутствуют известные способы «выращивания» язв в лабораторных условиях.
3. Учитывая, что основным механизмом преждевременного разрушения элементов трубной инфраструктуры при эксплуатации является язвенная коррозия, моделирование данного вида коррозии считаем перспективным.

Казадаев Дмитрий Сергеевич

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

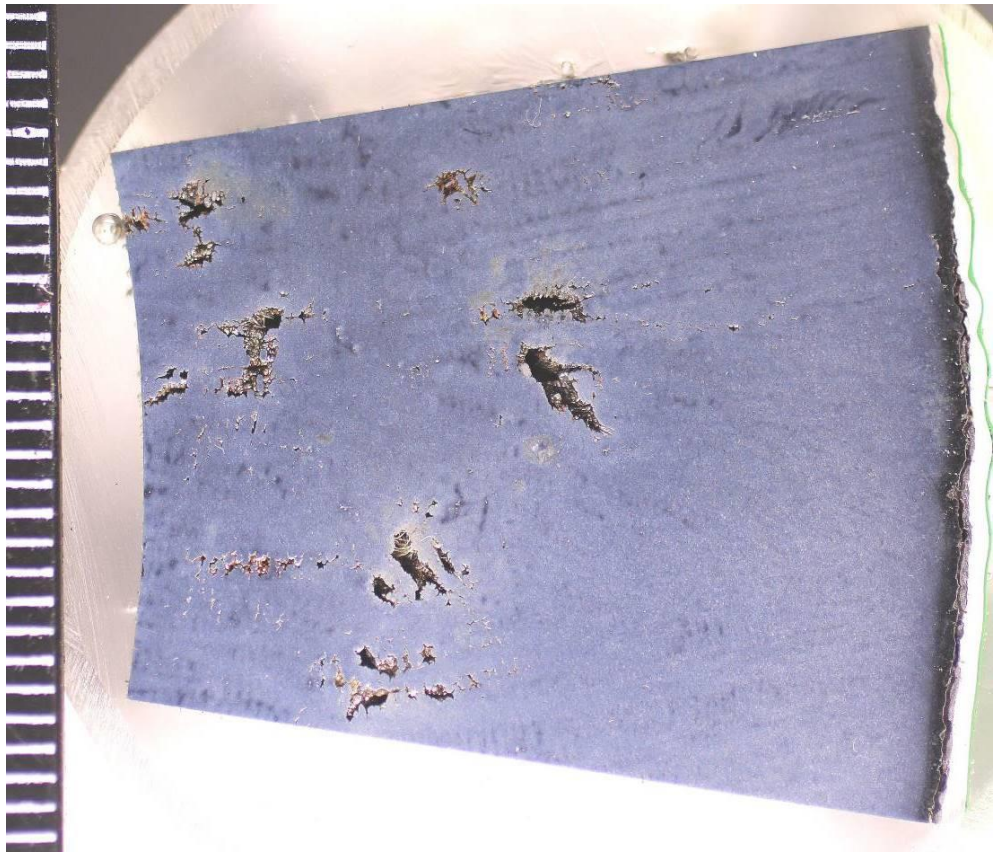
Наиболее распространенные причины преждевременного выхода из строя запорной арматуры

Докладчик:
Инженер отдела экспертизных исследований – Карнаухов Кирилл Анатольевич

Несоответствие НТД





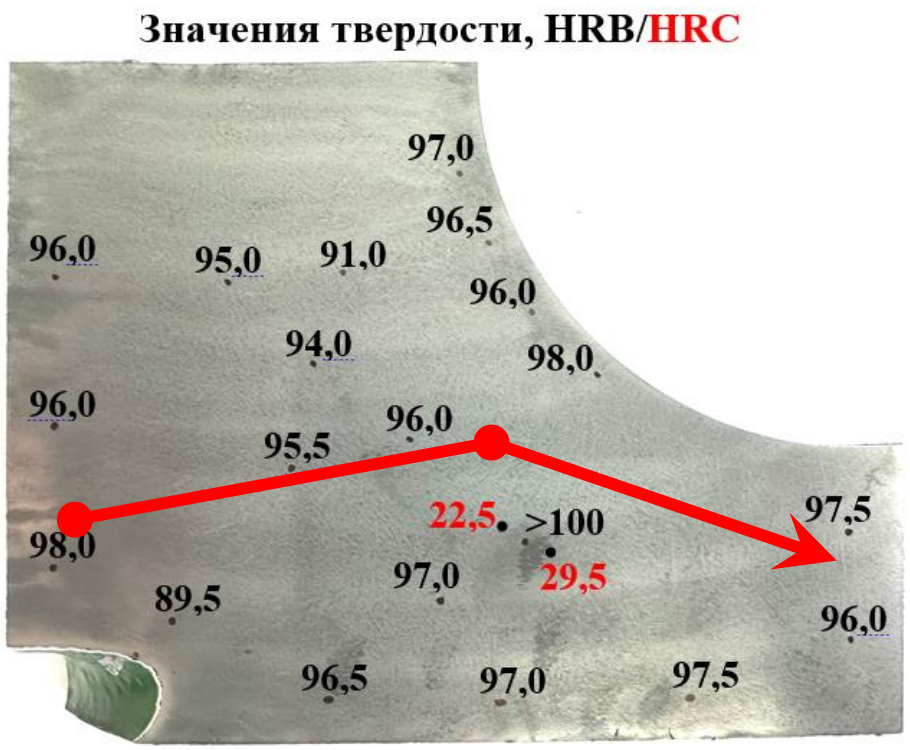


Задвижка ЗМС 100х35 К1 ХЛ

Макроструктура корпуса задвижки

Несоответствие НТД

Металл корпуса имеет неоднородную твердость по сечению. Значения твердости изменяются от 90 HRB до 30 HRC.



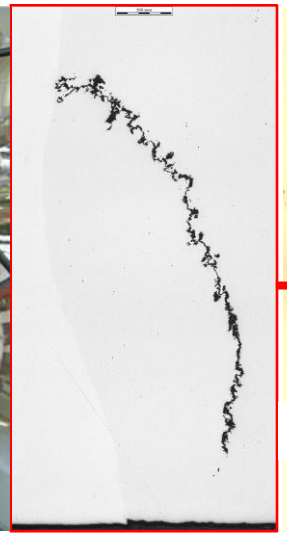
Марка стали	Твердость НВ, не более
25ХГТ	217
25Х2Н4МА, 25Х2Н4ВА	269
25ХГНМТ	+
26ХГ2МФ	241
27ХГР	217
30Х	187
30ХМ	229
30ХМА	229

Твердость по Бринелю по ГОСТ 4543-2016

При переводе значений твёрдости по стандарту ASTM A 370-2012 Регламентированная твёрдость по методу Роквелла для стали 30ХМА составляет 20.5 HRC

Несоответствие НТД







Трещина в ЗТВ наплавки







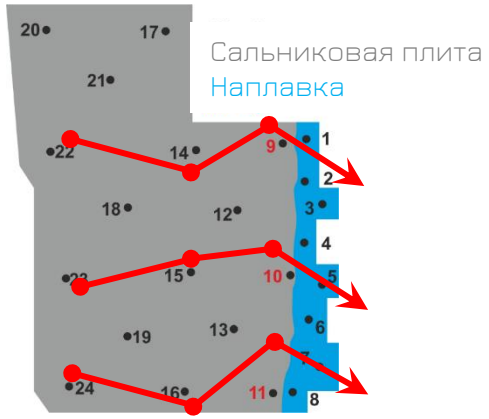


Задвижка 12-10К. DN12 дюймов. Рабочее давление 450 бар, температура +70С, среда высокосернистый осушенный газ

Несоответствие НТД

Результаты анализа химического состава материала

	Elements, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Co	S	P
	0.45	0.29	**0.76**	**1.11**	0.03	0.07	0.25	0.02	0.01	0.001	0.002
AISI 4130	0.28-0.33	0.15-0.35	0.40-0.60	0.80-1.10	≤0.25	-	0.15-0.25	-	-	≤0.040	≤0.035
F22 ASTM A182	0.05-0.15	≤0.50	0.30-0.60	2.00-2.50	-	-	0.87-1.13	-	-	≤0.040	≤0.040



Значения твердости																								
HRB								HRC			HRB													
1	2	3	4	5	6	7	8	**9**	**10**	**11**	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
90,5	92,0	92,5	92,0	94,0	94,5	95,0	94,5	**36,0**	**37,0**	**36,0**	99,5	97,5	95,5	98,0	97,0	98,0	96,0	96,5	97,5	97,5	97,5	97,0	97,5

Схема измерения твердости тела сальниковой плиты

Несоответствие НТД

Результаты испытаний на растяжение

	предел прочности, $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение, δ_5, %	Относительное сужение, ψ, %
1	870	**502**	**13,7**	40,2
2	902	532	**14,3**	41,5
3	880	**516**	**14,7**	42,2
Требования API 6A к DN/классу API 10000 (таблица 4 API 6A)				
Обозначение материала	min., MPa	min., MPa	min., %	min., %
75K	655	517	17	35

Результаты испытания на ударный изгиб

ºC	KCV, J/cm²	KV, J	Доля вязкой составляющей, %
-45	12 11 11	**9,8** **8,8** **8,8**	0 0 0
Требования API 6A температурная классификация L			
-46	-	≥20	-

Нарушение правил монтажа и эксплуатации

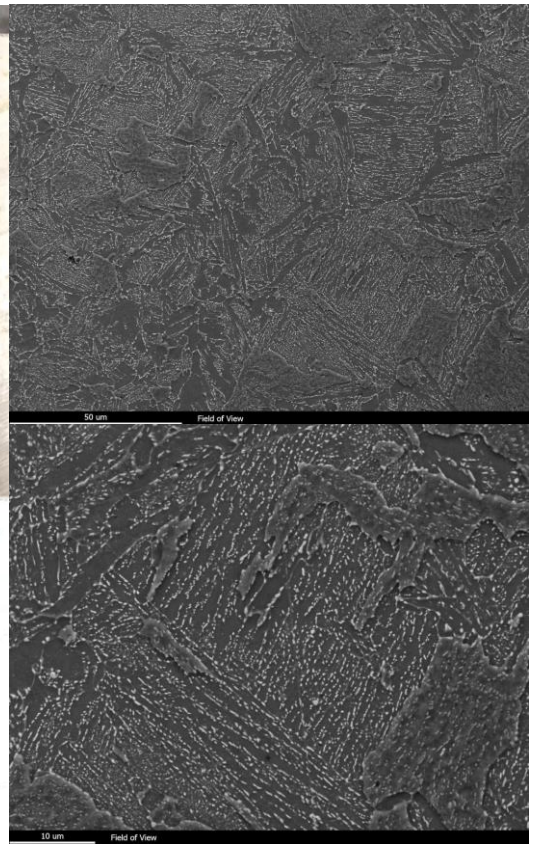


Вид корпуса задвижки KV141 при поступлении





Вид внутренней поверхности корпуса задвижки в области сквозного отверстия.



Микроструктура металла корпуса

Нарушение правил монтажа и эксплуатации

Химический состав материала задвижки KV141

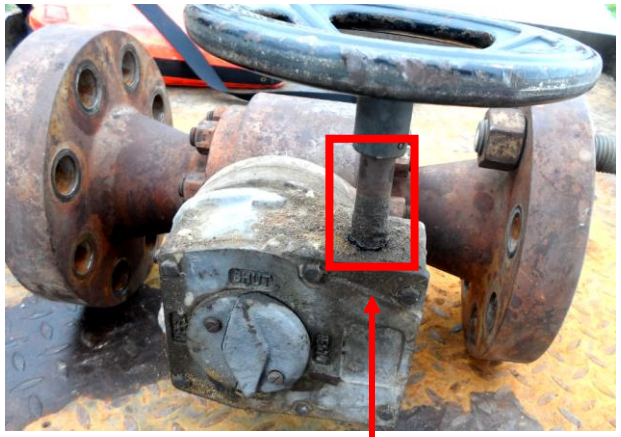
Маркировка	Массовая концентрация, %														
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	Nb	W	Ti	S	P
Корпус задвижки	Осн.	0,31	0,25	0,57	0,91	0,005	0,177	0,013	0,007	0,006	0,003	<0,005	0,005	0,006	0,013
Данные паспорта № 6/02/1.0052/2018															
Паспорт	Осн.	0,32	0,37	0,68	1,05	-	0,22	-	0,029					0,008	0,018
Требования ASTM A 29 к стали AISI 4130															
≥	Осн.	0,2 8	0,15	0,40	0,80		0,15								
≤	Осн.	0,33	0,35	0,60	1,10	0,25	0,25		0,35					0,040	0,035
Требования API Spec 6A к материалам для корпусов															
Не более	Осн.	0,45	1,00	1,80	2,75	1,00	1,50					0,30		0,025	0,025

Механические свойства материала задвижки KV141

Маркировка	$\sigma_в$ Временное сопротивление разрыву	$\sigma_т$ (Предел текучести)	δ_5 (Относительное удлинение)	ф (Относительное сужение)	KCU – 60 °C (Ударная вязкость)	Твердость НВ (HRB)
	МПа		%		Дж/см^2	Ед.
корпус	670	485	25,5	69	123	205 – 210 (94 - 95)
	675	495	26,0	72	122	
					95	
Данные паспорта №6/02/1.0052/2018						
	671	480	22	42	43	219
Требования API Spec 6A к материалам для корпусов (в левой колонке обозначение материала)						
36К	483	248	21	-		
45К	483	310	19	32		
60К	586	414	18	35		
75К	655	517	17	35		

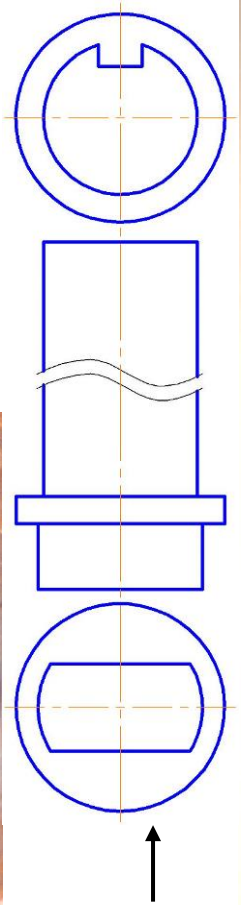


Неправильный выбор материального исполнения



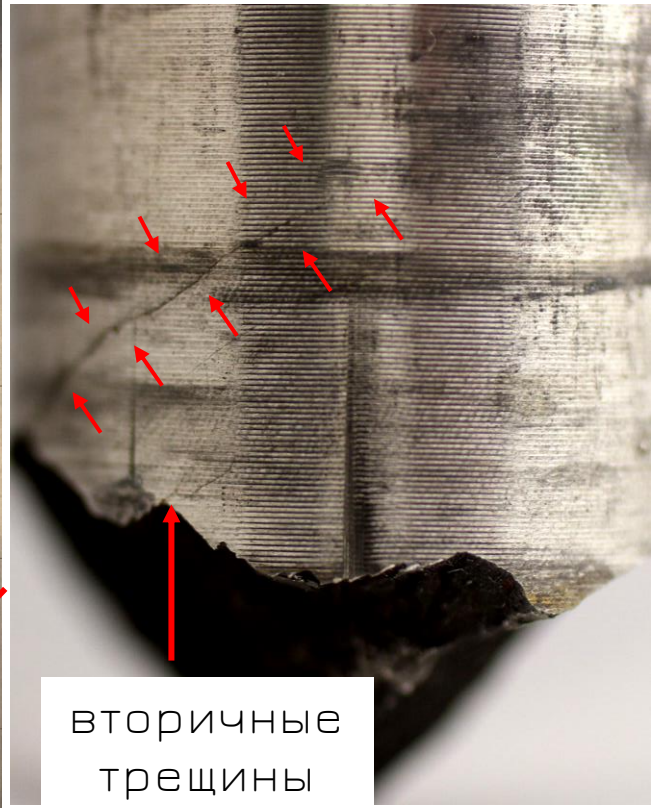


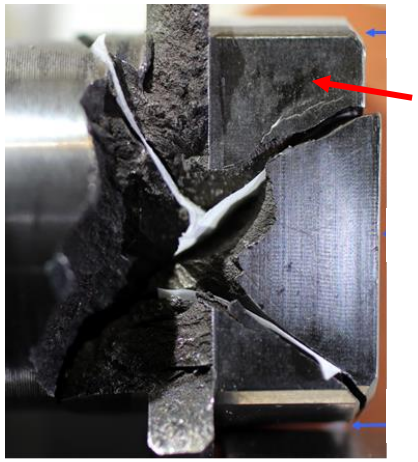
Остатки штока на месте крепления в шар



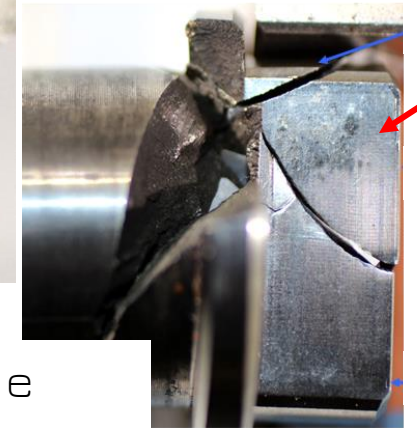


Тело штока





Участки контакта с шаром



Участки контакта с шаром

DN3 дюйма, рабочее давление 128 бар, рабочая температура 35-40С, среда – осушенный сернистый газ.

Неправильный выбор материального исполнения

Результаты химического анализа материала штока

	Elements, %								
Образец	C	Cr	Ni	Cu	Mn	Nb	Co	Mo	V
Шток	0.026	15.8	4.89	3.42	0.84	0.21	0.040	0.064	**0.077**
ISO 15156-3 17-4 PH	**0.07**	**15.0-17.5**	**3.00-5.00**	**3.00-5.00**	**1.00**	**0.15-0.45**	-	-	-

Результаты химического анализа состава материала штока показали соответствие стали 17-4 PH.

Твердость материала штока составляет 34-36 HRC

Выводы

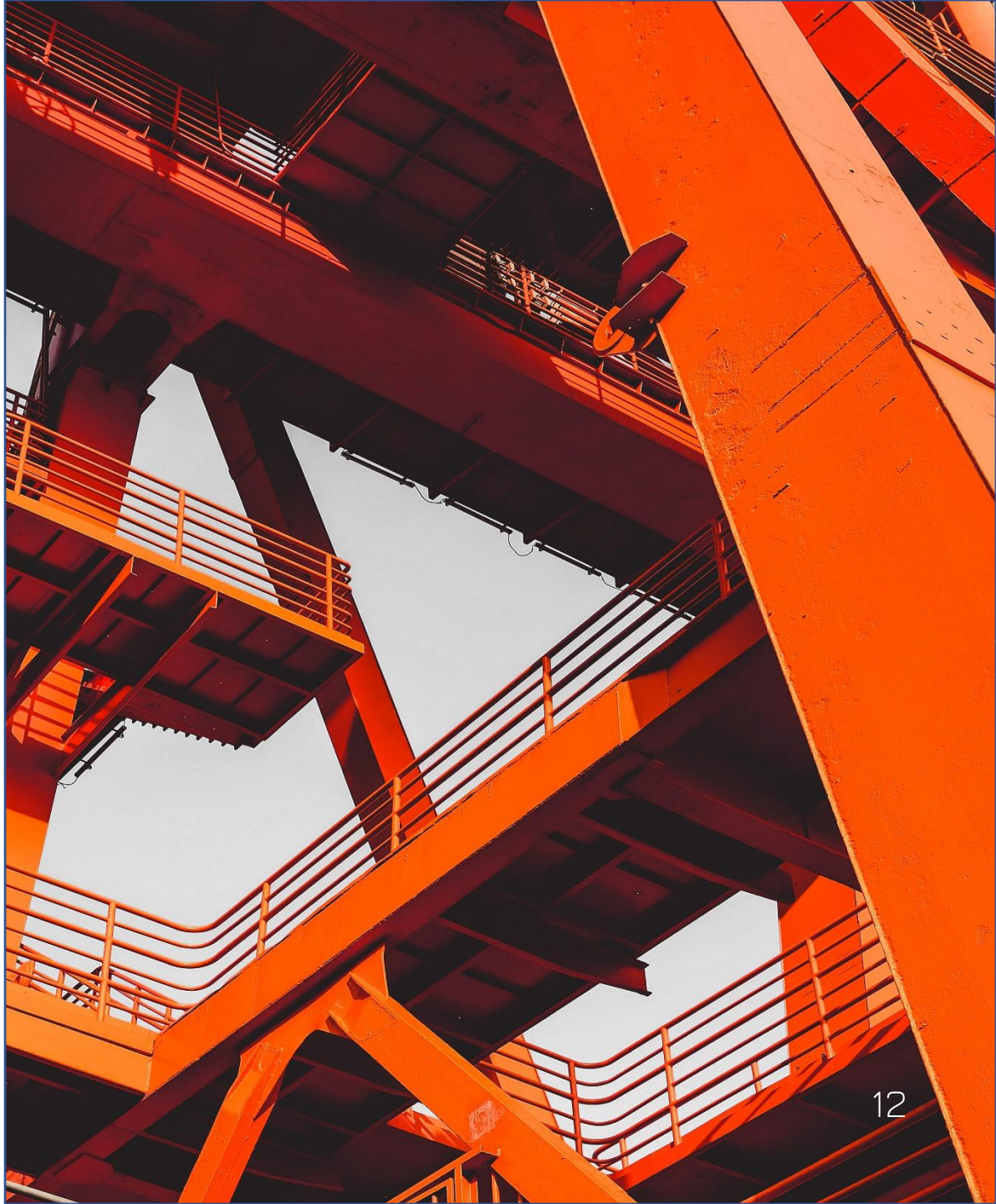
Наиболее распространенные причины преждевременного выхода из строя:

- **Несоответствие НТД**
- Н**арушение правил монтажа и эксплуатации**
- Н**еправильный выбор материального исполнения**

Рекомендации

Необходимо:

- Минимизировать вероятность образования пор, шлаковых включений, трещин и прочих дефектов в отливках.
- Проводить радиографический контроль.
- Применять заготовки, выполненные термомеханическим методом, ковкой.
- Исключить применение дисперсионно-твердеющих мартенситных сталей типа 17-4 PH в сероводородсодержащих средах



Карнаухов Кирилл Анатольевич

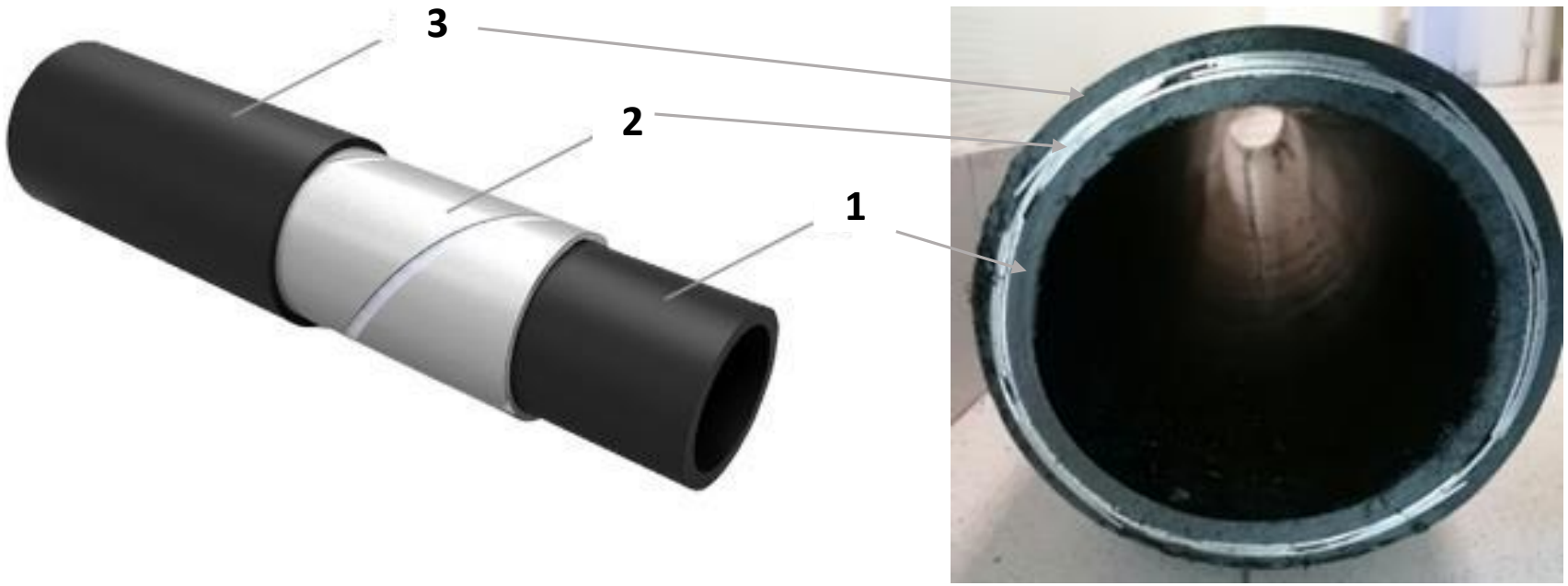
+ 7 9871611401
karnauhov@its-samara.com

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Методы оценки стойкости материала стальной армирующей ленты к воздействию сероводородсодержащих сред

Докладчик:
Начальник отдела исследований металлопродукции ООО «ИТ-Сервис»
Кощеев Кирилл Игоревич

Схематичный вид ГПАТ в разрезе



1. **Внутренний полимерный лайнер;**
2. **Стальная армирующая лента;**
3. **Наружный защитный полимерный слой.**

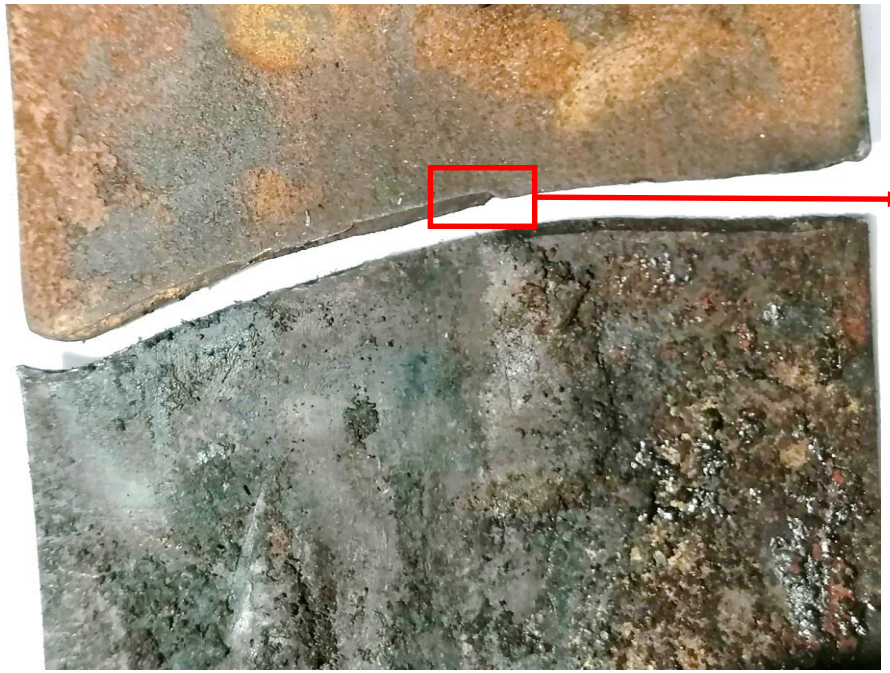
Вид разрушенных образцов ГПАТ со стальной армирующей лентой

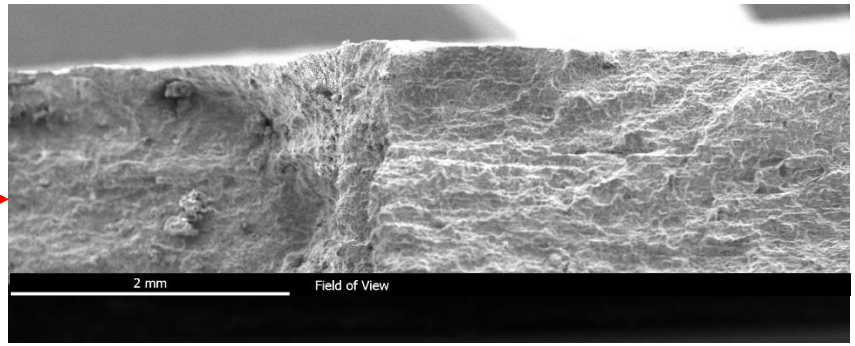


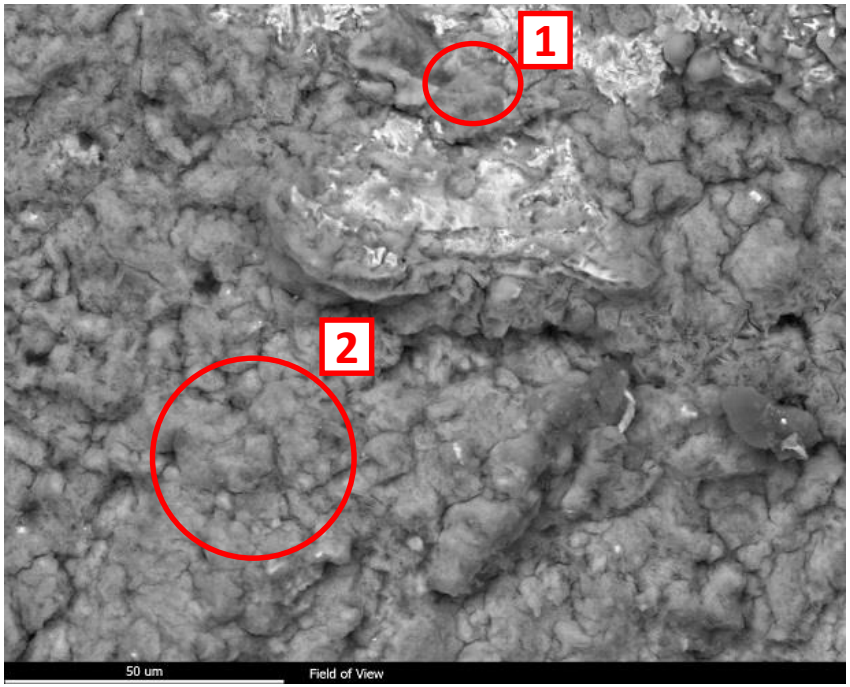




Химический состав продуктов коррозии в области разрушения стальной армирующей ленты







Обл. изм.	Содержание химических элементов, вес. %							
	C	O	Na	Si	S	Cl	Mn	Fe
1	4.76	23.56	5.92	0.50	3.74	8.87	1.12	51.53
2	4.05	13.39	4.15	-	6.58	0.49	0.82	70.50

Основные причины попадания H_2S-содержащей водной среды в слой с армирующей стальной лентой

Нарушения при монтаже и эксплуатации

Диффузия компонентов эксплуатационной среды через внутренний полимерный лайнер

Смешанная

Нарушения при монтаже и эксплуатации ГПАТ





Замятие и разрушение верхнего слоя ГПАТ вследствие нарушений технологии размотки бухты



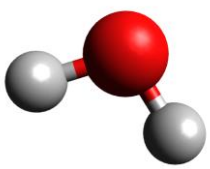


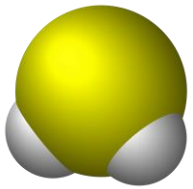
Повреждение наружного полимерного слоя и армирующей ленты при ударе зубом ковша экскаватора

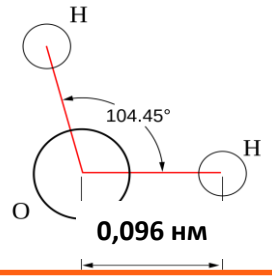
Диффузия компонентов эксплуатационной среды через внутренний полимерный лайнер

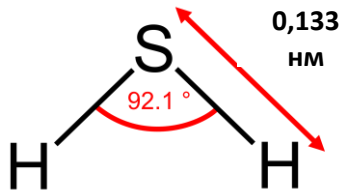
Газопроницаемость материалов [1]

Материал	Газопроницаемость $см^3/(см^2 \cdot с \cdot атм)$
Ткани	$10^1 \div 10^5$
Бумага, кожа, керамика	$10^{-5} \div 10^1$
Жидкости	$10^{-6} \div 10^{-5}$
Полимеры	$10^{-12} \div 10^{-6}$
Неорганические соли, стекла	$10^{-15} \div 10^{-12}$
Металлы	10^{-16} и ниже









Молекула H_2O | **Молекула H_2S**

Коэффициенты диффузии молекул в ПВЭП при Т=25°С [1]

Пенетрант	D, $см^2/с$	Пенетрант	D, $см^2/с$
Метан	$2 \cdot 10^{-7}$	Морфолин	$0{,}08 \cdot 10^{-7}$
Азот	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$	Ацетон	$0{,}5 \cdot 10^{-7}$
Пентан	$0{,}3 \cdot 10^{-7}$	Дихлорметан	$0{,}45 \cdot 10^{-7}$
Гексан	$0{,}25 \cdot 10^{-7}$	Хлороформ	$0{,}34 \cdot 10^{-7}$
Гептан	$0{,}22 \cdot 10^{-7}$	Тетрахлорметан	$0{,}1 \cdot 10^{-7}$
Октан	$0{,}19 \cdot 10^{-7}$	Дихлорэтан	$0{,}24 \cdot 10^{-7}$
Нонан	$0{,}16 \cdot 10^{-7}$	Хлорбензол	$0{,}3 \cdot 10^{-7}$
Декан*	$0{,}75 \cdot 10^{-7}$	Хлоргептан	$0{,}15 \cdot 10^{-7}$
Ундекан*	$0{,}61 \cdot 10^{-7}$	Метанол	$2{,}6 \cdot 10^{-7}$
Тридекан*	$0{,}26 \cdot 10^{-7}$	Этанол	$1{,}6 \cdot 10^{-7}$
Бензол	$0{,}38 \cdot 10^{-7}$	Н-пропанол	$0{,}76 \cdot 10^{-7}$
Толуол	$0{,}33 \cdot 10^{-7}$	Изо-пропанол	$0{,}42 \cdot 10^{-7}$
пара-Ксилол	$0{,}31 \cdot 10^{-7}$	Н-бутанол	$0{,}48 \cdot 10^{-7}$
Мета-Ксилол	$0{,}32 \cdot 10^{-7}$	Изо-бутанол	$0{,}4 \cdot 10^{-7}$
Пиридин	$0{,}23 \cdot 10^{-7}$	Вода	$0{,}36 \cdot 10^{-7}$
Метиламин	$0{,}95 \cdot 10^{-7}$	Перхлорэтан	$1{,}2 \cdot 10^{-7}$
Диэтиламин	$0{,}25 \cdot 10^{-7}$	Этилацетат	$0{,}47 \cdot 10^{-7}$
Триэтиламин	$0{,}1 \cdot 10^{-7}$	Циклогексан	$0{,}54 \cdot 10^{-7}$

1. Чалых А., Герасимов В., Хасбиуллин Р. Диффузия органических растворителей в полиэтилене и время защитного действия стенки полимерной трубы// Технологии и материалы. Полимерные трубы. 2008. №4 (22). С.44-46

Влияние температуры и давления на диффузию компонентов эксплуатационной среды

Транспортные коэффициенты CH4 в ПЭ [2]

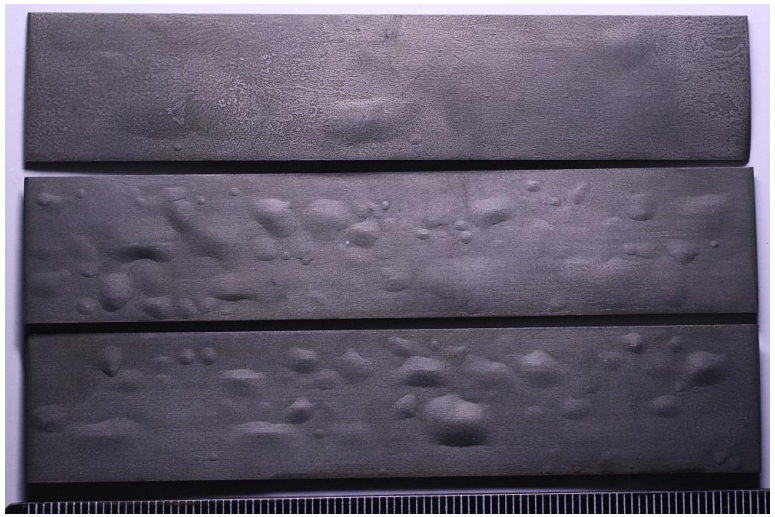
Polymer	*T* (°C)	*p* (MPa)	*l* (mm)	К. проницаемости (10^{-7} cm^3(STP)/cm·s·MPa)	К. диффузии (10^{-7} cm^2/s)	К. растворимости (cm^3(STP)/cm^3·MPa)
LDPE (Φa = 0.70)	41	4	1.85	4.3	3.4	1.30
	40	10	1.83	3.7	4.2	0.90
	40	7.5	1.82	4.8	3.7	1.30
	59	7.5	1.80	13	10	1.20
	80	4	1.83	29	23	1.30
	80	10	1.91	28	22	1.30
	77	7	2.75	32	26	1.20
MDPE (Φa = 0.53)	39	10	2.01	1.2	1.6	0.78
	39	7	1.92	1.5	2.1	0.74
	60	7	1.99	5	4.7	1.10
	59	4	1.95	3.3	6.5	0.51
	80	4	1.91	12	11	1.10
HDPE (Φa = 0.37)	39	7	2.08	0.92	1.6	0.57
	61	7	1.99	2.6	4.6	0.56
	77	10	2.05	5.1	9.2	0.56

Транспортные коэффициенты CO2 в ПЭ [2]

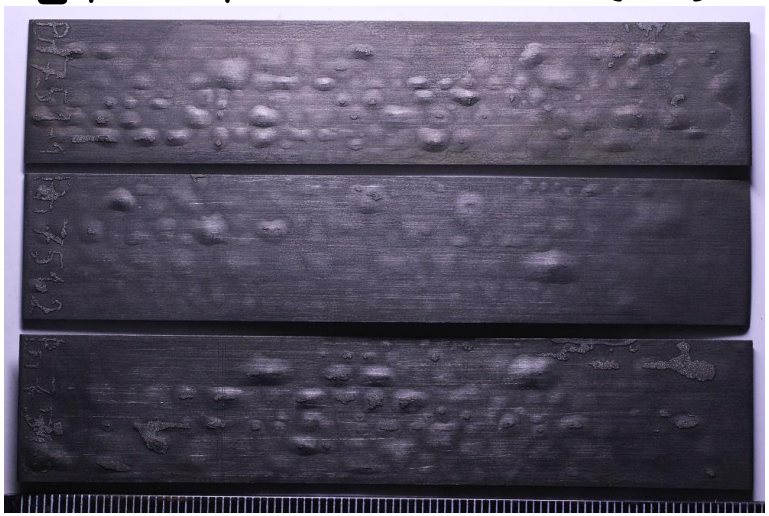
Polymer	*T* (°C)	*p* (MPa)	*l* (mm)	К. проницаемости (10^{-7} cm^3(STP)/cm·s·MPa)	К. диффузии (10^{-7} cm^2/s)	К. растворимости (cm^3(STP)/cm^3·MPa)
LDPE (Φa = 0.70)	40	4	1.83	22	6.7	3.30
	60	4	1.80	41	19	2.20
	76	4	2.16	64	22	2.90
MDPE (Φa = 0.53)	39	4	1.95	8.1	3.7	2.25
	61	4	2.03	17	10	1.65
	80	4	1.95	29	17	1.80
HDPE (Φa = 0.37)	40	4	2.01	5.5	4.0	1.40
	60	4	2.09	9.6	8.2	1.20
	81	4	2.07	19	16	1.20

2. B. Flaconnèche, J. Martin, M.H. Klopffer. Permeability, Diffusion and Solubility of Gases in Polyethylene, Polyamide 11 and Poly(vinylidene fluoride)// Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 56 (2001), No. 3, pp. 261-278

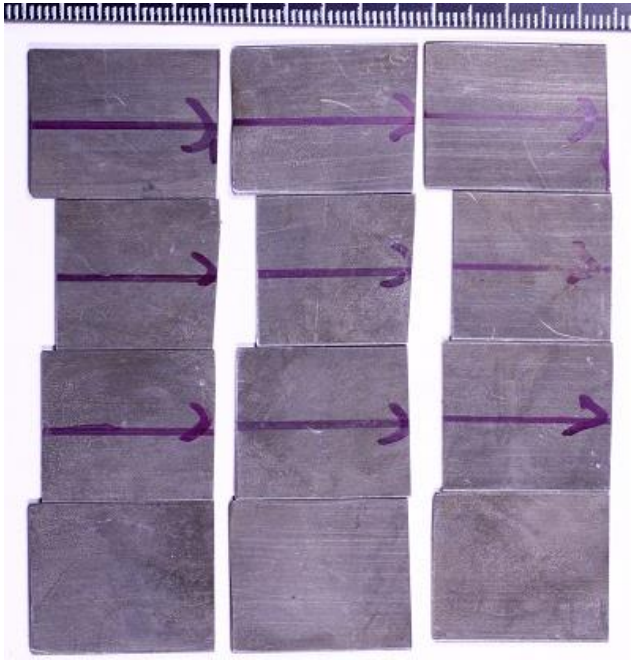
Вид поверхности образцов лент после испытания на стойкость к водородному растрескиванию (ВР)



Образец ленты №1

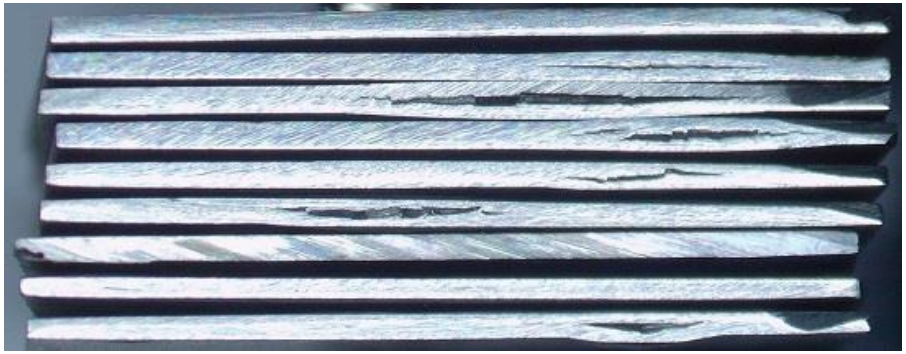


Образец ленты №2

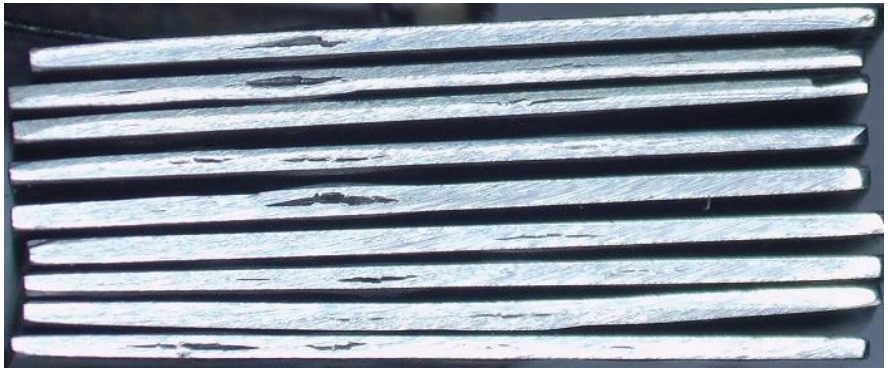


Образец ленты №3

Сечения образцов после испытания ленты на стойкость к водородному растрескиванию (ВР)



Образцы из ленты №1

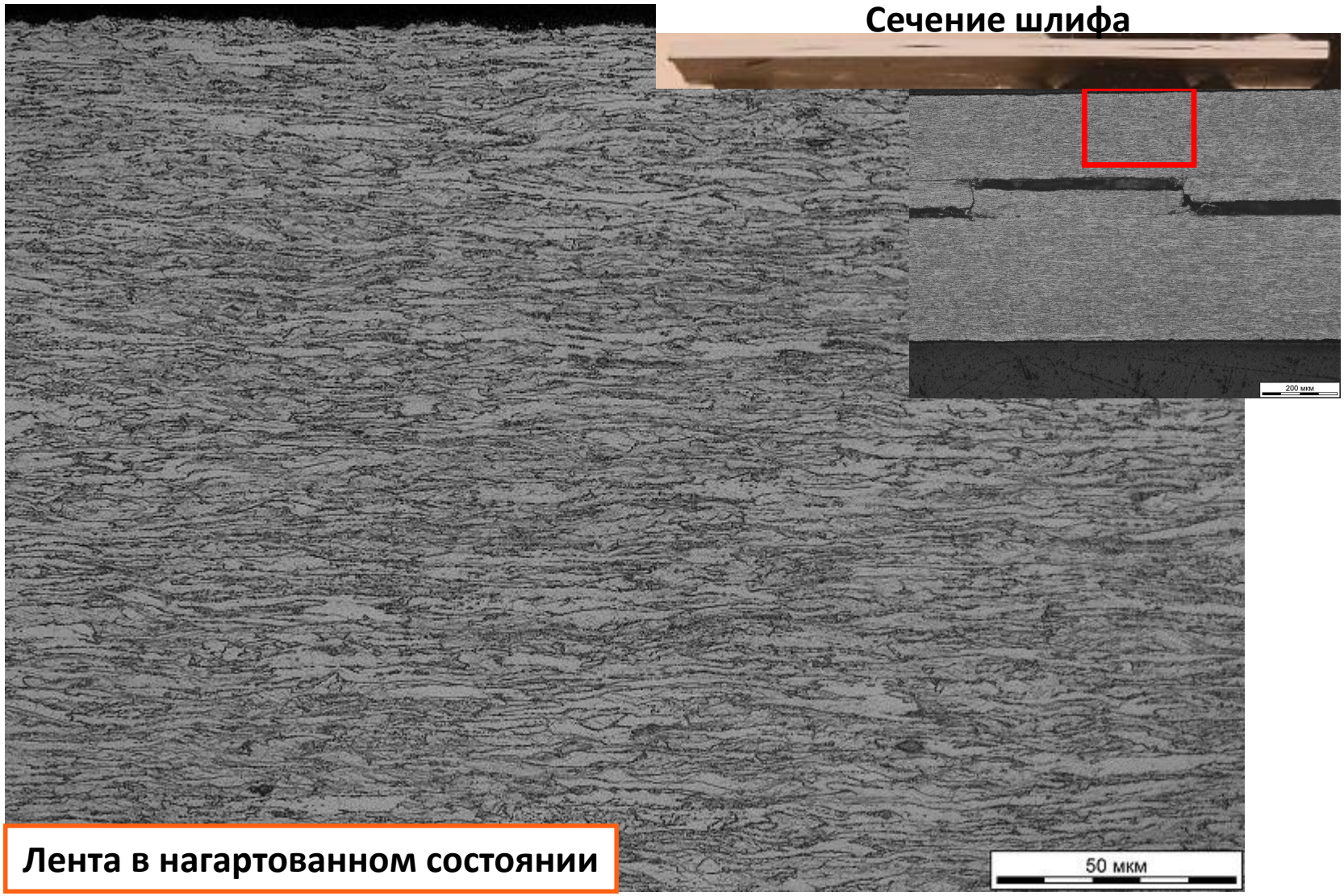


Образцы из ленты №2



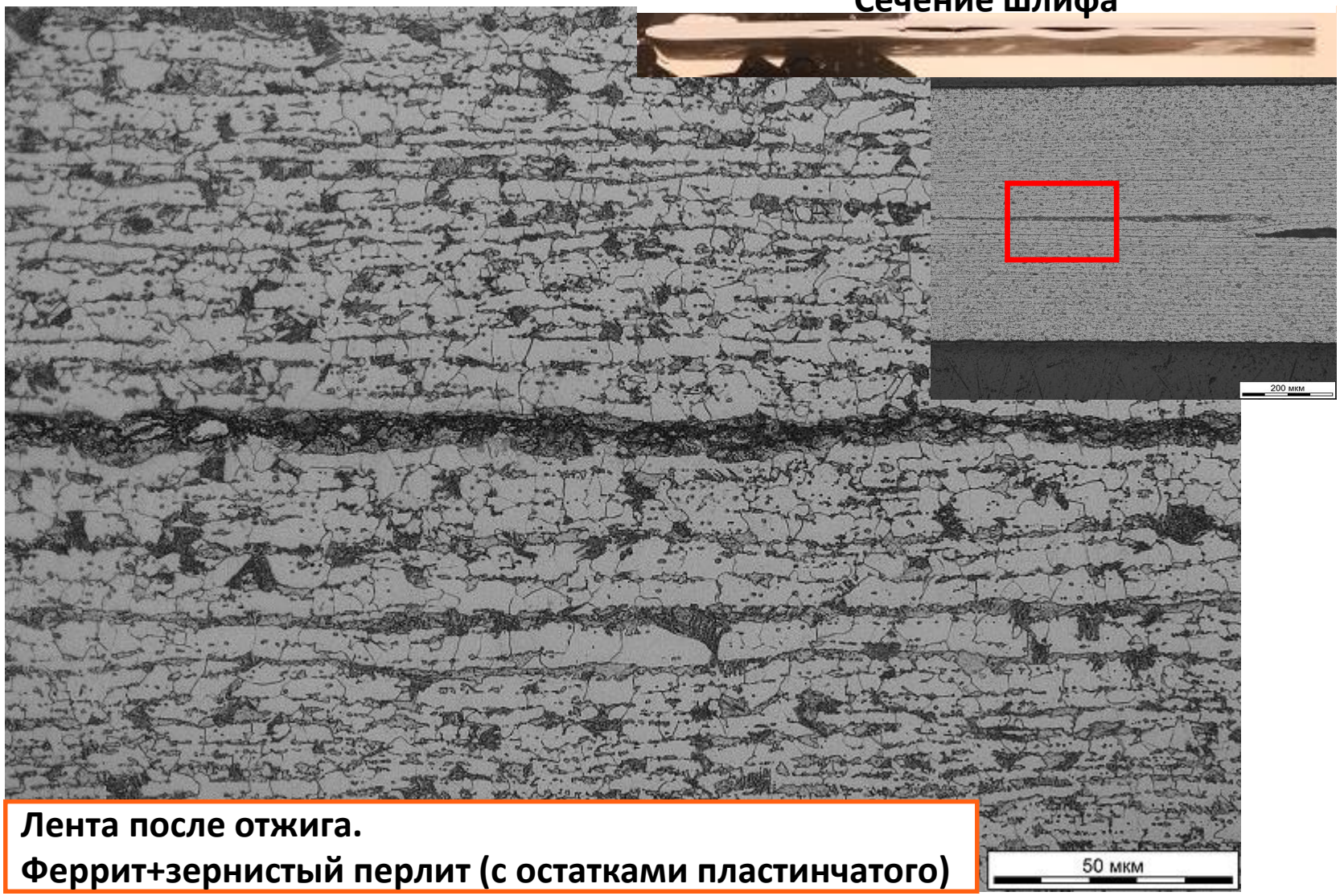
Образцы из ленты №3

Микроструктура ленты №1 после испытания на стойкость к водородному растрескиванию (ВР)



Лента в нагартованном состоянии

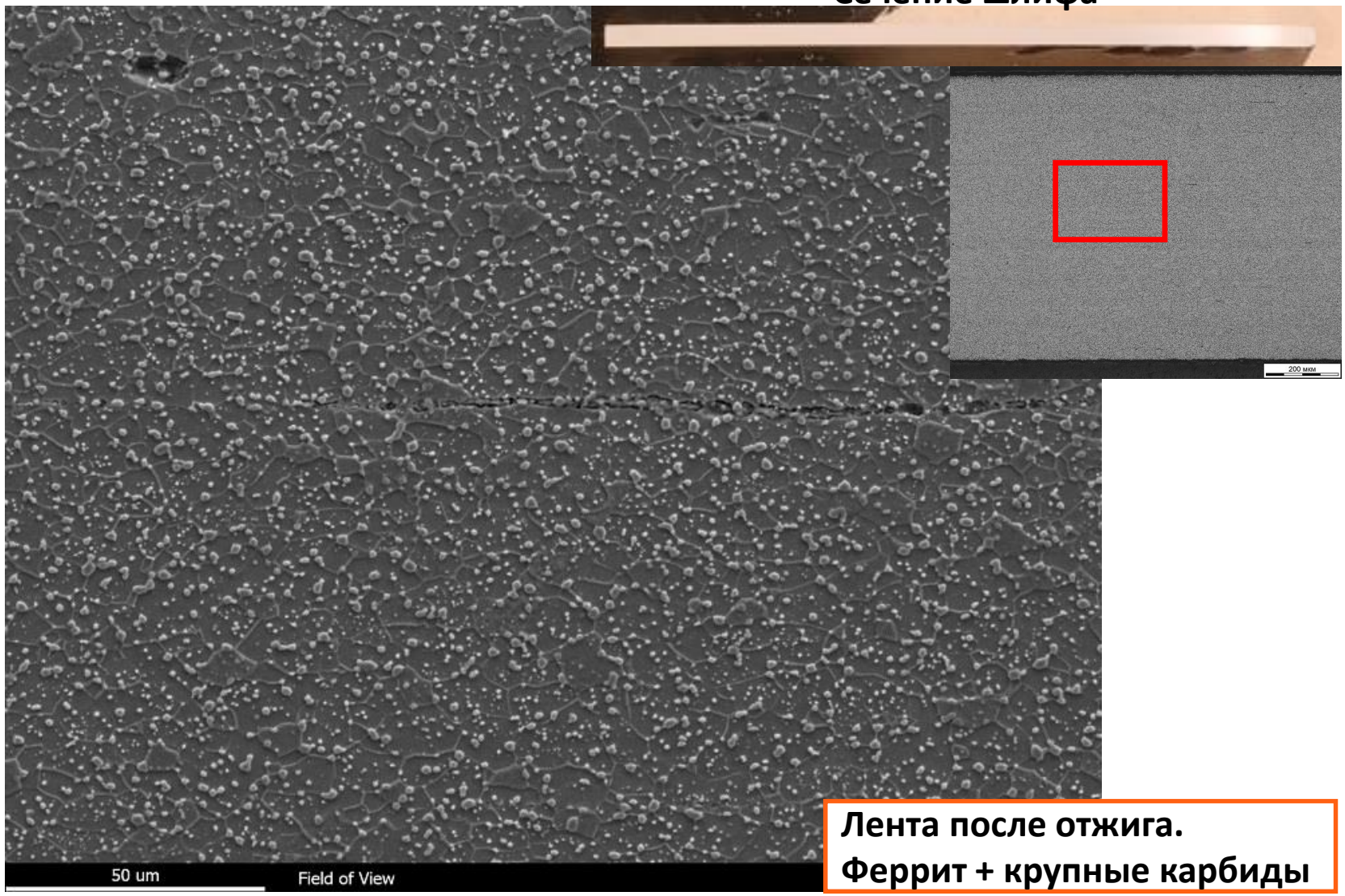
Микроструктура ленты №2 после испытания на стойкость к водородному растрескиванию (ВР)



Лента после отжига.
Феррит+зернистый перлит (с остатками пластинчатого)

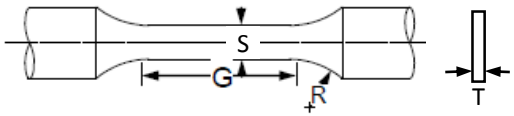
Микроструктура ленты №3 после испытания на стойкость к водородному растрескиванию (ВР)

Сечение шлифа



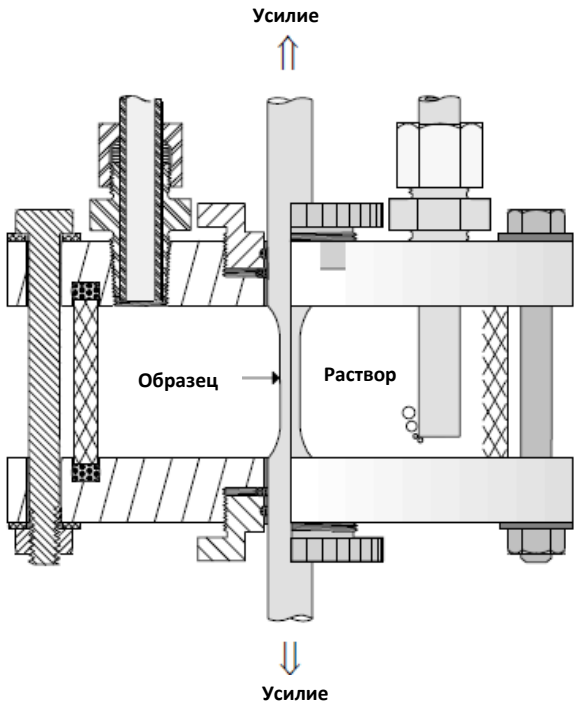
Лента после отжига.
Феррит + крупные карбиды

Испытание лент на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН)



Толщина ленты

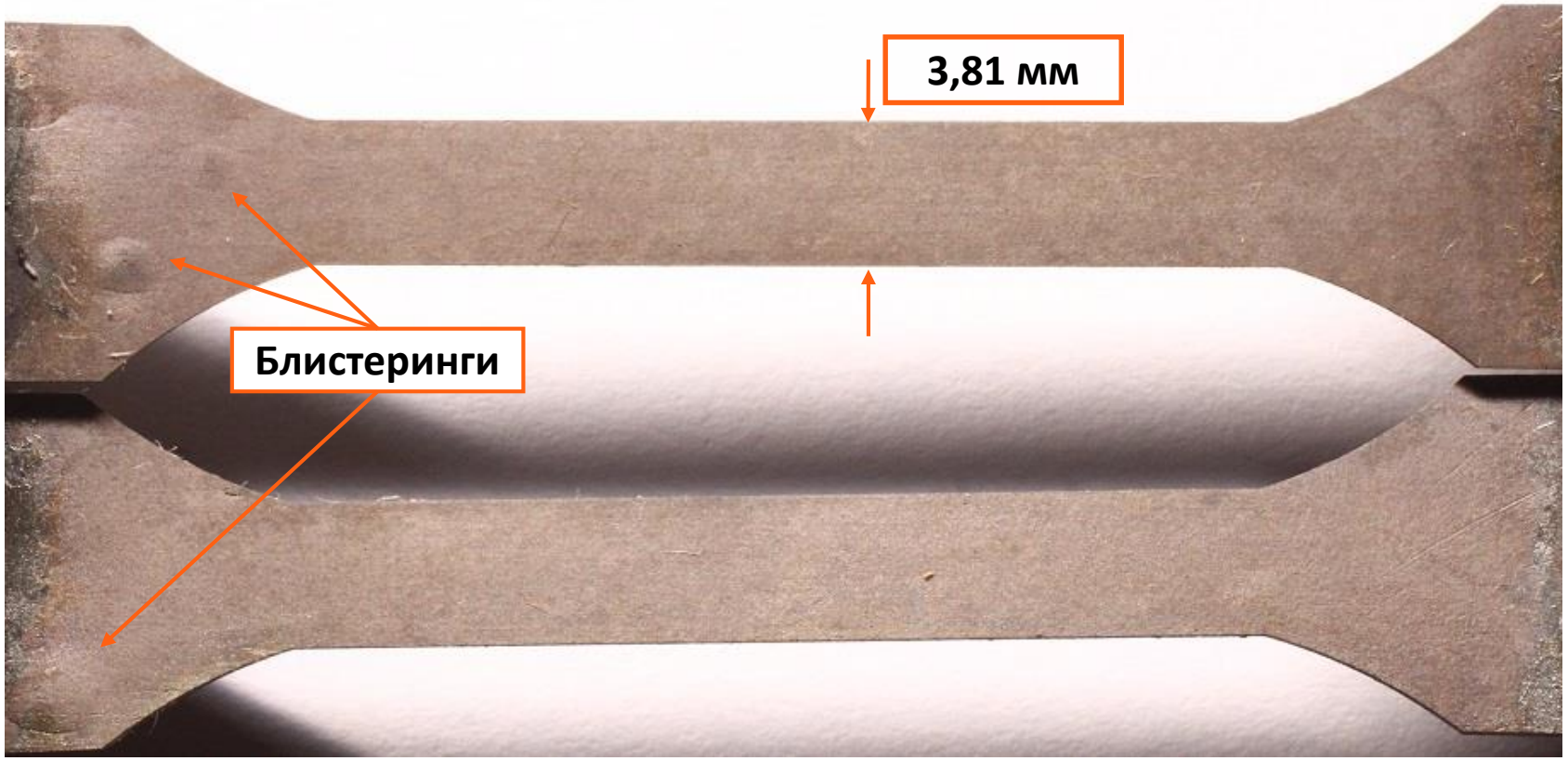
Размер	Полноразмерный образец	Уменьшенный образец
S	6.35 ± 0.13 mm (0.250 ± 0.005 in)	3.81 ± 0.05 mm (0.150 ± 0.002 in)
G	25.4 mm (1.00 in)	25.4 mm (1.00 in)
R (min.)	15 mm (0.60 in)	15 mm (0.60 in)





Вырезанные из ленты образцы

Образцы из ленты №1 после испытания на стойкость к СКРН

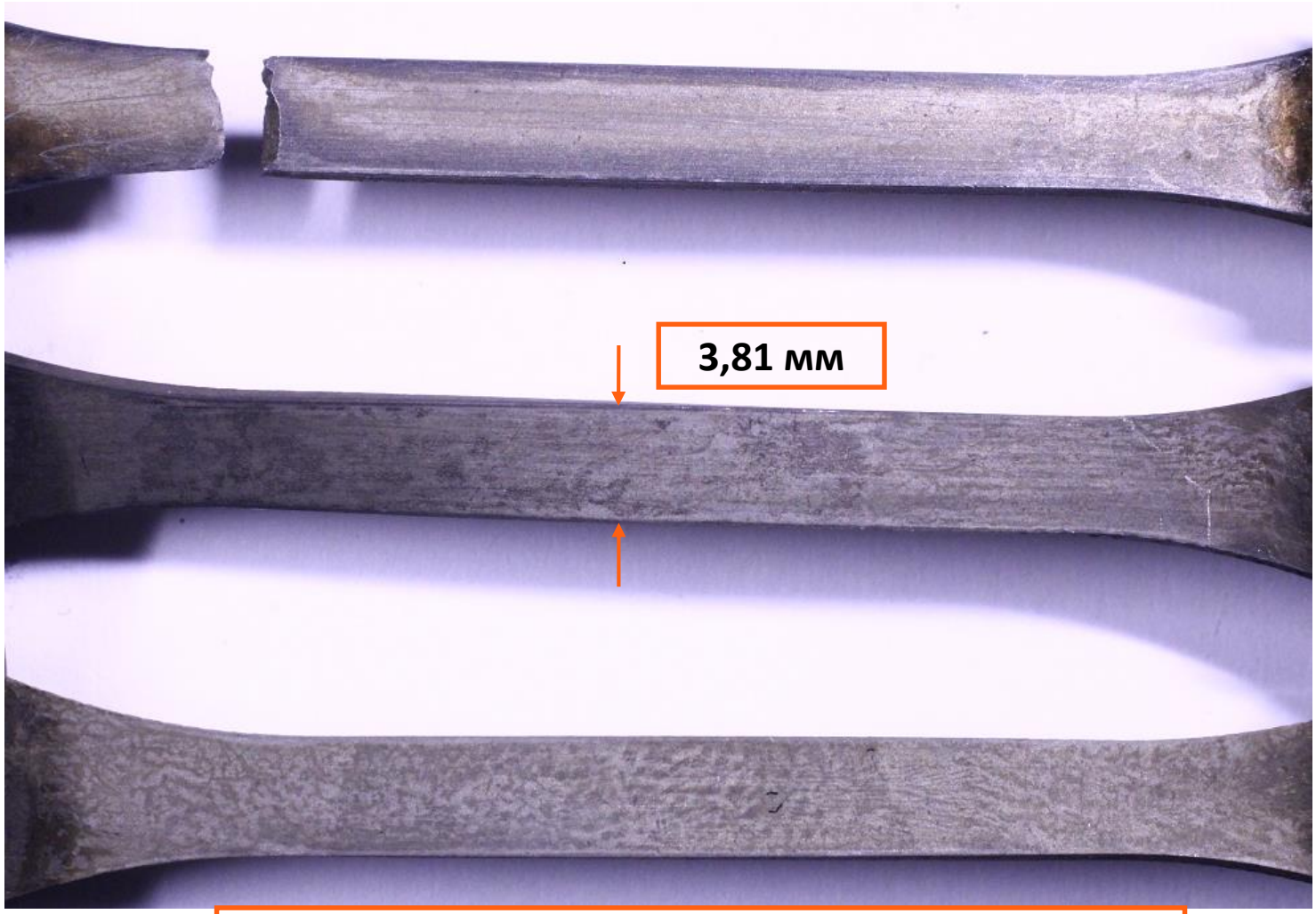


Оба образца прошли испытание

Образцы из ленты №2 после испытания на стойкость к СКРН

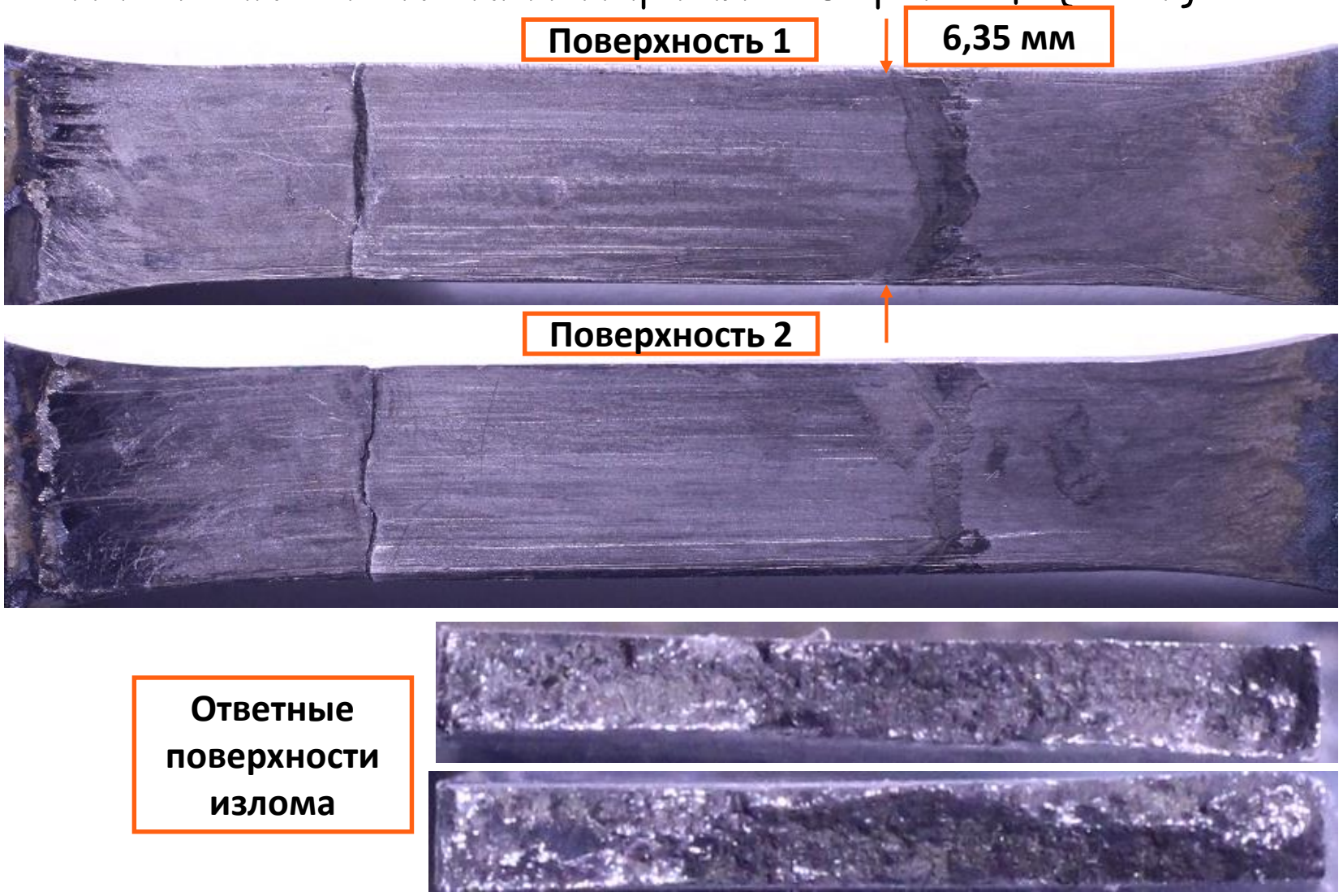


Образцы из ленты №3 после испытания на стойкость к СКРН. Партия 1

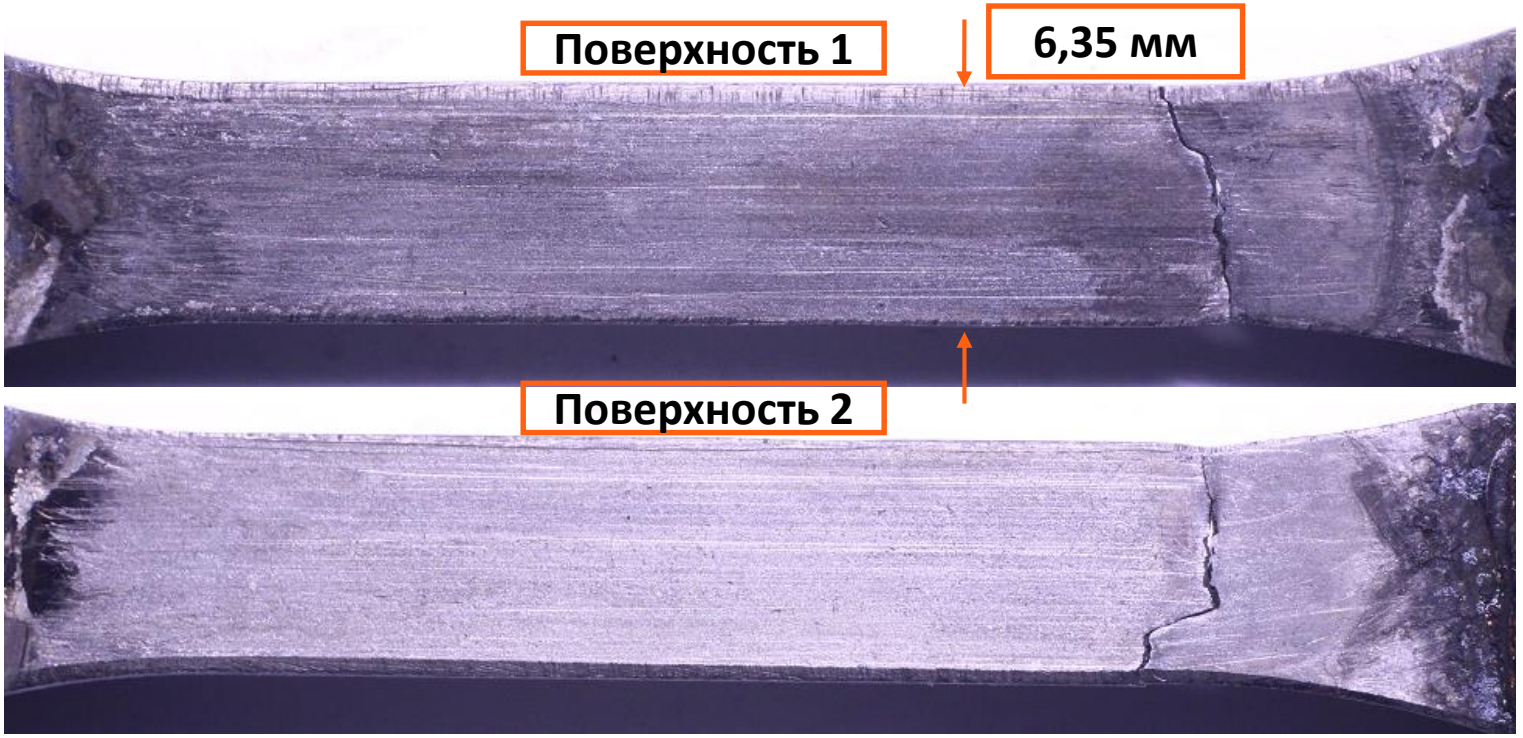


Партия I. Разрушился 1 (69 часов) образец из 3

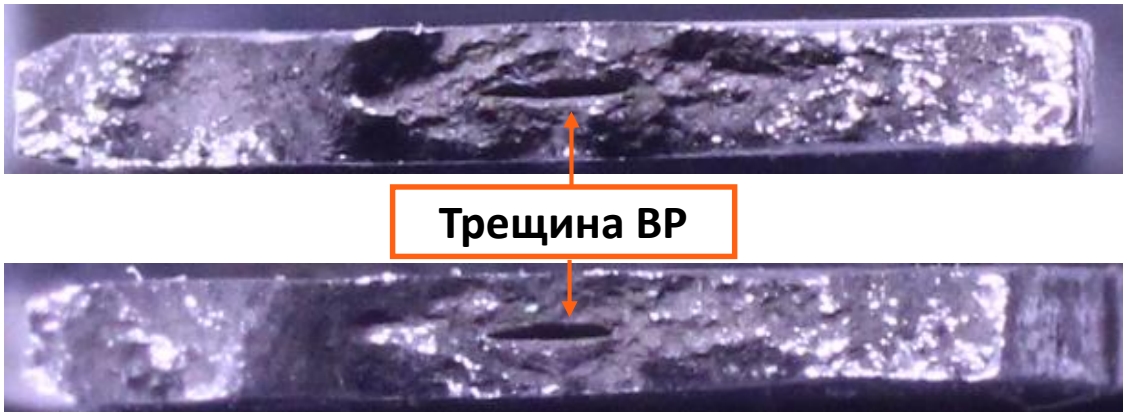
Образцы из ленты №3 после испытания на стойкость к СКРН. Партия 2. Образец 1 (43 ч.)



Образцы из ленты №3 после испытания на стойкость к СКРН. Партия 2. Образец 2 (49 ч.)



Ответные поверхности излома



Партия II. Разрушилось 2 (43 ч. и 49 ч.) образец из 6

Выводы

- **Для определения стойкости материала стальных армирующих лент к растрескиванию в сероводородсодержащих средах необходимо внесение дополнительных изменений в существующие методы испытаний;**
- **Специалистами ООО «ИТ-Сервис» были разработаны дополненные методы проведения испытаний на стойкость к ВР и СКРН материала лент;**
- **Было проведено уже более 20 испытаний на стойкость к растрескиванию материала армирующих лент;**
- **ООО «ИТ-Сервис» сотрудничает с компаниями-производителями ГПАТ, целью данного взаимодействия является изготовление и поставка ГПАТ, обладающих стойкостью к растрескиванию в сложных коррозионных условиях;**
- **Данные методы испытаний, после окончания их разработки, можно будет применять при разработке стальных армирующих лент стойких к воздействию H_2S-сред.**

Кощеев
Кирилл Игоревич

+ 7 (903) 300-75-16
koscheevki@its-samara.com

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

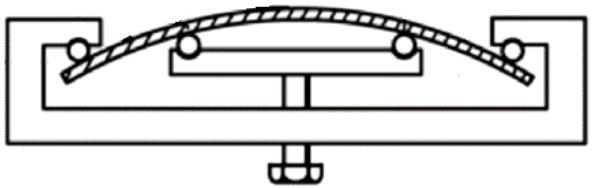
Разработка программ коррозионных испытаний на основе существующих методик с целью лабораторного моделирования осложненных многофакторных (нестандартных) условий эксплуатации.

Докладчик:
Начальник испытательного центра «ИТ-Сервис»
Ермошкин Антон Александрович

Оценка защитной способности ингибиторов коррозии, а также их метанольных растворов, в сероводородсодержащих средах.

Изготовление комплектов образцов для испытания на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН)

Нагружение образцов в специальной оправке



Метод четырехточечного изгиба по ASTM G39.

Выдержка образцов в течение одного часа в ёмкостях с ингибиторами коррозии

Сушка на воздухе в течение одного часа

Выдержка образцов в течение 720 ч, в ёмкости с тестовым раствором А по NACE TM0177 насыщенным сероводородом

Исследование образцов

Оценка защитной способности ингибиторов коррозии, а также их метанольных растворов, в сероводородсодержащих средах.

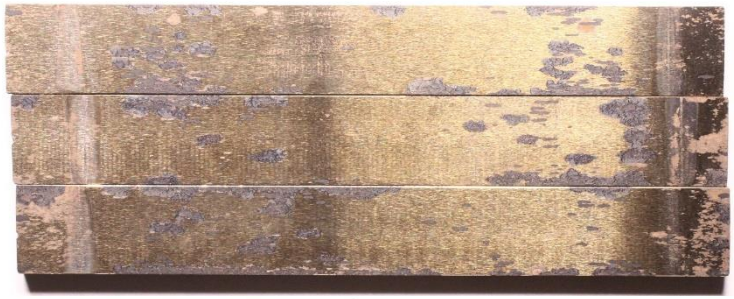
Внешний вид образцов после выдержки 720 ч.

Образцы СКРН без предварительной выдержки в ингибиторе коррозии



Образцы СКРН с предварительной выдержкой в ингибиторе коррозии

1



2



3



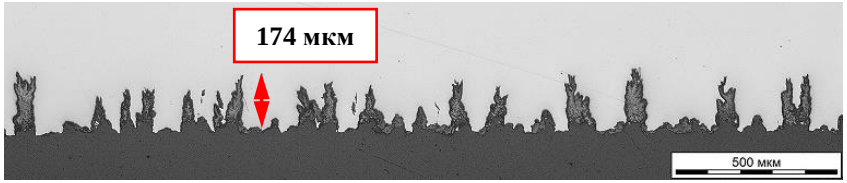
4



Оценка защитной способности ингибиторов коррозии, а также их метанольных растворов, в сероводородсодержащих средах.

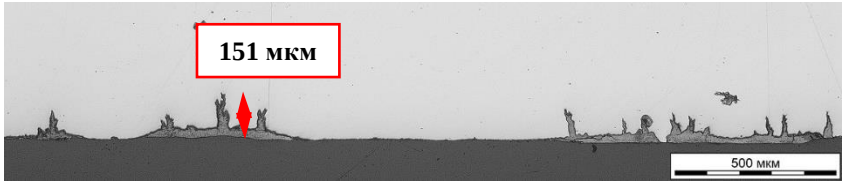
Исследование образцов после выдержки 720 ч. на оптическом микроскопе

Образцы СКРН без предварительной выдержки в ингибиторе коррозии

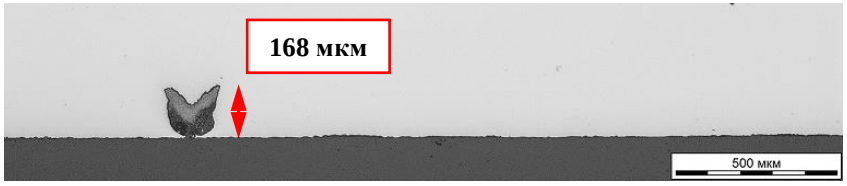


Образцы СКРН с предварительной выдержкой в ингибиторе коррозии

1



2



3



4



Оценка воздействия коррозионно-агрессивной среды на материал стальных оцинкованных тросов без применения и с применением ингибиторов коррозии.

Объект испытания:
Оцинкованные стальные тросы изготовленные по ГОСТ 3068

Выдержка в среде А по NACE TM0177 насыщенную сероводородом





Исследование образцов

Оценка воздействия коррозионно-агрессивной среды на материал стальных оцинкованных тросов без применения и с применением ингибиторов коррозии.

Характерный внешний вид образца после выдержки в среде (120 ч.)

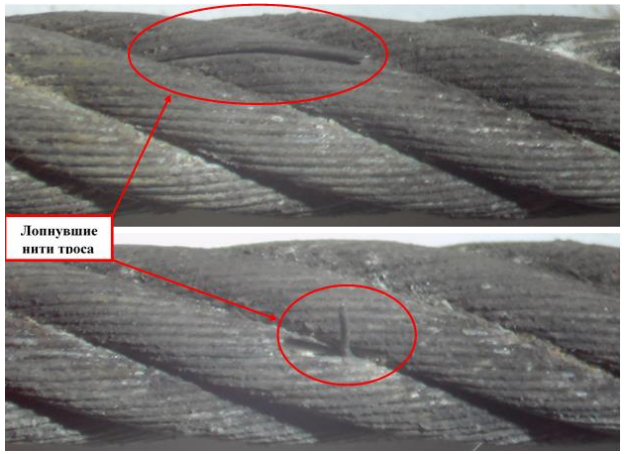


Характерный внешний вид образца после выдержки в среде (310 ч.)



Определение разрывного усилия тросов

Условия проведения испытания	Значения нагрузки на разрыв, Н
В исходном состоянии.	32440
После выдержки в среде 120ч.	32367
После выдержки в среде 310ч.	33040



Оценка воздействия коррозионно-агрессивной среды на материал стальных оцинкованных тросов без применения и с применением ингибиторов коррозии.

Характерный внешний вид образца после выдержки в среде (310 ч.) без ингибитора коррозии



Характерный внешний вид образца после выдержки в среде (310 ч.) покрытый ингибитором коррозии



Испытания на стойкость к СКРН при последовательной выдержке в модельных коррозионных условиях

Модель воздействия раствора ГРП Модель, приближенная к реальным условиям	Модель эксплуатации на начальном этапе	Модель дальнейшей эксплуатации Наиболее агрессивные условия
Дист. вода + HCl до pH 2, T = 50 °C, напряжения 660 МПа, 24 часа.	Дист. вода + 1 бар H_2S + HCl до pH 4, T = 75°C, напряжения 660 МПа, 336 часов.	NACE раствор А (5% NaCl, CH_3COOH, 1 бар H_2S), T = 25 °C, напряжения 660 МПа, 720 часов.
1-ая установка	2-ая установка	3-я установка

Вид нагруженных образцов после выдержки во 2-ой среде



Внешний вид образцов очищенных от рыхлых продуктов коррозии после выдержки в 3-ей коррозионной среде



Оценка воздействия коррозионно-агрессивной среды на материал магнитных элементов.

Объект испытания:
Магнитные элементы из сплава неодим-железо-бор (НЖБ-45Н3) в намагниченном состоянии

№ магн.	Время выдержки, ч.	Условия проведения испытания
1	8	Первая установка. По 1 магниту в исходном состоянии в ёмкость. Испытательная среда: раствор сероводородсодержащий по NACE TM0177 среда А
2	32	
3	80	
4	120	
5	8	Вторая установка. По 1 магниту со шлифованной стороной в ёмкость. Испытательная среда: раствор сероводородсодержащий по NACE TM0177 среда А
6	32	
7	80	
8	120	

Исходное состояние



После выдержки 120ч.



Шлифованный после выдержки 120ч.

До очистки

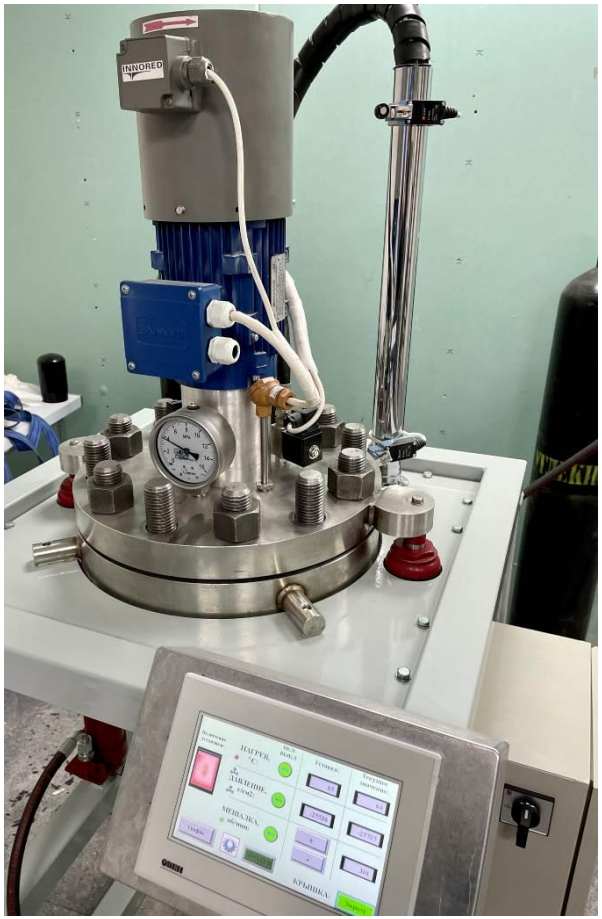


После очистки



Автоклавные испытания моделирующих коррозионную агрессивность в условиях действующего технологического режима работы месторождения

Объект испытания:
Сталь 09Г2С, сталь 12Х18Н10Т/AISI 321, Сплав Д16



Комплекс испытаний

Оценка скорости общей коррозии гравиметрическим методом по ГОСТ 9.908 в мм/год.

Оценка интенсивности и характера коррозионных поражений осуществляется:

- по виду поверхности образцов после испытаний с использованием оптической и растровой электронной микроскопии, и микроанализа (выборочно);
- по виду металлографических шлифов (сечений) с использованием оптической и растровой электронной микроскопии (выборочно и при наличии коррозионных поражений);
- по фазовому составу продуктов коррозии с использованием рентгеноструктурного анализа (выборочно).

Автоклавные испытания моделирующих коррозионную агрессивность в условиях действующего технологического режима работы месторождения

Материал	Среда: 150 г/л $CaCl_2$ + 150г/л NaCl, P_{CO2} =0,05 МПа, $P_{общ}$ = 2 МПа, 900 об/сек				Среда: 150 г/л $CaCl_2$+ 150г/л NaCl, P_{CO2} =0,05 МПа, $P_{общ}$ = 2 МПа, 900 об/сек с добавлением мех. примесей	Среда: 150 г/л $CaCl_2$+150г/л NaCl+10мг/л Na_2S, P_{CO2} =0,05 МПа, $P_{общ}$ = 2 МПа, 900 об/сек	Среда: 150 г/л $CaCl_2$+150г/л NaCl+19нг/л $HgCl_2$, P_{CO2} =0,05 МПа, $P_{общ}$ = 2 МПа, 900 об/сек	Хлоридное растрески-вание, ASTM G36 ($MgCl_2$)	Питтинговая коррозия ASTM G48 ($FeCl_3$)
	40°C		150°C		40°C	40°C	40°C		65
	24 ч.	100 ч.	24 ч.	100 ч.	24 ч.	24 ч.	24 ч.	72ч	72 ч
09Г2С	**0,50**	**0,78**	**1,03**	**0,55**	**0,91**	**0,76**	**0,53**	**-**	**-**
12Х18Н10Т/ AISI 321	**0,02**	**0,02**	**0,02**	**0,01**	**0,02**	**0,05**	**0,03**	**0,20**	**56,35**
Сплав Д16	**0,11**	**0,06**	**5,82**	**4,30**	**0,13**	**0,12**	**0,13**	**6,27**	**Полное разрушение**

09Г2С

40°C



150°C



Сплав Д16

40°C



150°C

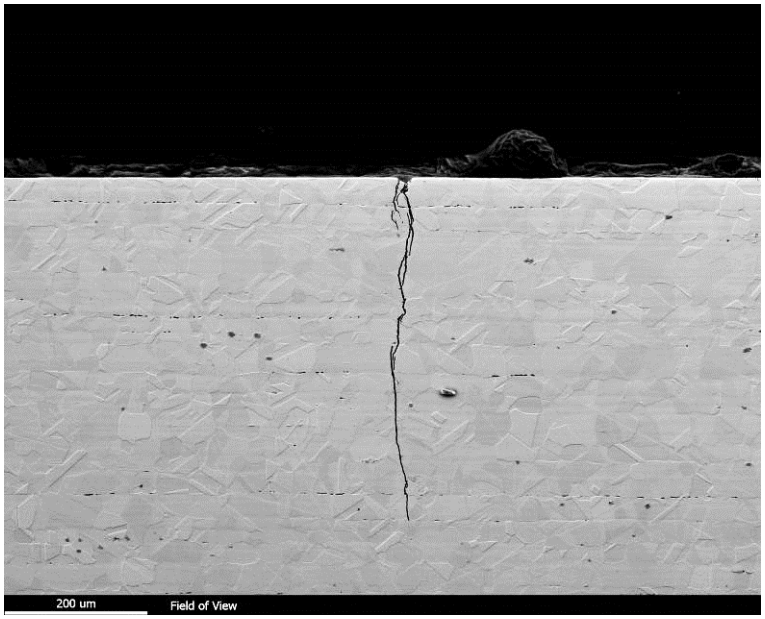


Автоклавные испытания моделирующих коррозионную агрессивность в условиях действующего технологического режима работы месторождения

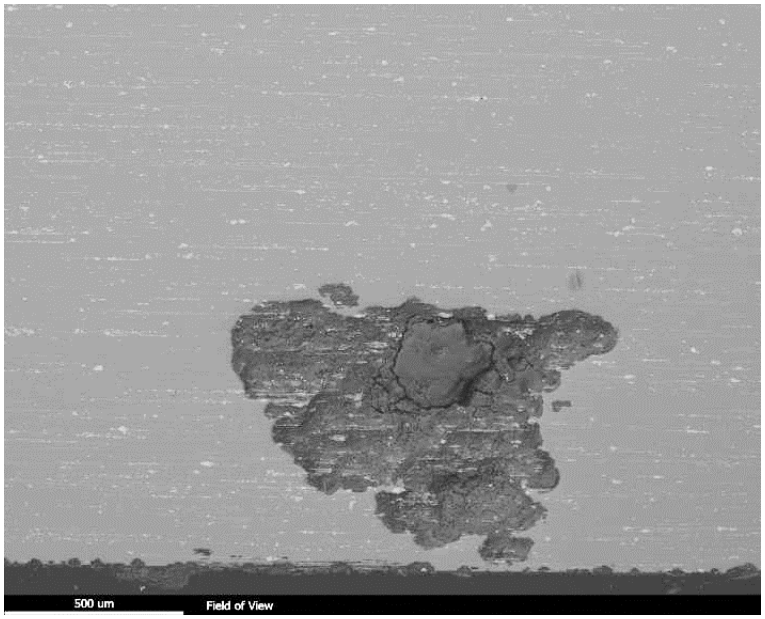
Хлоридное растрескивание, ASTM G36 (MgCl2)

Среда:	Марка стали	T°C	Время экспозиции, ч	Скорость коррозии, мм/год
раствор $MgCl_2 6H_2O$	12Х18Н10Т/AISI 321	155	72	**0,20**
	Д16			**6,27**

12Х18Н10Т/AISI 321



Д16



Ермошкин Антон Александрович

+ 7 927 791 84 52

ermoshkin@its-samara.com

ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Коррозионно-механическое разрушение низкоуглеродистого бейнита.

Выбойщик М.А.
vma63vma@yandex.ru

г. Тольятти
2023

Введение.

Высокие значения прочности и пластичности трубных сталей обеспечивает использование бейнитных структур.

Сопротивление бейнитных структур коррозионно механическому разрушению практически не изучено.

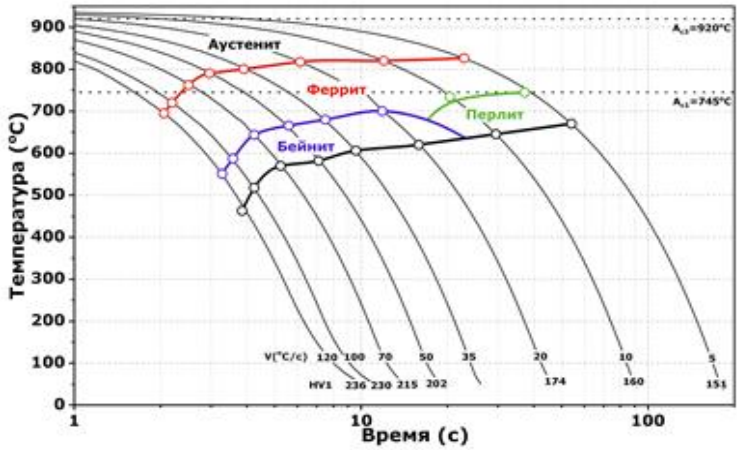
Исследование кинетики разрушения низкоуглеродистых низколегированных сталей в агрессивных нефтепромысловых средах является актуальной задачей.

Цель работы: получить представления о трансформации структурного состояния и изменении коррозионной стойкости и механических свойств реечного бескарбидного бейнита с ростом температуры отпуска.

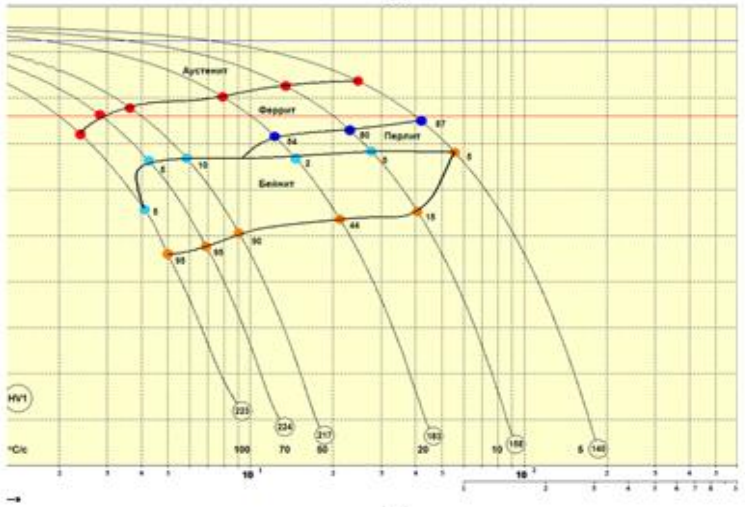
Химический состав исследуемых сталей.

Марка стали	Массовая доля элементов, %											
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Nb	V	Mo	Al	S	P
08ХФА	0,09	0,20	0,44	0,52	0,12	0,11	0,02	0,088	0,003	0,034	0,002	0,011
08ХМФА	0,05	0,39	0,39	0,70	0,10	0,17	0,011	0,061	0,19	0,057	0,004	0,003
05ХГБ	0,05	0,22	0,71	0,61	0,08	0,18	0,029	0,003	0,01	0,013	0,001	0,006

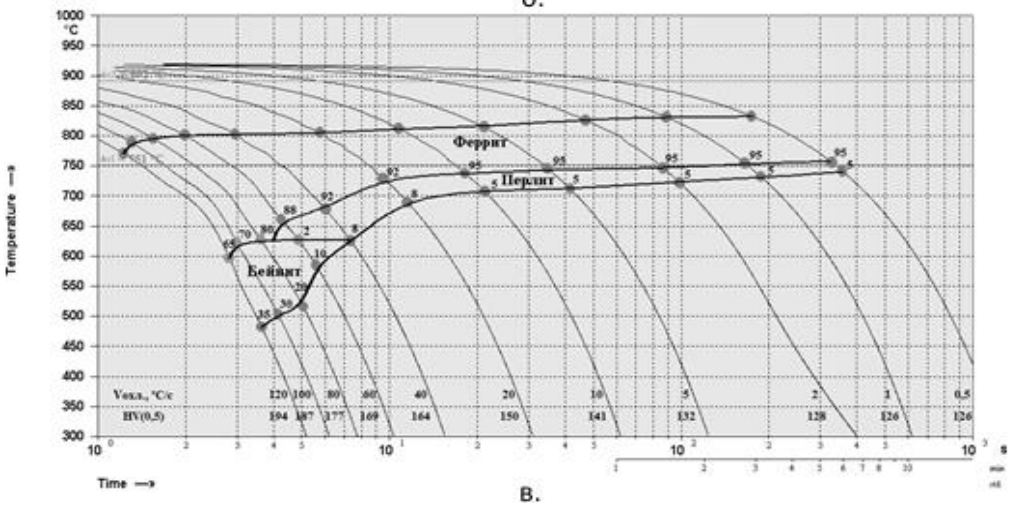
Термокинетические диаграммы распада переохлаждённого аустенита исследуемых сталей: а-сталь 08ХФА; б-сталь 08ХМФА; в-сталь 05ХГБ



а.

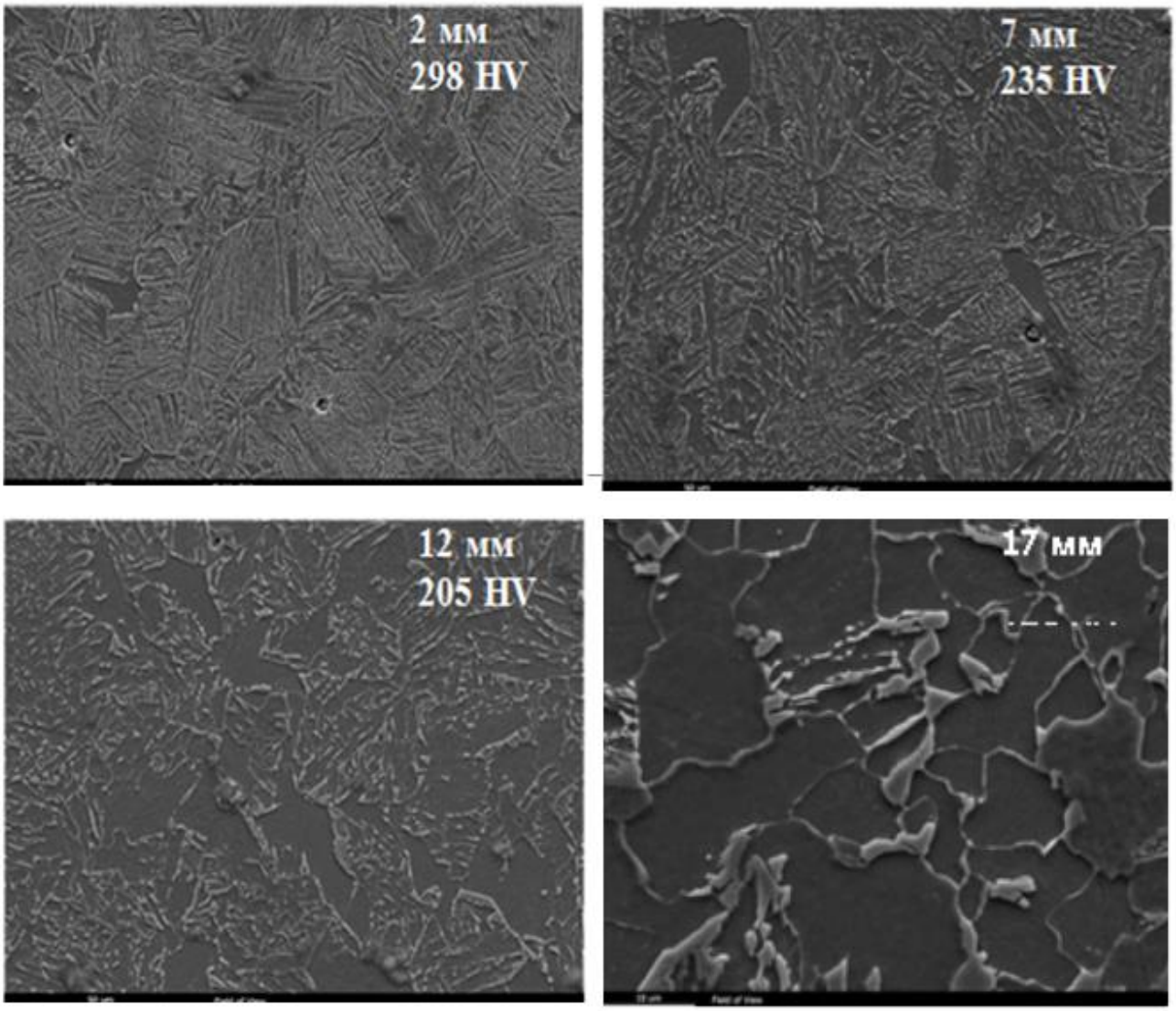


б.

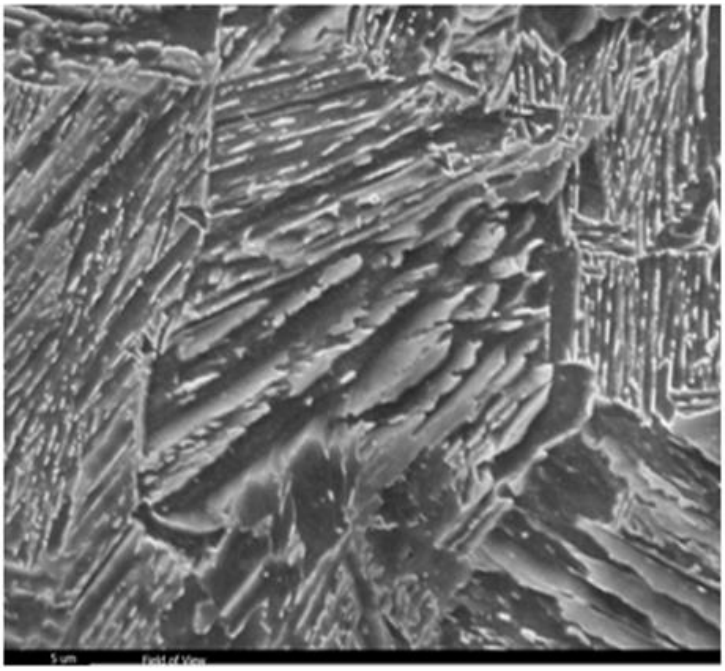


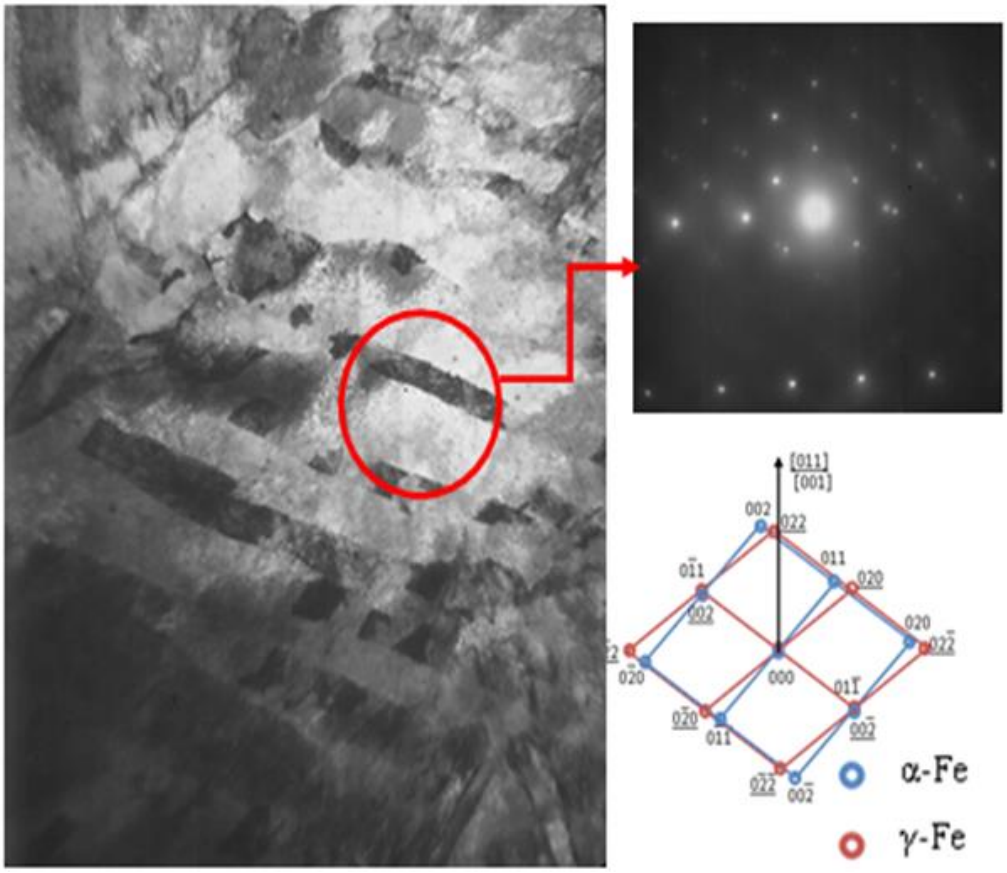
в.

Изменение структуры исследуемых стали 08ХМФА при торцевой закалке.

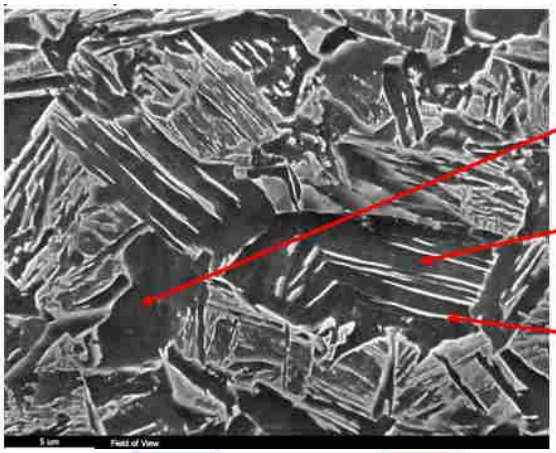


Микроструктура стали 08ХМФА после закалки:
а – СЭМ; б - ПЭМ; в- микродифракция.

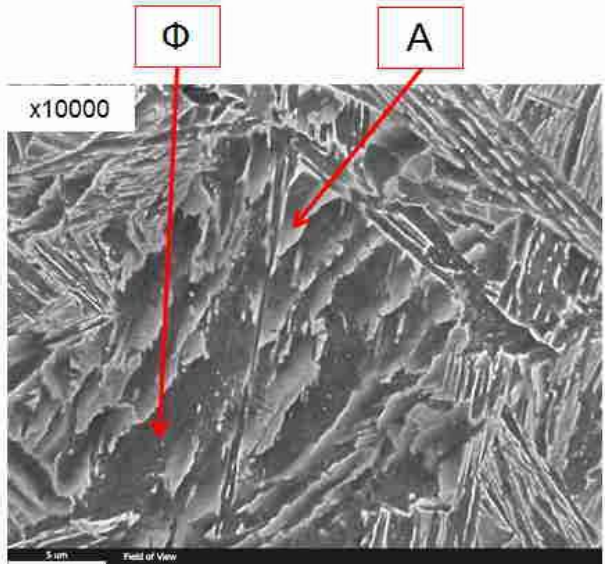




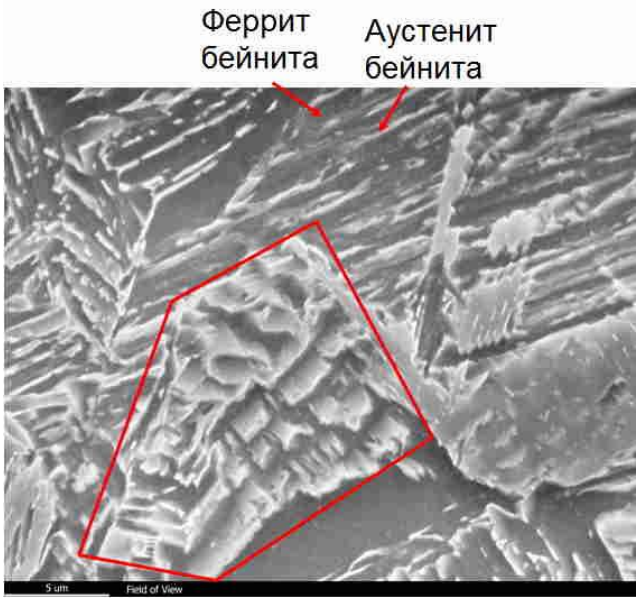
Микроструктура после закалки в воду (СЭМ)



сталь 08ХФА

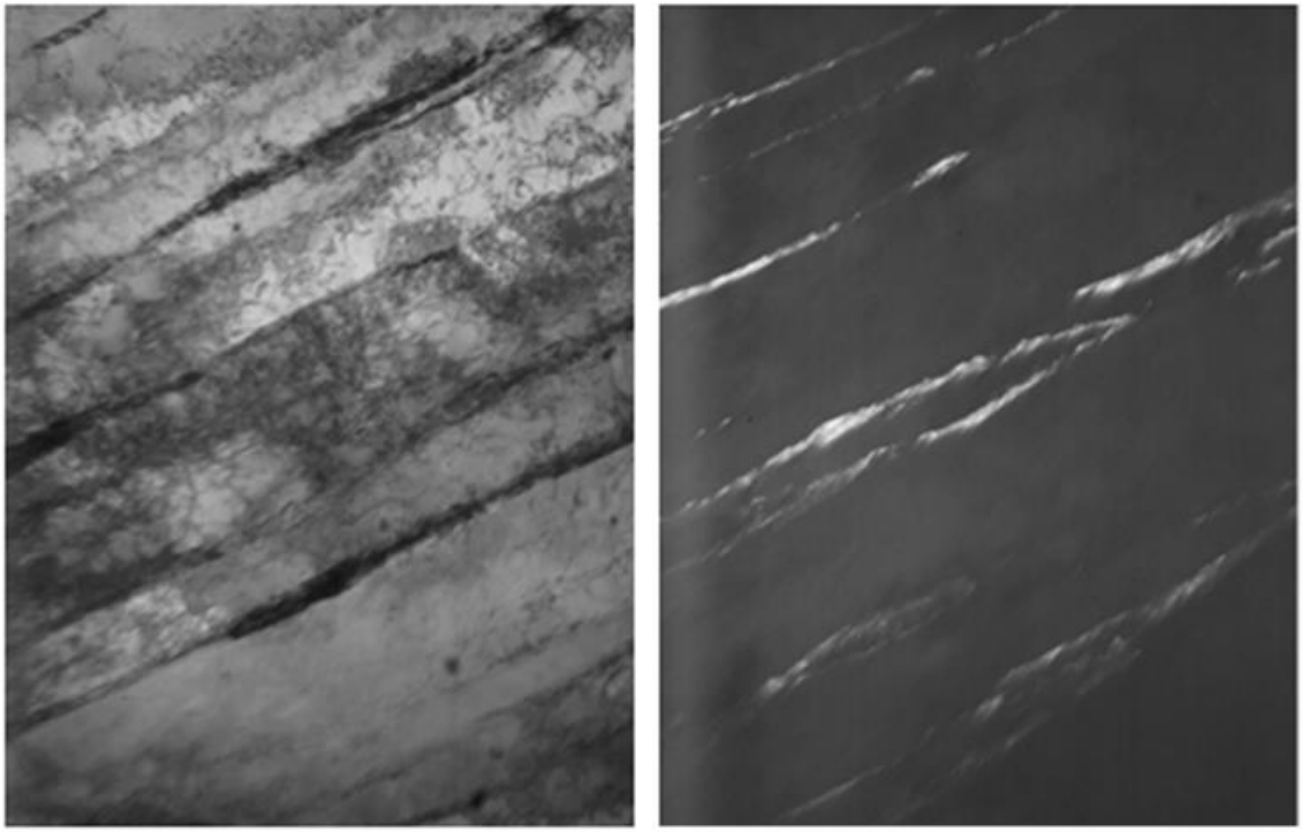


сталь 08ХМФА



сталь 05ХГБ

Микроструктура стали 05ХГБ после закалки в воду с 920 ˚С (ПЭМ):
а - светлопольное изображение;
б - темнопольное изображение;

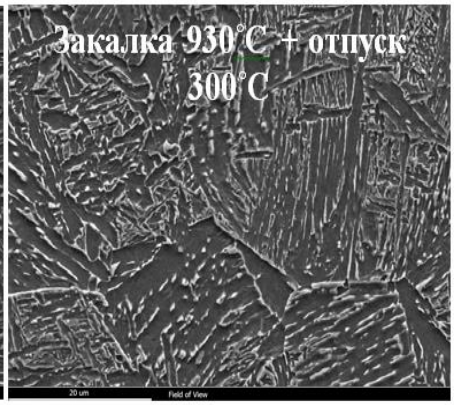


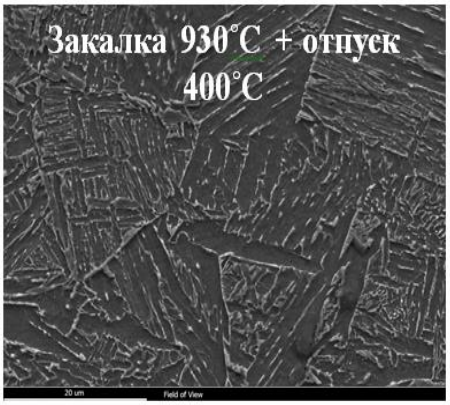
а) х 18000

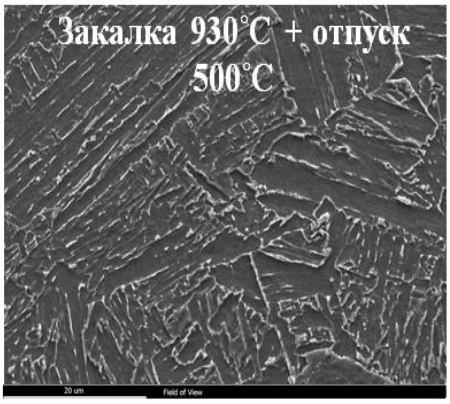
б) х 18000

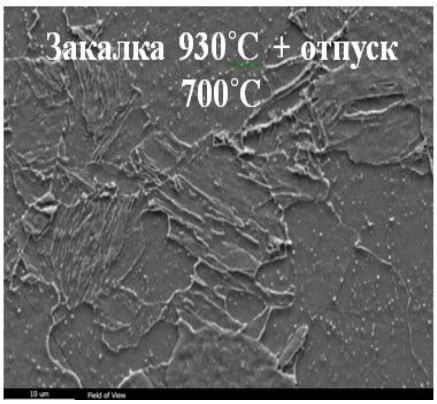
Изменение структуры стали с ростом температуры отпуска (СЭМ).











Изменение структуры стали 08ХМФА с ростом температуры отпуска (ПЭМ): а- отпуск 300^{0}С; Б- отпуск 400^{0}С; аВ- отпуск 500^{0}С; Г- отпуск 600^{0}С.



x15000

а.



x9000

б.



x13000

в.



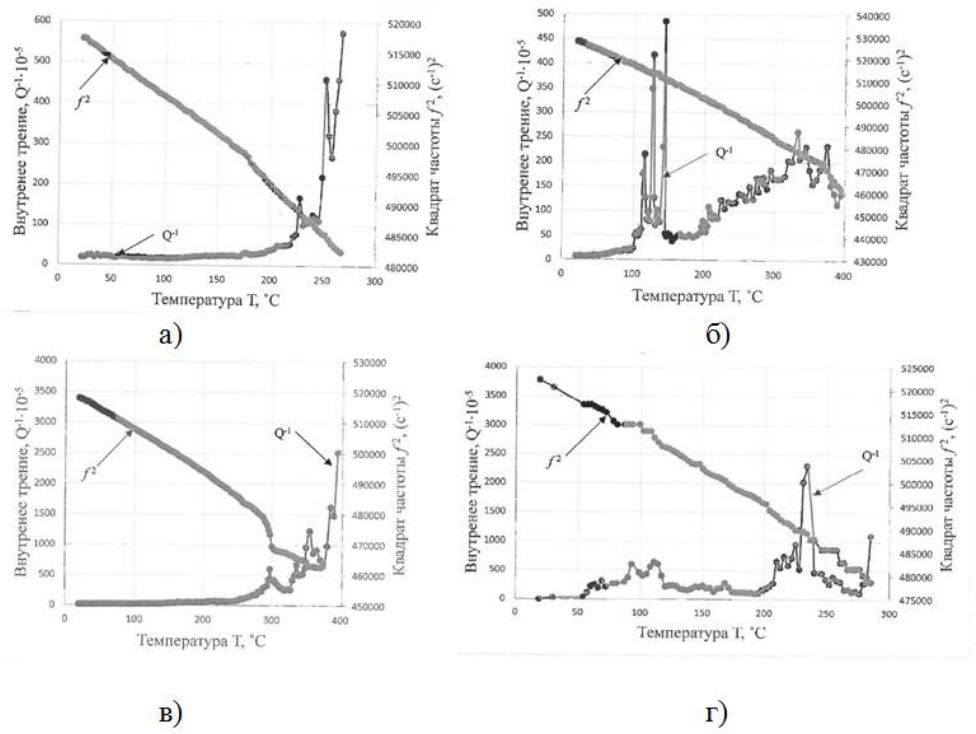
x18000

г.

Изменение механических свойств, остаточных напряжений и плотности дислокаций сталей 08ХФА, 08ХМФА, 05ХГБ с ростом температуры отпуска.

Марка стали	Режим термообработки	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	KCV -50 Дж/см^2	Остаточн. напр. 3-го рода, МПа	Плотность дисл., $\rho*10^{14}$, м$^{-2}$
08ХФА	Закалка 930˚С	830	740	22,0	230 (100%)	300	5,1
	930˚С + отпуск 200˚С	820	710	19,0	240 (100%)	225	4,4
	930˚С + отпуск 300˚С	810	730	17,5	240 (100%)	220	4,1
	930˚С + отпуск 400˚С	785	690	18,0	252 (100%)	140	5,1
	930˚С + отпуск 500˚С	710	645	18,5	260 (100%)	91	4,7
	930˚С + отпуск 600˚С	680	605	22,0	260 (100%)	71	5,2
	930˚С + отпуск 700˚С	615	535	25,0	-	64	2,8
08ХМФА	Закалка 930˚С	775	700	19,5	180 (80%)	190	4,0
	930˚С + отпуск 200˚С	780	650	19,0	215 (100%)	200	4,7
	930˚С + отпуск 300˚С	785	660	18,0	200 (100%)	180	4,5
	930˚С + отпуск 400˚С	760	650	19,5	215 (100%)	120	4,2
	930˚С + отпуск 500˚С	710	635	20,0	235 (100%)	-	-
	930˚С + отпуск 600˚С	685	605	21,5	250 (100%)	86	3,4
	930˚С + отпуск 700˚С	590	520	23,5	270 (100%)	63	3,6
05ХГБ	Закалка 920˚С	605	490	29,0	290 (100%)	570	5,4
	920˚С + отпуск 200˚С	-	-	-	-	-	-
	920˚С + отпуск 300˚С	590	500	29,0	315 (100%)	460	4,9
	920˚С + отпуск 400˚С	560	470	27,0	330 (100%)	215	4,7
	920˚С + отпуск 500˚С	530	430	28,0	314 (100%)	90	4,5
	920˚С + отпуск 600˚С	510	420	27,0	325 (100%)	45	4,0
	920˚С + отпуск 700˚С	-	-	-	-	-	-
Группа прочности К52		510÷ 630	≥353	≥20	≥58,8	-	-

Температурные зависимости внутреннего трения и квадрата резонансной частоты стали 08ХФА после закалки и отпуска : а – закалка 920˚С, б – закалка + отпуск 200˚С, в – закалка + отпуск 400˚С, г – закалка + отпуск 600˚С



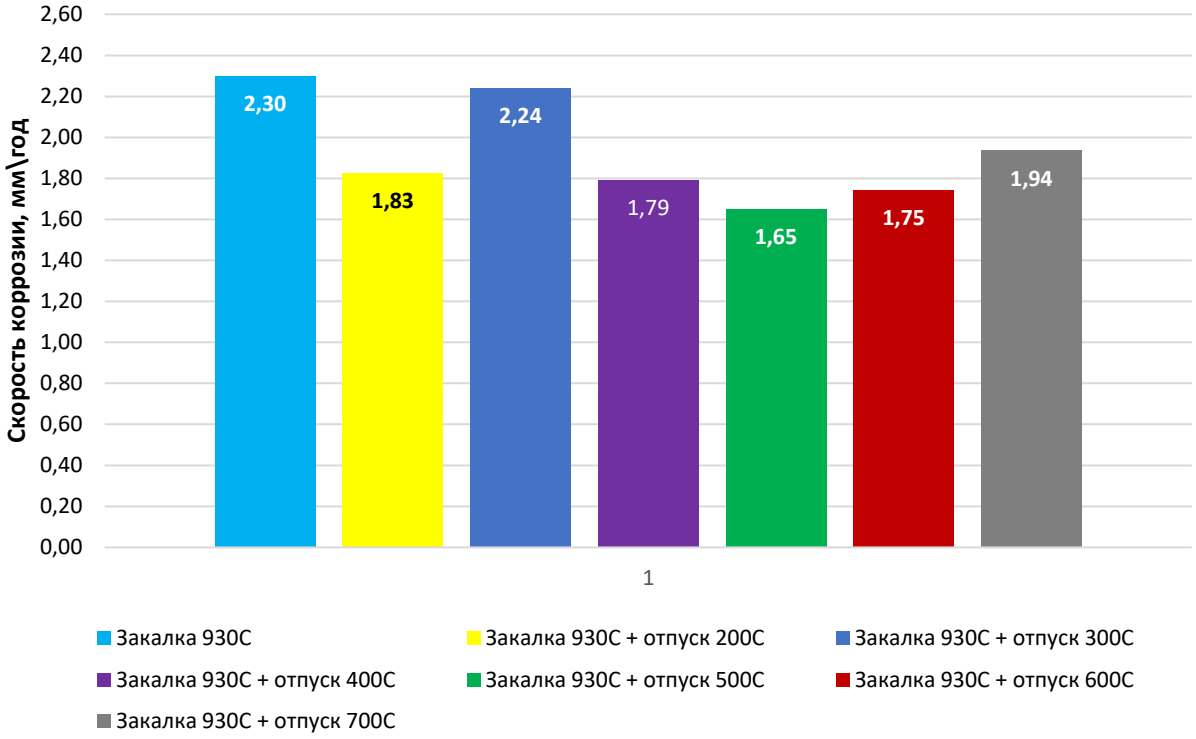
№	Режим термообработки	Распределение углерода		
		В объеме		На дислокациях
		Высота макс. Снука, $Q^{-1}max\cdot10^{-5}$	Концентрация углерода, весс, %	Высота макс. Снука-Кестера, $Q^{-1}max\cdot10^{-5}$
1	Закалка 930˚С	-	<0,003	350
2	Закалка 930˚С + отпуск 200˚С	420	0,017	150
3	Закалка 930˚С + отпуск 300˚С	-	<0,003	500
4	Закалка 930˚С + отпуск 400˚С	-	<0,003	-
5	Закалка 930˚С + отпуск 500˚С	-	<0,003	200
6	Закалка 930˚С + отпуск 600˚С	292	0,0117	1500
7	Закалка 930˚С + отпуск 700˚С	-	-	-
8	Нормализация 940˚С	-	-	-

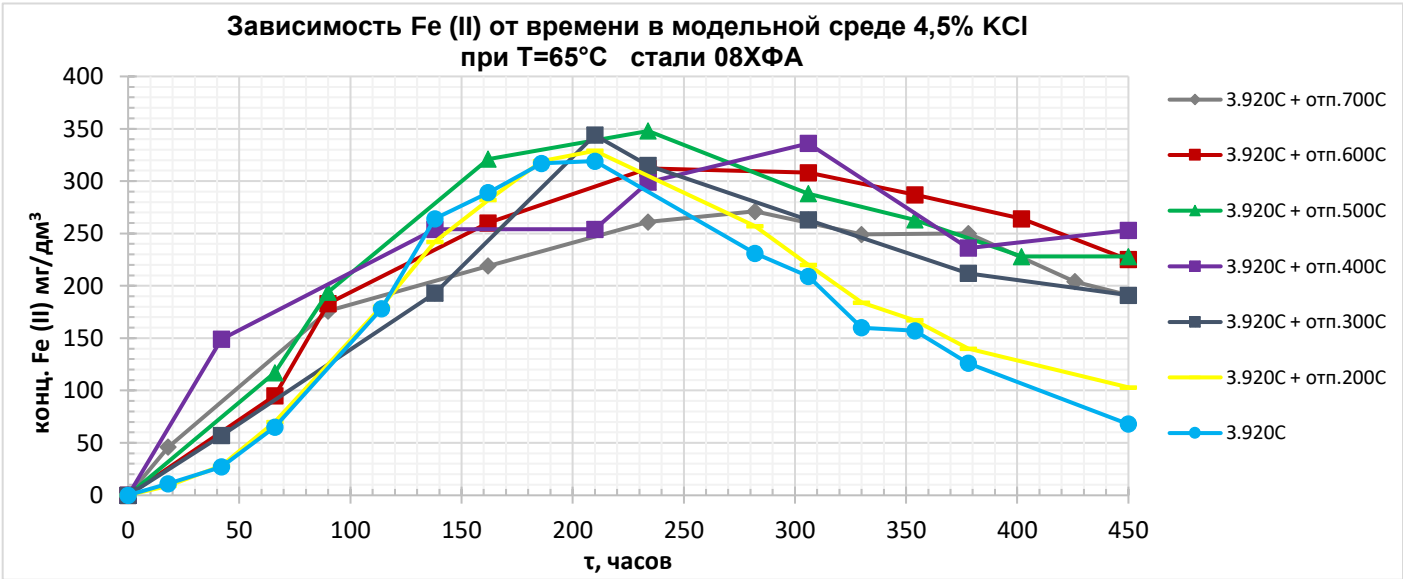
Изменение распределения углерода в стали 08ХФА с ростом температуры отпуска.

Изменение коррозионной стойкости сталей 08ХФА, 08ХМФА, 05ХГБ с ростом температуры отпуска.

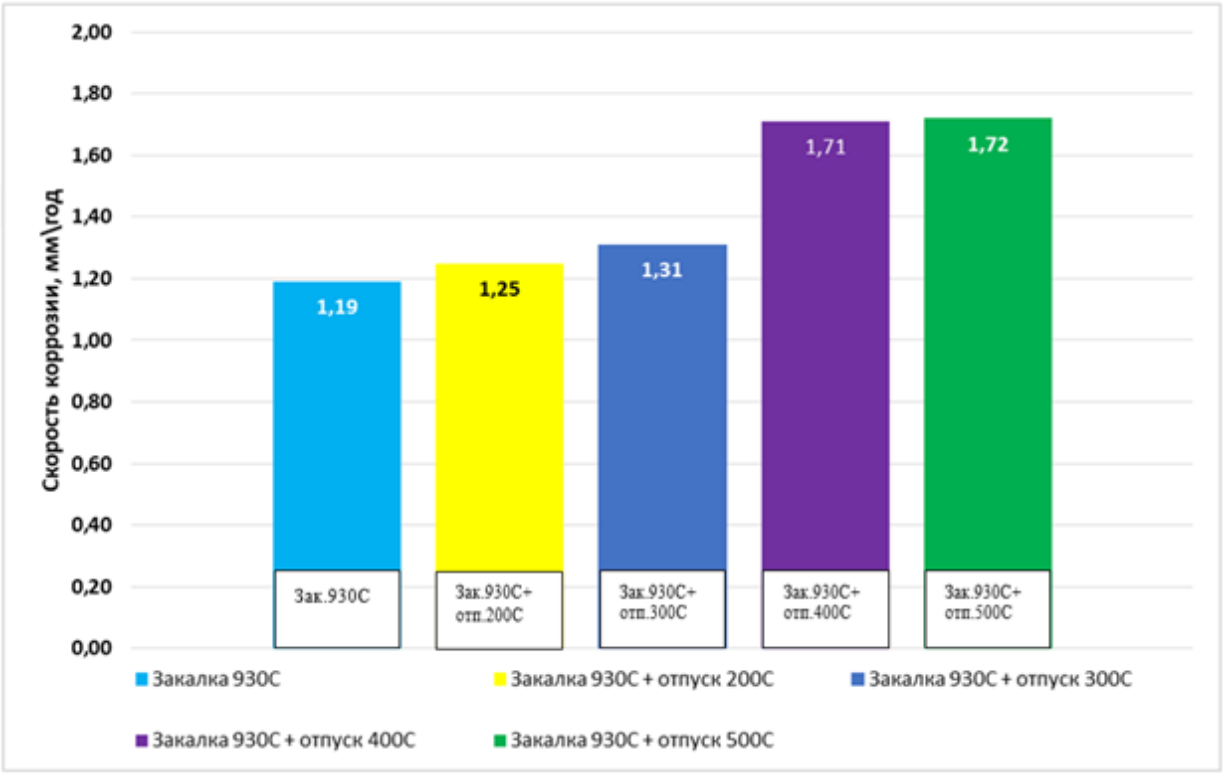
Марка стали	Режим термообработки	ВР		СКРН		V_{CO_2} мм/год
		CLR, %	CTR, %	σ_{th} от σ_τ, %	K1SSC, МПа/м$^{1/2}$	
08ХФА	Закалка 930˚С	0	0	75	-	2,3
	Закалка 930˚С + отпуск 200˚С	0	0	75	-	1,8
	Закалка 930˚С + отпуск 300˚С	0	0	75	30,6	2,25
	Закалка 930˚С + отпуск 400˚С	0	0	75	31,0	1,8
	Закалка 930˚С + отпуск 500˚С	0	0	75	56,9	1,65
	Закалка 930˚С + отпуск 600˚С	0	0	75	58,4	1,75
	Закалка 930˚С + отпуск 700˚С	0	0	75	61,8	1,9
08ХМФА	Закалка 930˚С	0	0	75	-	1,2
	Закалка 930˚С + отпуск 200˚С	0	0	75	-	1,25
	Закалка 930˚С + отпуск 300˚С	0	0	75	-	1,3
	Закалка 930˚С + отпуск 400˚С	0	0	75	-	1,6
	Закалка 930˚С + отпуск 500˚С	0	0	75	-	1,7
	Закалка 930˚С + отпуск 600˚С	0	0	75	-	1,4
	Закалка 930˚С + отпуск 700˚С	0	0	75	-	1,4
05ХГБ	Закалка 930˚С	0	0	70	-	2,07
	Закалка 930˚С + отпуск 200˚С	-	-	-	-	-
	Закалка 930˚С + отпуск 300˚С	0	0	70	-	2,07
	Закалка 930˚С + отпуск 400˚С	0	0	70	-	1,93
	Закалка 930˚С + отпуск 500˚С	0	0	70	-	1,93
	Закалка 930˚С + отпуск 600˚С	0	0	70	-	1,40
	Закалка 930˚С + отпуск 700˚С	-	-	-	-	-

Зависимость коррозионной стойкости стали 08ХФА от температуры отпуска

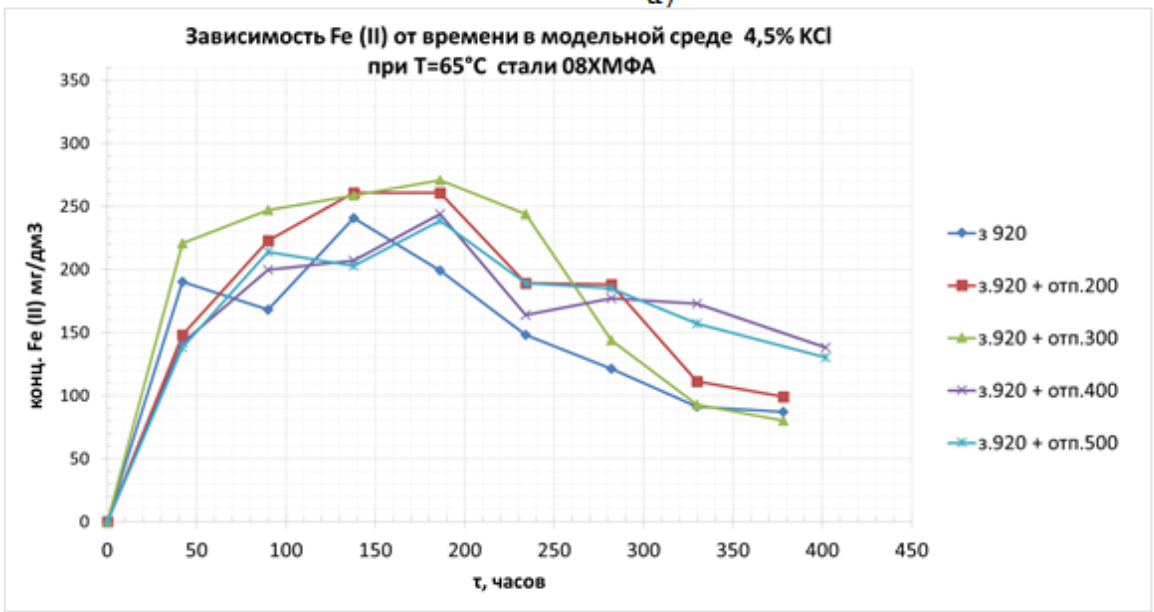




Зависимость скорости коррозии от температуры отпуска Углекислотная коррозия стали 08ХМФА: а –скорость коррозии, б – зависимость концентрации Fe^{+2}, в модельной среде от времени испытаний.



а)

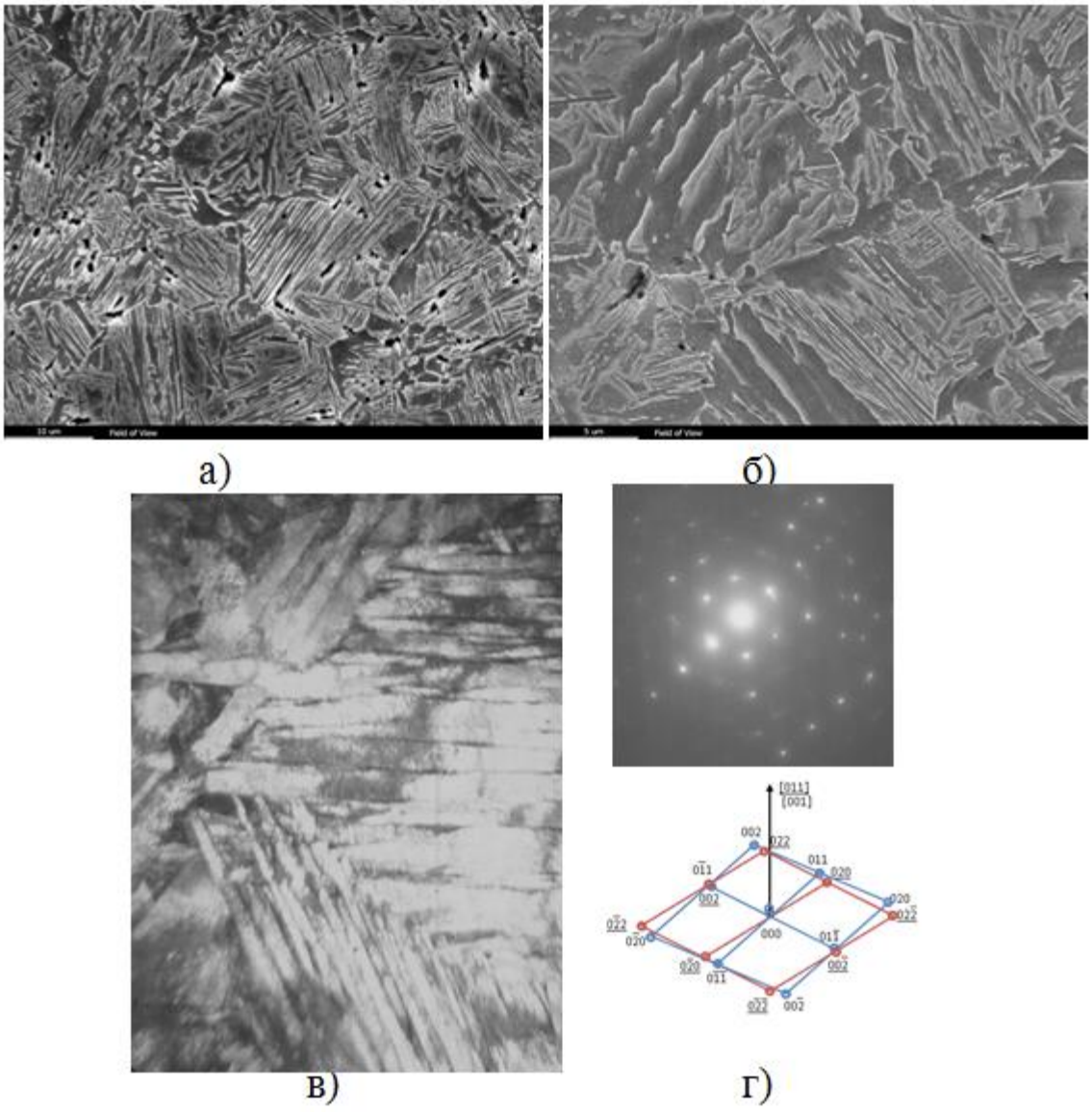


б)

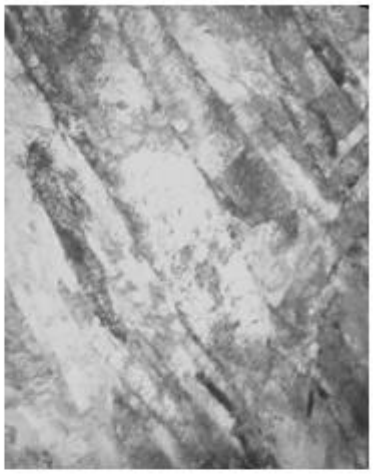
Выводы

1. Распад тонких пластин (прослоек) непревращенного аустенита в структурах реечного бескарбидного бейнита происходит при низком отпуске (200 ˚С).
2. Стойкость к углекислотной коррозии реечного бескарбидного малоуглеродистого бейнита (стали 08ХФА, 08ХМФА и 05ХГБ) мало зависит от температуры отпуска.
3. Закалка и средний отпуск в низкоуглеродистых низколегированных сталях с бейнитной закаливаемостью формируют структурное состояние, обеспечивающее сочетание высоких механических свойств и высокой коррозионной стойкости в нефтепромысловых средах.

Структура стали 08ХФА после закалки с 930˚С в воду. а, б – сканирующая электронная микроскопия; в - электронная микроскопия на просвет (светлопольное изображение, увеличение х11000), г – микродифракция.



Изменение структуры стали 08ХФА в процессе отпуска (электронная микроскопия на просвет).



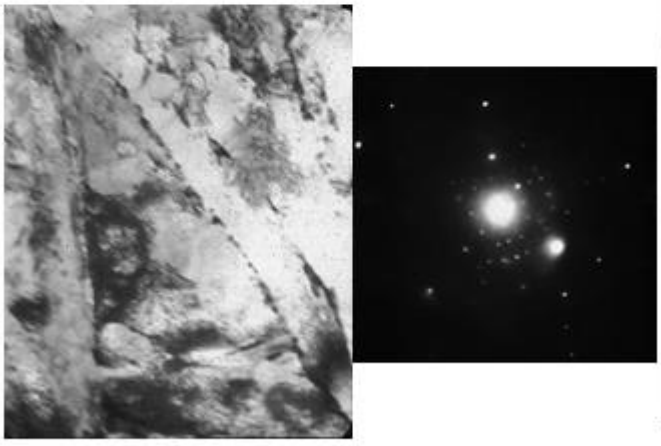
х18000, зак+отп 300^0 С

а)



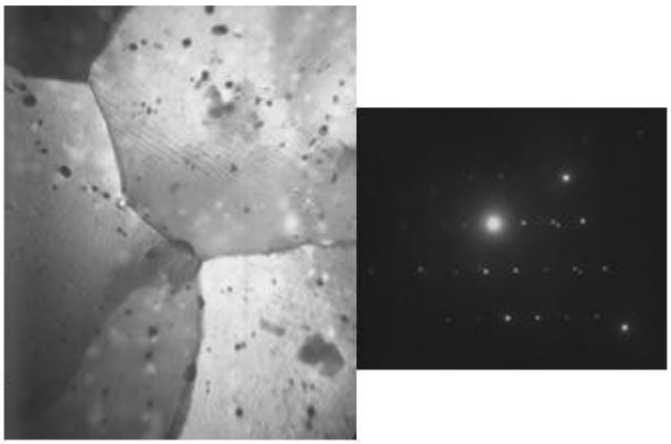
х18000 зак+отп 400^0 С

б)



х24000, зак+отп500^0 С

в)



х8000 зак+отп730^0 С

г)

Трубная Металлургическая Компания

г. Самара, 2023

Результаты опытно-промысловых испытаний нефтегазопроводных труб класса прочности К52 производства ПАО «ТМК» на Большетирском месторождении ООО «ИНК»

Колесников В.В.

Зам. директора по техническим продажам НГПТ

г. Самара,2023

Цель работы в рамках программы технологического партнерства ТМК/ИНК

Освоение производства НГПТ из стали 12ХГБА класса прочности К52 для обустройства месторождений ООО «ИНК».

Оценка эффективности применения НГПТ из стали 12ХГБА на Большетирском месторождении ООО «ИНК».

Материал исследования

Марка стали	Массовая доля элементов, %								Сэкв
	C	Mn	Si	P	S	Cr	V	Nb	
12ХГБА	0,13	0,64	0,21	0,010	0,004	0,70	-	0,027	0,40
13ХФА	0,14	0,52	0,23	0,006	0,002	0,54	0,045	-	0,37
Требования ЕТТ ООО «ИНК»	0,11-0,17	0,45-0,65	0,17-0,40	≤0,015	≤0,005	0,50-0,70	0,04-0,09	-	≤0,43

Механические свойства НГПТ размером 114×8 мм из сталей 12ХГБА и 13ХФА

Сталь	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	$\frac{\sigma_т}{\sigma_в}$	HV10	KCU $^{-60°C}$ Дж/см^2	KCV$^{-20\ °C}$, Дж/см^2	ДВС$^{-20\ °C}$, %	KCV $^{-50\ °C}$, Дж/см^2	ДВС $^{-50\ °C}$, %
12ХГБА	453 494	532 555	24 23	0,85 0,89	205 209	303 313	254 265	100 100	241 234	**92** **90**
13ХФА	520 494	582 569	25 26	0,89 0,87	215 213	269 282	252 258	100 100	238 237	**93** **92**
Требования ЕТТ ООО «ИНК»										
К52	**415-565**	**520-760**	**≥ 20**	**≤ 0,93**	**≤ 250**	**≥ 45**	**≥ 65**	**≥ 50**	**≥ 50**	**≥ 50**

Коррозионные свойства НГПТ из сталей 12ХГБА и 13ХФА

Сталь	NACE TM0177 (Метод А)			ASTM G39		Скорость общей коррозии			
						Среда CO_2		Среда H_2S	
	Нагрузка, МПа	Наличие трещин	Выдержал, часов	Нагрузка, МПа	Наличие трещин	-	среднее	-	среднее
12ХГБА	80 % от $\sigma_{т\ min}$	нет	720	80 % от $\sigma_{т\ min}$	нет	0,09 0,10 0,09	0,09	0,30 0,28 0,26	0,28
13ХФА	72% от $\sigma_{т\ min}$	нет	720	72% от $\sigma_{т\ min}$	нет	0,15 0,16 0,16	0,16	0,37 0,37 0,36	0,37
Требования ЕТТ ООО «ИНК»			**более 720 при 72%**	**отсутствие трещин**		**не требуется**			**не требуется**

Опытно-промысловые испытания



«СОГЛАСОВАНО»
Заместитель главного инженера – директор департамента добычи нефти и газа
ООО «ИНК»
_____ Р.М. Салихов
«__» _____ 20__г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Главный инженер ООО «ИНК»
_____ А.М. Усков
«__» _____ 20__г.

«СОГЛАСОВАНО»
Директор департамента эксплуатации трубопроводов ООО «ИНК»
_____ Г.Л. Макеенков
«__» _____ 20__г.

«СОГЛАСОВАНО»
Директор по техническим продажам и сопровождению продукции в РФ
ПАО «ТМК»
_____ А.П. Медведев
«__» _____ 2019 г.

ПРОГРАММА
ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ
образцов нефтегазопроводных труб (изготовленных по ТУ 14-3р-160-2018) из стали 12ХГБ производства Синарского Трубного Завода ПАО «ТМК» в технологической обвязке нефтесборных трубопроводов площадки КП-4 Большетирского нефтяного месторождения ООО «ИНК»

Разработана программа опытно-промысловых испытаний образцов труб размером 114×8 мм на площадке Большетирского месторождения ООО «ИНК».

Транспортируемая среда характеризуется повышенной агрессивностью, обусловленной высоким содержанием H_2S и CO_2 повышенной минерализацией.

Р общее = 40 кгс/см² (38,712 атм);
P_{H_2S} = 0,2 кгс/см² (0,193 атм);
P_{CO_2} = 0,4 кгс/см² (0,387 атм).

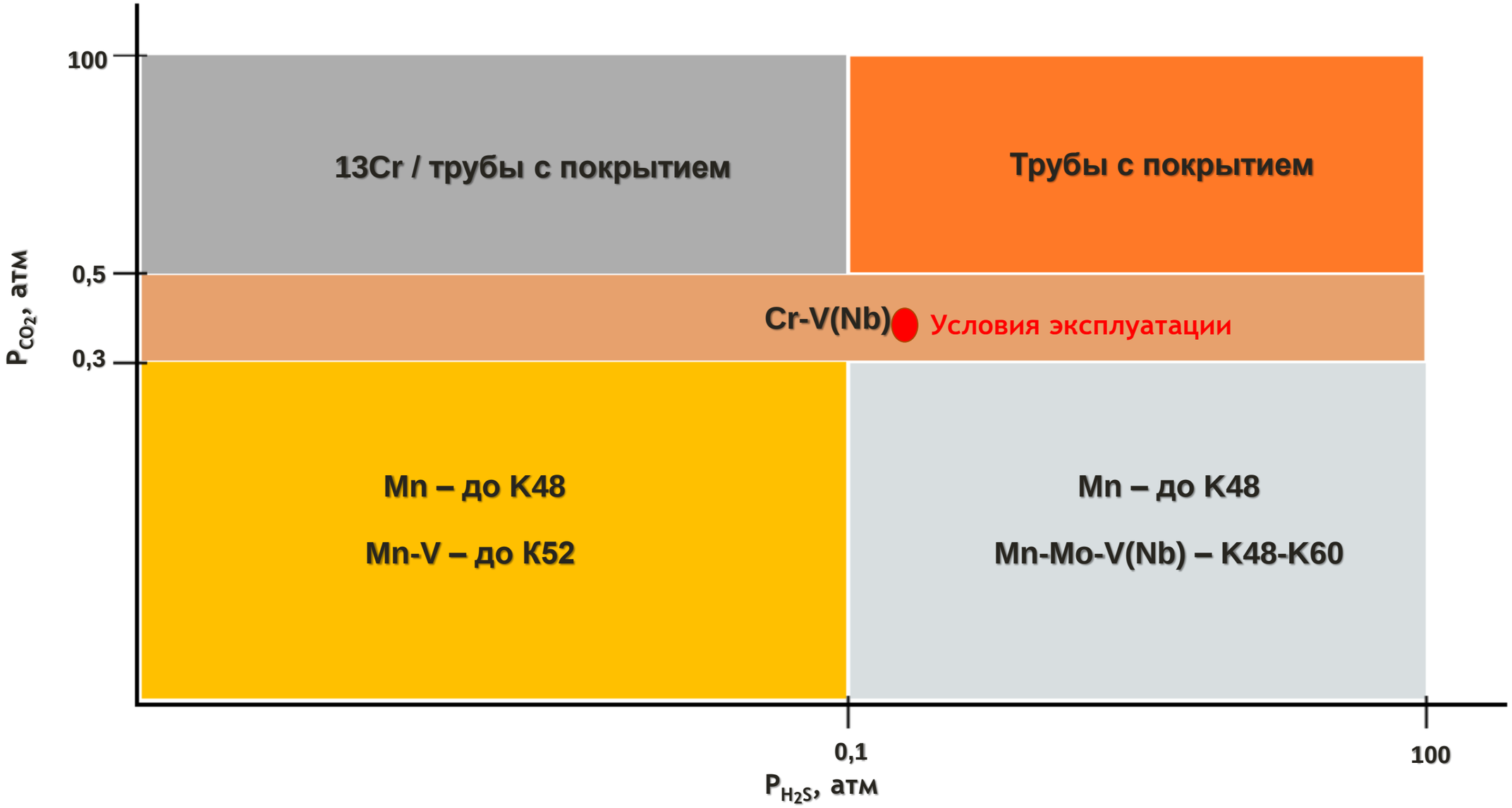
Эксплуатируемая среда по склонности вызвать коррозионное растрескивание относится к зоне 3



Состав пластовой воды Большетирского месторождения

Плотность, кг/м³	pH	Fe, мг/дм³	SO_4, мг/дм³	Br, мг/дм³	Cl, мг/дм³	Ca, мг/дм³	Mg, мг/дм³	HCO_3, мг/дм³	CO_3, мг/дм³	Li, мг/дм³	Na, мг/дм³	K, мг/дм³	Sr, мг/дм³	I, мг/дм³	Общая минерализация, мг/дм³
1320	4	26	14	5062	266795	112439	10854	1682	отс.	188	22170	6531	5345	2	365433

Диаграмма выбора материалов линейных труб (до T≤150°C)



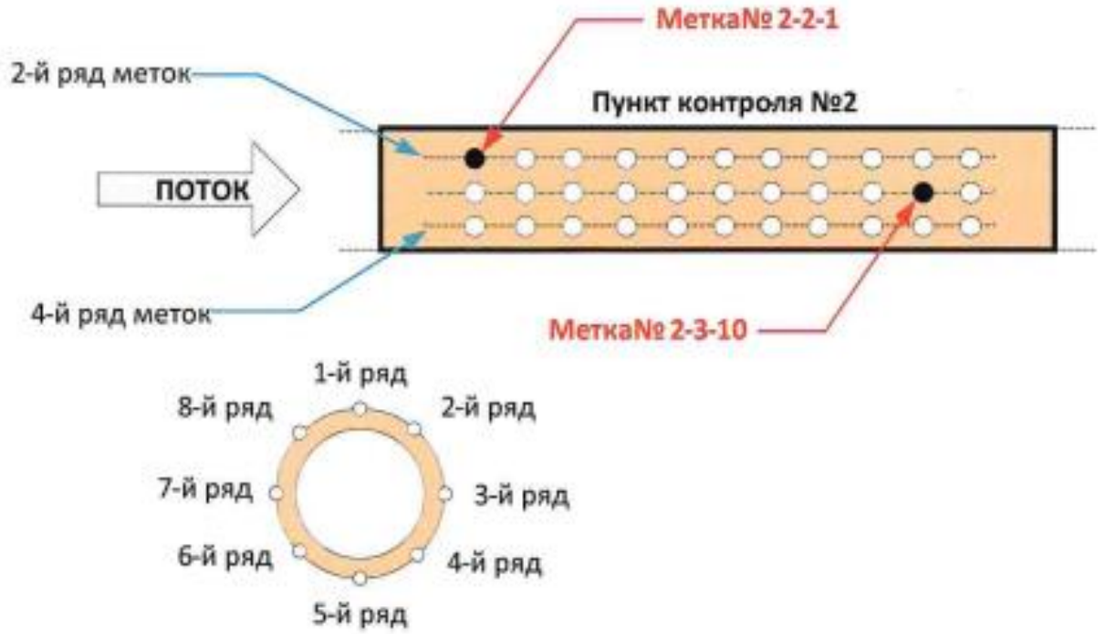
Начало опытно-промысловых испытаний

05.12.2021 произведен монтаж катушек на испытательной площадке Большетирского месторождения с технологической обвязке нефтесбора КП-4.

Срок опытно-промысловых испытаний – 1 год.

Ежемесячно проводился ультразвуковой контроль толщины стенки катушек.





Вид катушек после опытно-промысловых испытаний



12ХГБА

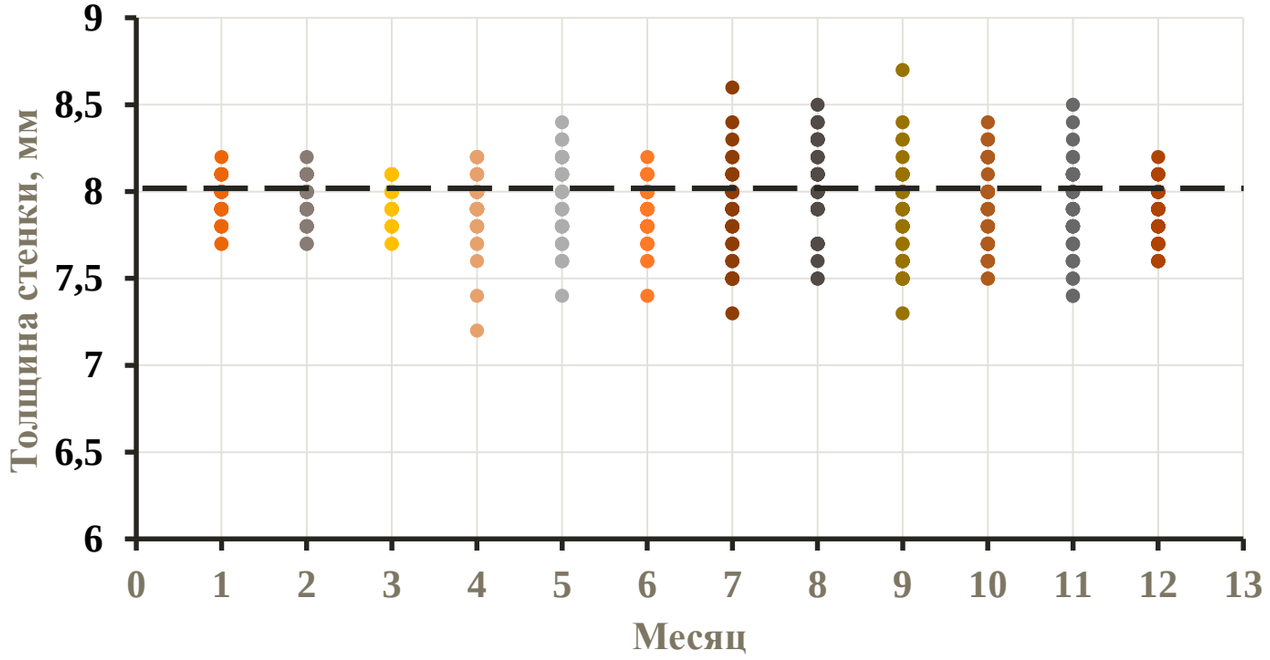


13ХФА

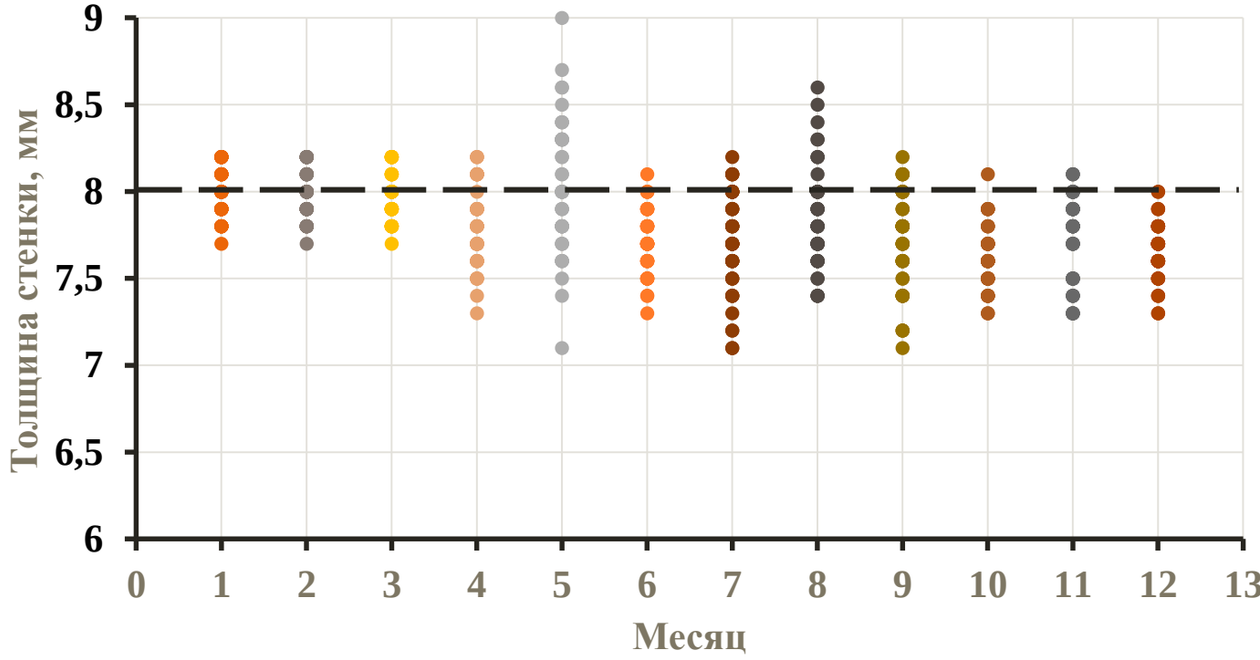


Анализ результатов испытаний труб размером 114×8 мм

12ХГБА



13ХФА

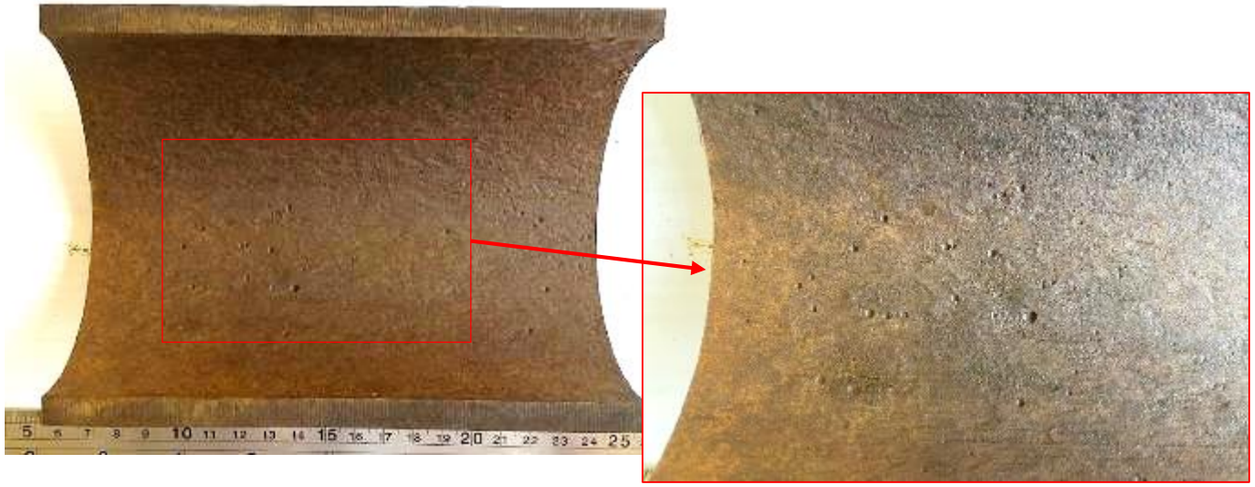


Вид внутренней поверхности труб после удаления продуктов коррозии

12ХГБА нижняя образующая



13ХФА нижняя образующая



12ХГБА верхняя образующая

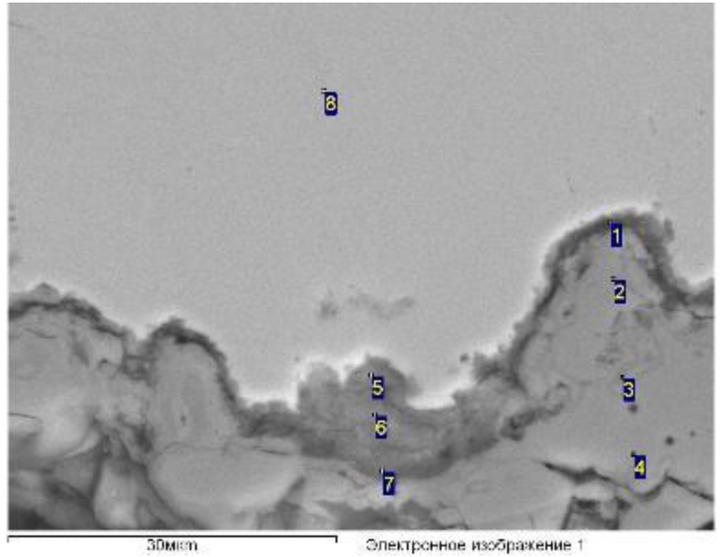


13ХФА верхняя образующая



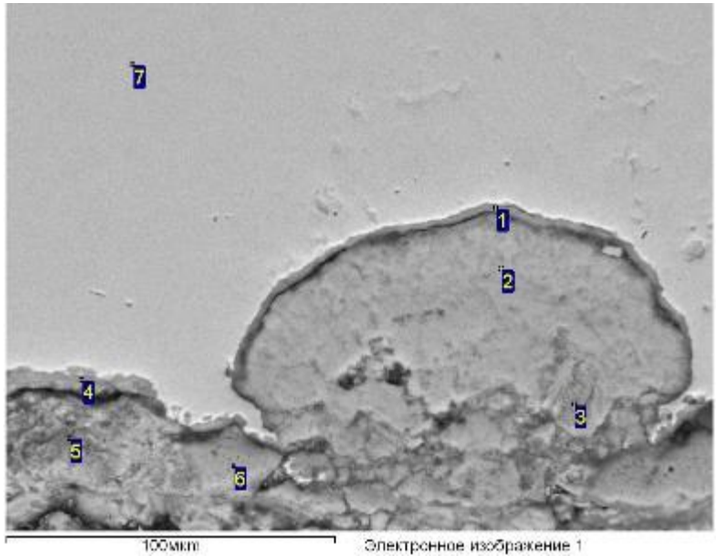
Состав продуктов коррозии на внутренней поверхности труб после опытно-промысловых испытаний

Сталь 12ХГБА



Спектр	Массовая доля элементов, %							
	C	O	Si	S	Cr	Mn	Fe	Итого
1	17.27	13.54	-	-	1.58	0.65	66.96	100.00
2	16.42	24.52	-	-	0.84	0.37	57.85	100.00
3	20.10	23.37	-	-	0.83	0.41	55.29	100.00
4	28.53	21.17	-	-	0.30	0.54	49.46	100.00
5	28.16	3.21	-	4.64	0.61	0.49	62.88	100.00
6	37.65	8.49	0.77	15.10	1.25	0.53	36.22	100.00
7	34.77	10.22	-	12.73	0.81	0.33	41.14	100.00
8	17.98	-	0.44	-	0.55	0.71	80.32	100.00

Сталь 13ХФА



Спектр	Массовая доля элементов, %									
	C	O	Si	S	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Итого
1	6.78	3.00	-	4.95	-	-	0.35	-	84.92	100.00
2	12.28	-	-	26.84	-	-	0.40	-	60.48	100.00
3	15.44	9.82	7.66	15.30	0.37	0.53	0.86	0.90	49.12	100.00
4	17.61	5.44	-	-	-	-	0.72	0.75	75.48	100.00
5	10.69	31.39	0.55	-	-	-	0.52	0,26	56.59	100.00
6	6.47	20.11	0.73	-	-	-	0.60	0,42	71.67	100.00
7	4.78	-	-	-	-	-	0.56	0.54	94.11	100.00

Скорость локальной коррозии после опытно-промысловых испытаний

Марка стали	Место измерения	Диаметр язв, мм	Глубина язв, мм		Скорость локальной коррозии после 365 сут, ОПИ мм/год	
			максимальная	средняя	максимальная	средняя
12ХГБА	Верхняя образующая	3,0	0,30	0,23	0,30	0,23
	Нижняя образующая	2,0	0,27	0,20	0,27	0,20
13ХФА	Верхняя образующая	3,0	0,33	0,25	0,33	0,25
	Нижняя образующая	3,0	0,35	0,27	0,35	0,27

$$V_{лок.кор.} = h \times \tau/365,$$

где h – глубина язвы, мм; τ – срок эксплуатации, сут.

Механические свойства труб после опытно-промысловых испытаний

Сталь	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	$\frac{\sigma_т}{\sigma_в}$	HV_{10}	KCU $^{-60°C}$ Дж/см^2	KCV$^{-20\ °C}$, Дж/см^2	ДВС$^{-20\ °C}$, %	KCV$^{-50\ °C}$, Дж/см^2	ДВС$^{-50\ °C}$, %
12ХГБА	462 471	543 564	24 24	0,85 0,84	209 211	297 301	255 261	100 100	241 239	**92** **90**
13ХФА	493 510	592 589	26 26	0,83 0,87	215 211	289 284	255 251	100 100	235 238	**93** **92**
Требования ЕТТ ООО «ИНК»										
К52	**415-565**	**520-760**	**≥ 20**	**≤ 0,93**	**≤ 250**	**≥ 45**	**≥ 65**	**≥ 50**	**≥ 50**	**≥ 50**

Коррозионные свойства труб после опытно-промысловых испытаний

Сталь	NACE TM0177					ASTM G39		Скорость общей коррозии			
	Метод А			Метод С		Нагрузка, МПа	Наличие трещин	Среда CO_2		Среда H_2S	
	Нагрузка, МПа	Наличие трещин	Выдержал часов	Наличие трещин	Выдержал часов			-	среднее	-	среднее
12ХГБА	80 % от $\sigma_{т\ min}$	нет	720	нет	720	80 % от $\sigma_{т\ min}$	нет	0,08 0,11 0,10	0,10	0,26 0,29 0,27	0,27
13ХФА	80% от $\sigma_{т\ min}$	нет	720	нет	720	80% от $\sigma_{т\ min}$	нет	0,17 0,14 0,16	0,16	0,36 0,36 0,38	0,37
Требования ЕТТ ООО «ИНК»			**более 720 при 72%**	-	**более 720 при 72%**	**Отсутствие трещин**		**не требуется**			**не требуется**

Выводы

1. **Освоено производство нефтегазопроводных труб класса прочности К52 из стали марки 12ХГБА с обеспечением требований к коррозионной стойкости и хладостойкости.**

2. **Успешно завершены опытно-промысловые испытания трубной продукции ТМК: максимальная скорость локальной коррозии испытательной катушки 12ХГБА не выше, чем аналогичный параметр контрольной катушки 13ХФА .**

3. **Трубная продукция из стали 12ХГБА будет рекомендована для эксплуатации на месторождениях ООО «ИНК» при применении ингибиторов коррозии с целью защиты от локальных коррозионных разрушений.**

Спасибо за внимание!

Узнай больше
о компании ТМК

ТМК eTrade
Интернет-магазин труб

Премиальные резьбовые
соединения ТМК UP

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Разработка методики сравнительных испытаний сталей на стойкость к углекислотной коррозии

ООО «ИТ-Сервис», Самарский Университет

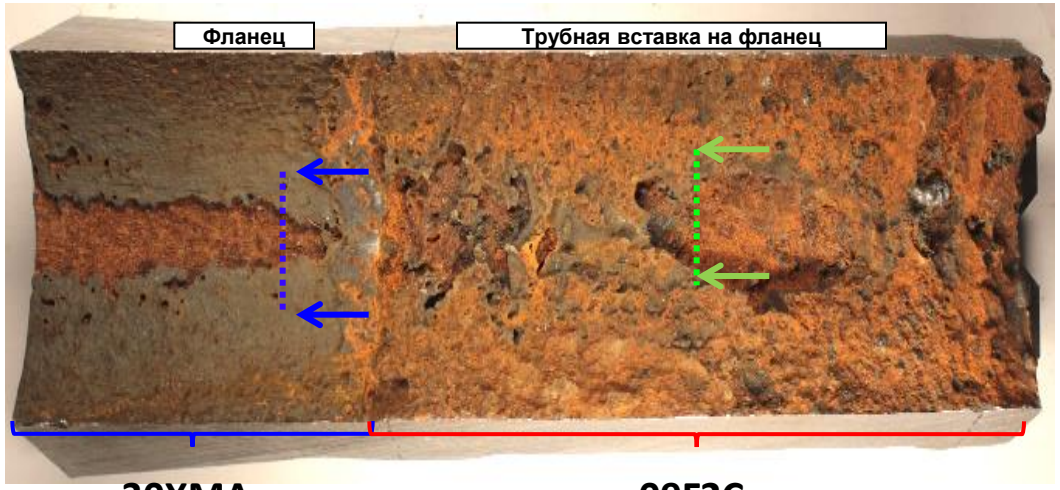
Пирожков Павел Александрович

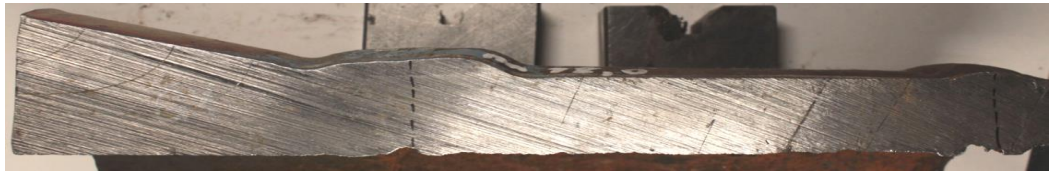
Условия эксплуатации ачимовской залежи Уренгойского НГКМ и результаты ОПИ

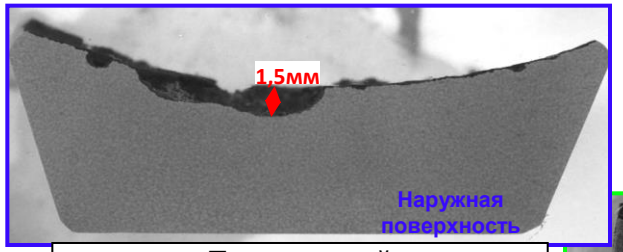
Типичный состав сред ачимовской залежи Уренгойского НГКМ

Среды ООО «Газпром добыча Уренгой»													
	pH	Минерализация	Содержание ионов, мг/дм^3							Ру	Ту	Парц. давл. CO_2, МПа	
		мг/дм^3	Cl^{-1}	HCO_3^{-1}	SO_4^{-2}	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$Na^{+1}+K^{+1}$		МПа	°С	Забой	ФА
min	5,87	441,81	36,88	165,92	0,96	4,91	0,62	126,00		14,4	39,2	0,17	0,12
max	7,23	9367,86	4844,55	1403	120,58	180,36	101,17	3388,56		34,2	64,8	0,42	0,32
среднее	6,65	3919,212	1764,66	662,58	43,30	49,03	18,87	1372,20		24,3	52,0	0,34	0,26
Среды АО «Ачимгаз»													
min	5,60	30,0	0,87	6,1	0,05	0,18	0,03	0,41	0,02	24,7	41,0	0,21	
max	7,65	12200	6132	2654	107	840	98,2	4389	875	37,5	73,0	0,33	
среднее	6,51	6115	1059,85	544,07	5,62	58,63	7,99	709,66	78,34	31,1	57,0	0,27	

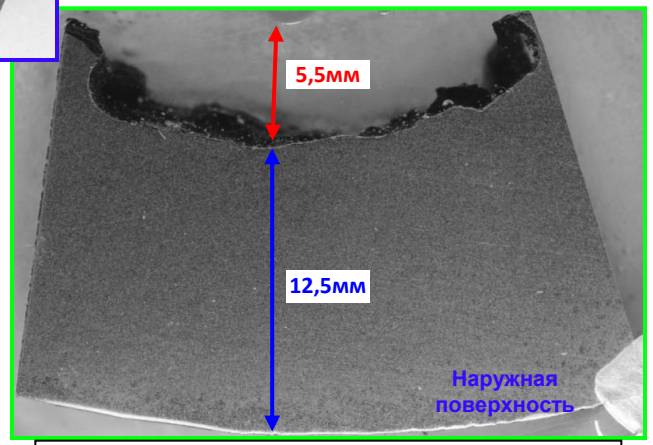
Для наилучшего воспроизведения CO_2-коррозии в лаборатории подходят условия эксплуатации ачимовской залежи Уренгойского НГКМ.
Газовая составляющая среды содержит около 1% CO_2, который, с учетом высокого давления, создает достаточно агрессивную среду, вызывающую углекислотную коррозию. Среды не содержат сероводород. Среды преимущественно содержат хлорид-ионы и катионы щелочных металлов





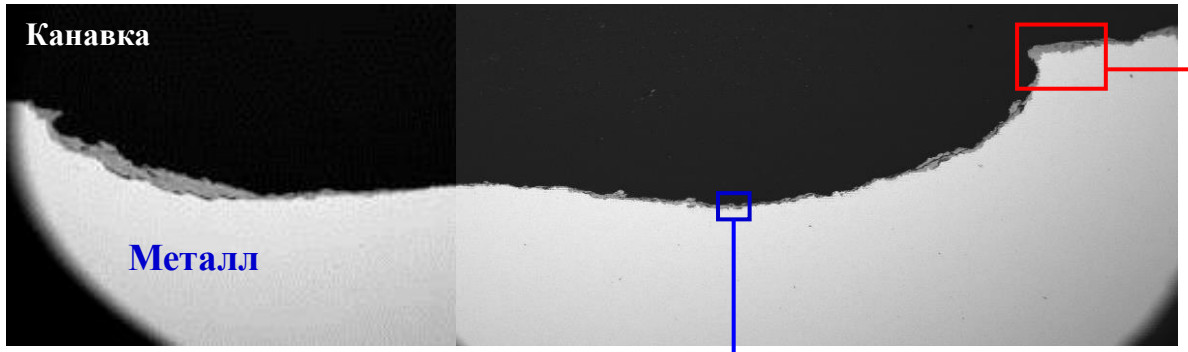


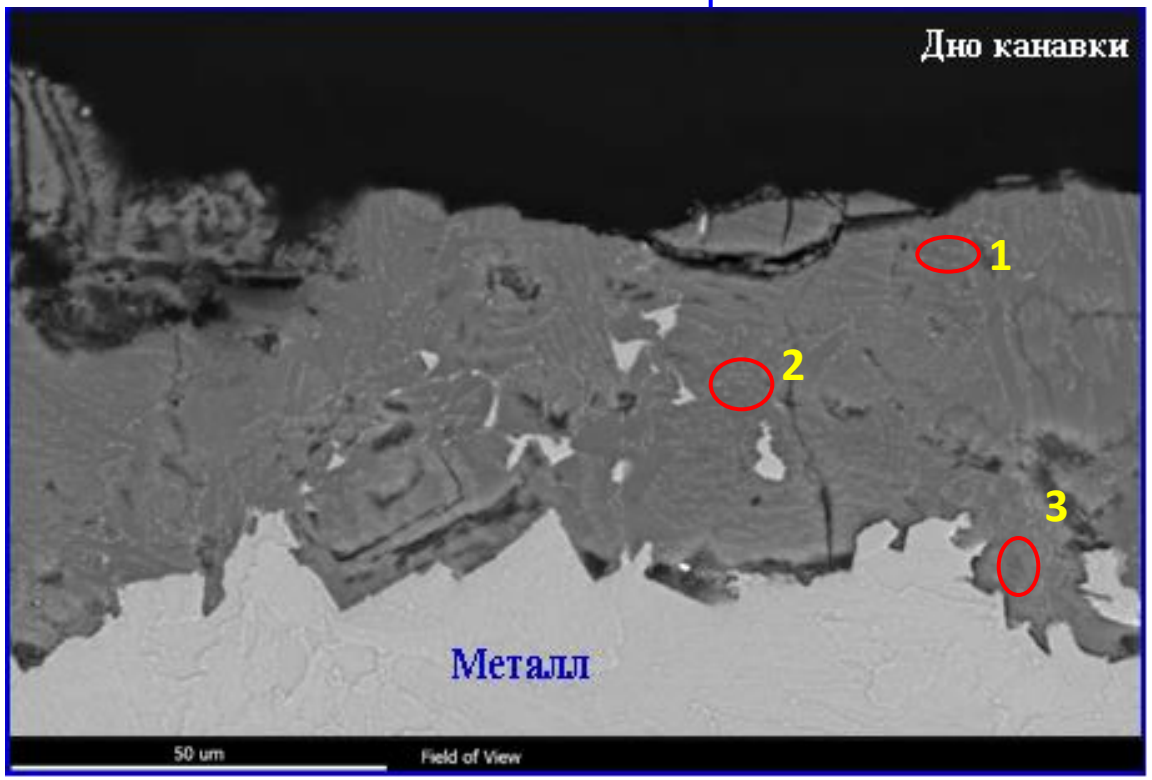
Поперечный металлографический шлиф из фланца, сталь марки 30ХМА

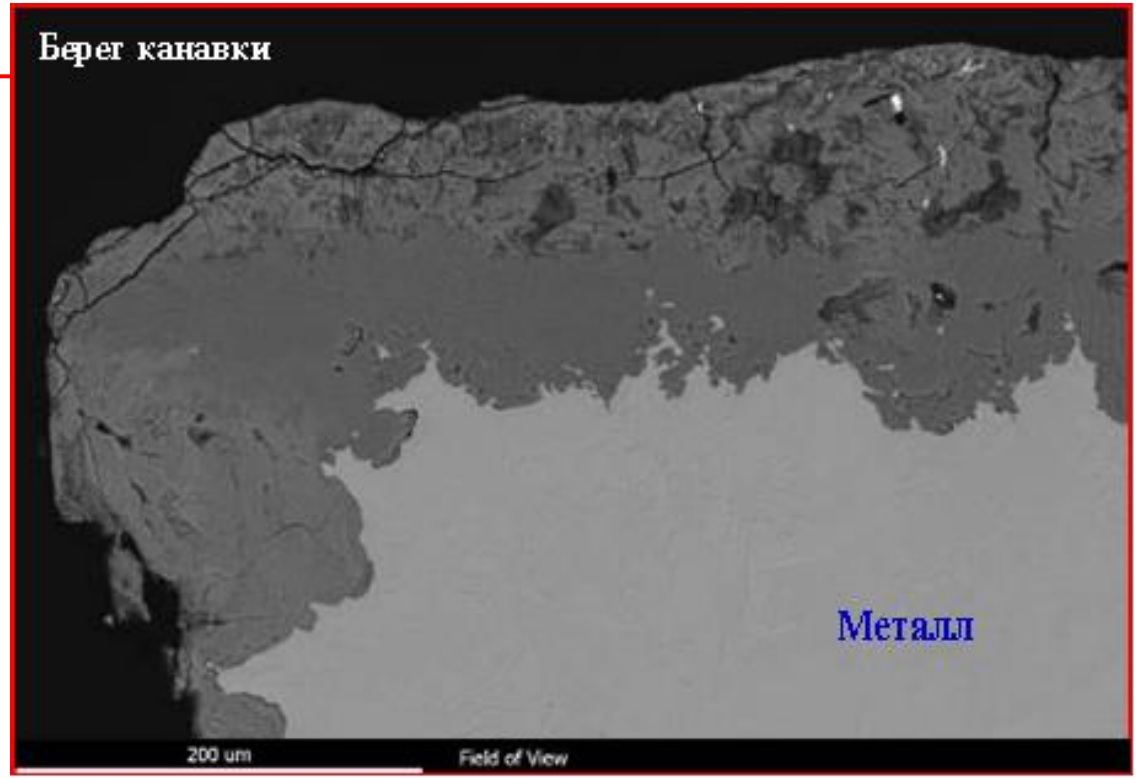


Поперечный металлографический шлиф из трубной вставки на фланце №1, сталь марки 09Г2С

Продукты коррозии на поверхности нефтепромыслового оборудования из стали 30ХМА после эксплуатации

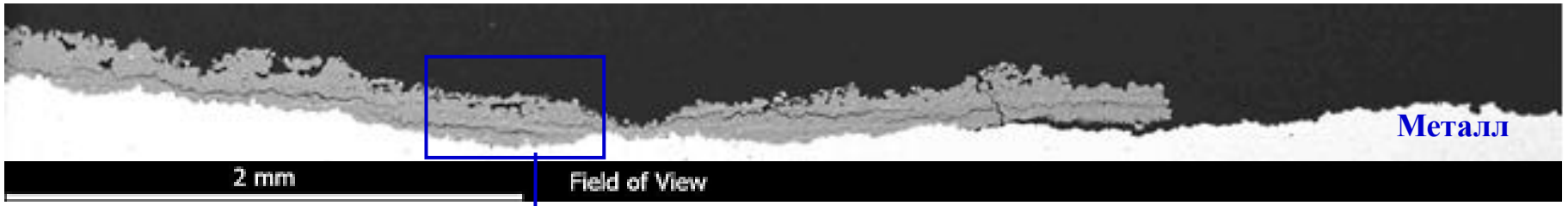


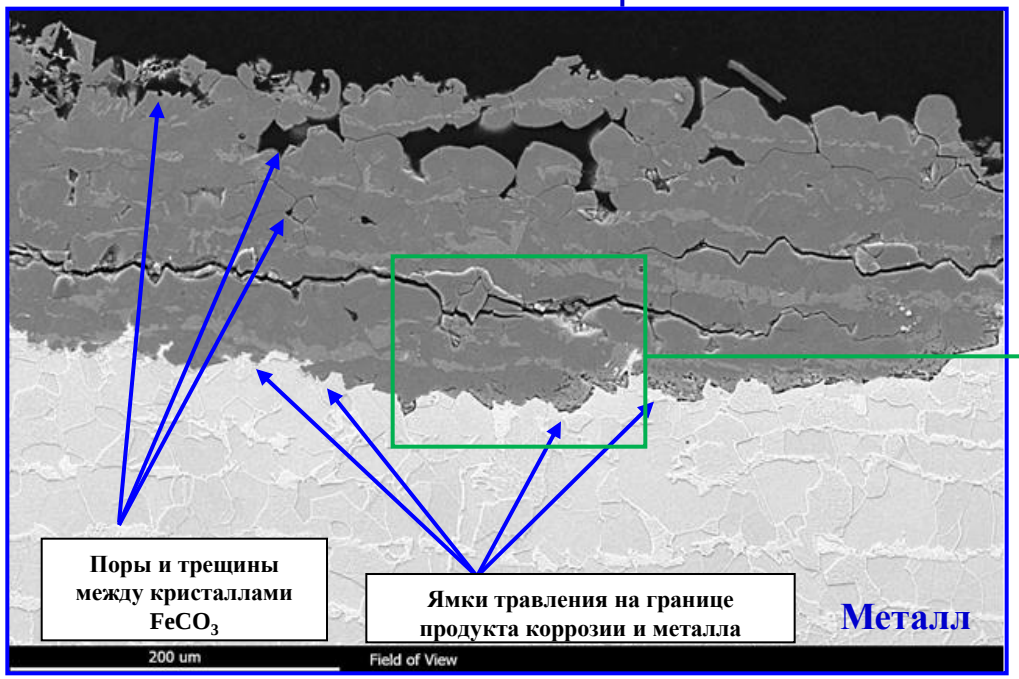


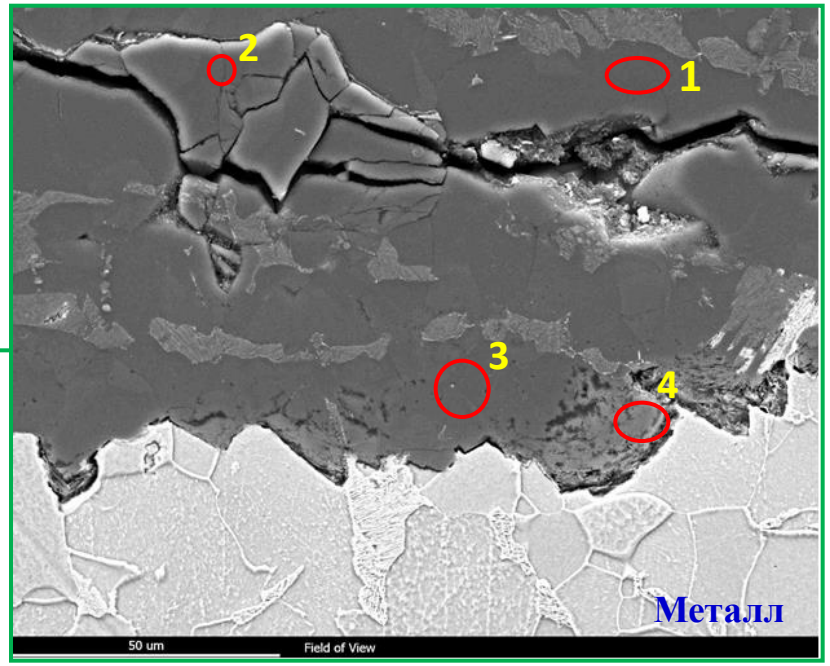


	Массовая концентрация элементов, %									
	C	O	Na	Mo	Si	S	Cl	Cr	Mn	Fe
1	14,46	10,09	0,79	2,25	-	-	0,32	10,08	1,60	Ост.
2	6,93	13,44	-	2,27	-	-	0,29	5,63	1,25	Ост.
3	8,75	18,32	-	-	0,39	0,94	0,22	2,27	0,57	Ост.

Продукты коррозии с поверхности нефтепромыслового оборудования из стали 09Г2С после эксплуатации



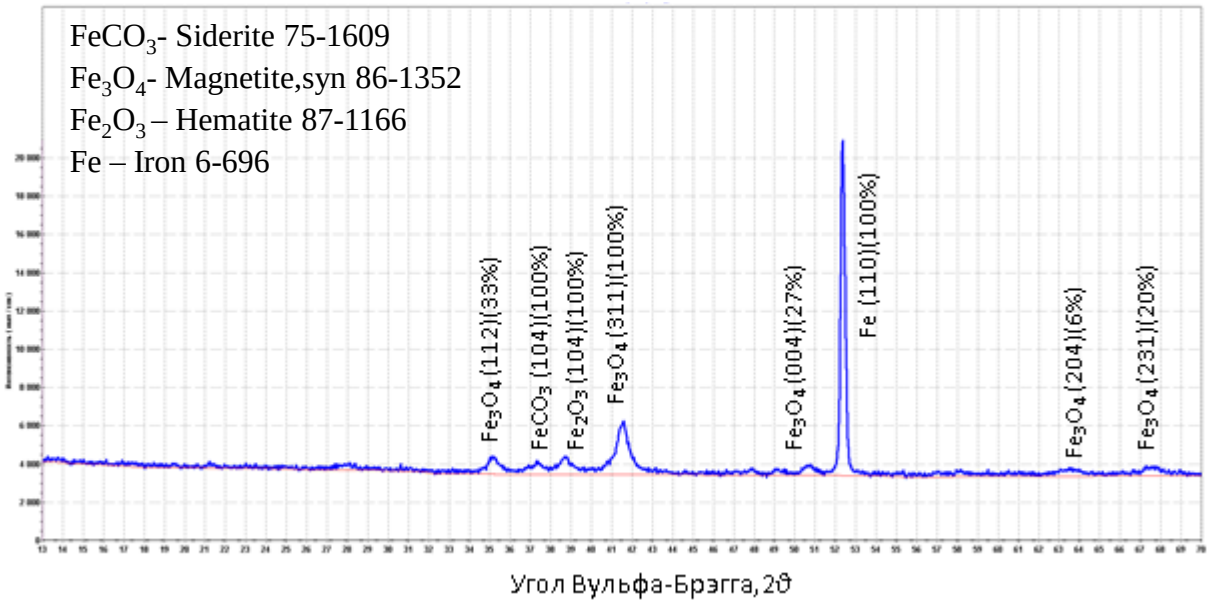




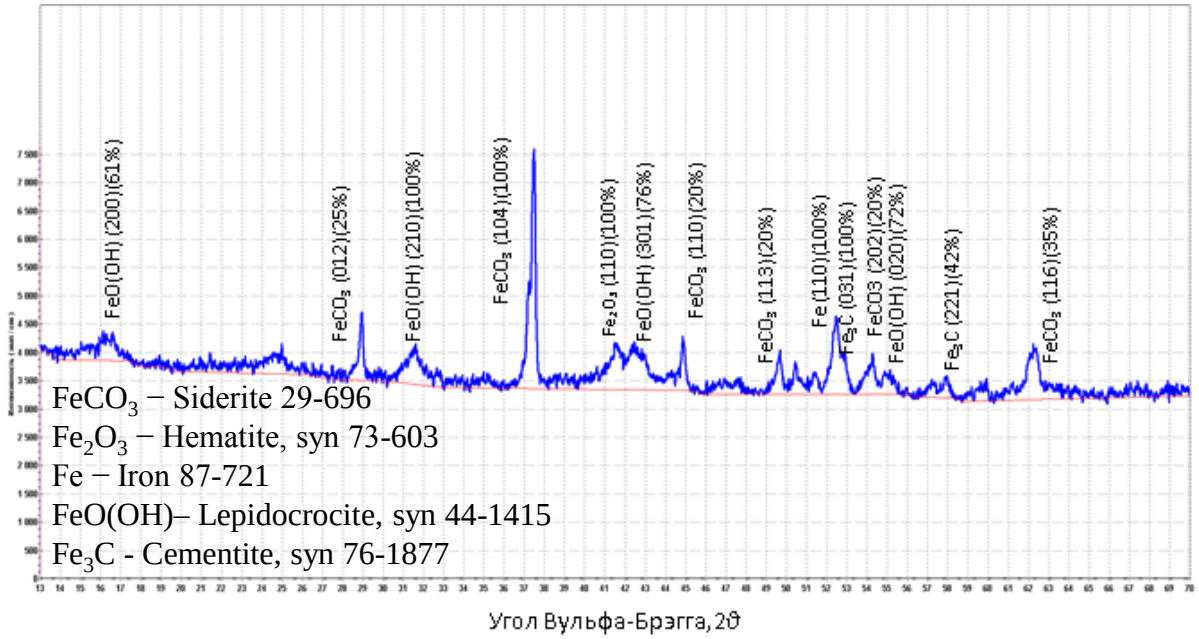
	Массовая концентрация элементов, %					
	C	O	Si	Ca	Mn	Fe
1	9,59	31,96	-	-	1,09	Ост.
2	9,60	30,80	-	0,63	1,32	Ост.
3	9,58	32,35	-	-	1,04	Ост.
4	7,95	29,14	1,54	-	0,56	Ост.

Рентгенофазовый анализ отложений на 09Г2С и 30ХМА после эксплуатации

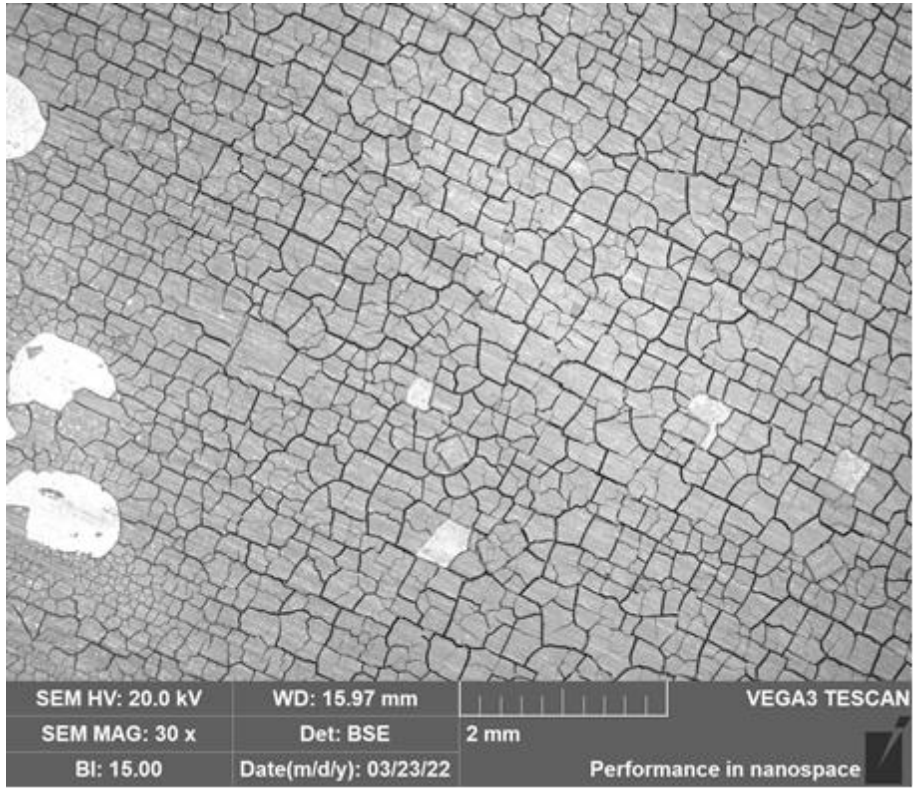
Фазовый состав отложений на стали 09Г2С

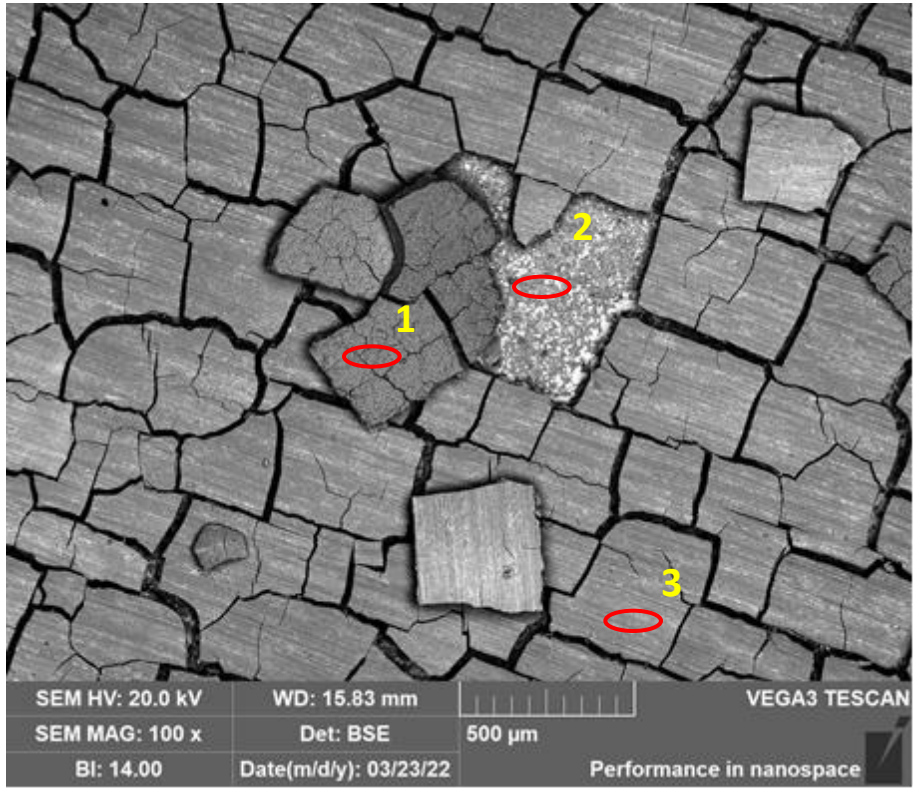


Фазовый состав отложений на стали 30ХМА



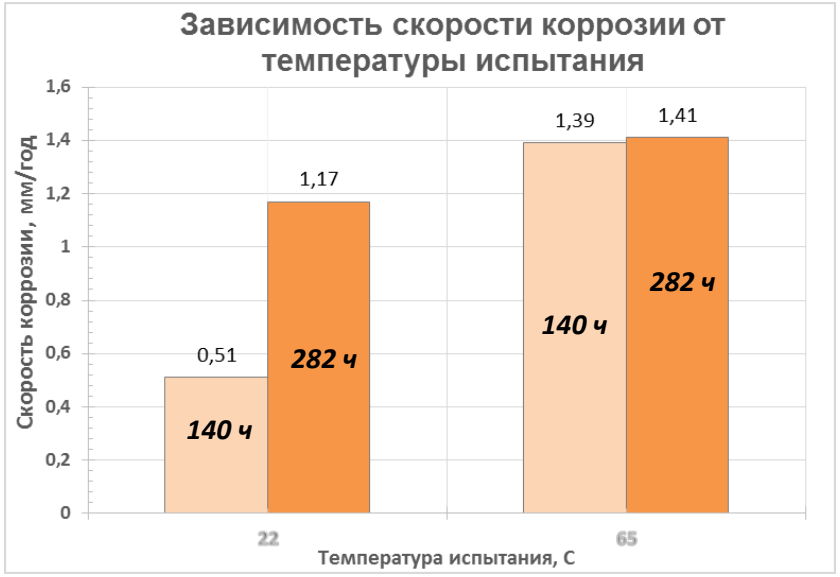
Продукты коррозии на поверхности образца свидетеля коррозии из стали с 5 масс% Cr после ОПИ

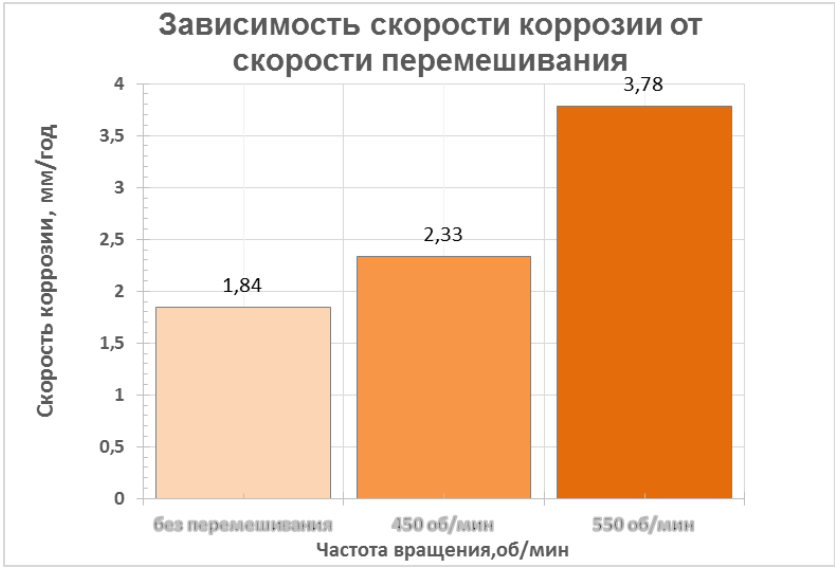




	Массовая концентрация элементов, %						
	C	O	Ca	Cr	Si	Mo	Fe
1	9,27	52,74	1,68	23,35	0,23	2,43	Ост.
2	7,00	23,41	0,54	12,75	0,33	1,43	Ост.
3	7,09	47,20	2,00	22,30	0,19	3,54	Ост.

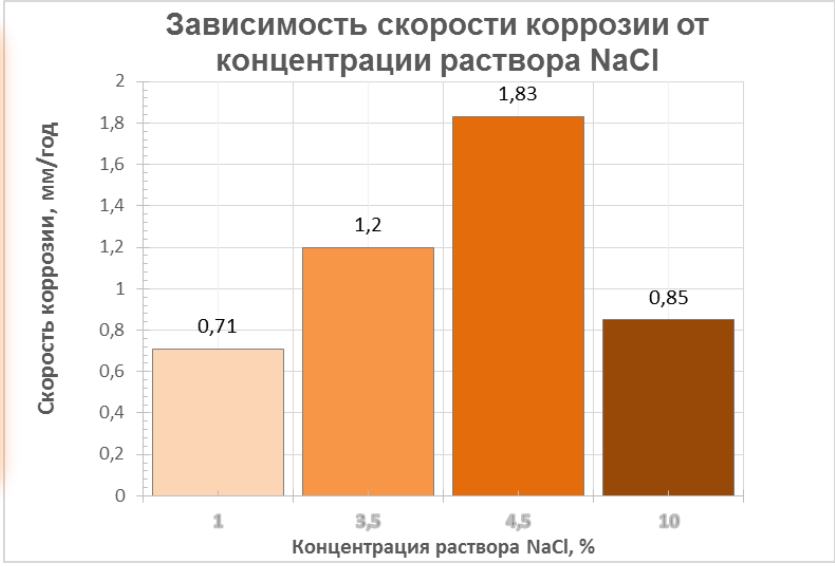
Факторы, влияющие на процесс CO_2-коррозии, на примере стали 09Г2С





- T = 65°C
- τ = 162 ч

Из диаграмм следует, что скорость коррозии стали 09Г2С при комнатной температуре и в неподвижной среде будет заметно ниже, чем при 65°C и перемешивании. Зависимость скорости коррозии от минерализации не является монотонной.



- T = 65°C
- τ = 350 ч

Известные методики оценки стойкости общей коррозии в CO_2-содержащих средах

Методики

АО «НИПЦ НефтеГазСервис»	ТТТ-01.02.04-02 вер. 4.0 ПАО «ГАЗПРОМ НЕФТЬ»
5% NaCl	5% NaCl, 0,02% $NaHCO_3$
0,6 – 0,9 г/л CO2 (или до насыщения)	0,20-0,35 г/л
23±2 °C	20±1 °C
96±1 ч	240±1 ч
Перемешивание отсутствует	Перемешивание отсутствует
Постоянный барботаж	Постоянный барботаж отсутствует
Гравиметрия	Гравиметрия

Недостатки

- При указанных температурах и продолжительностях эксперимента не происходит формирование слоя продуктов коррозии, хотя в реальных трубах он образуется
- Стационарные испытания не моделируют движение фазы относительно стенки трубы
- Отсутствие постоянного барботажа приводит к уменьшению парциального давления углекислого газа в испытательной ёмкости, хотя в реальных трубах такая тенденция отсутствует
- Использование одного метода оценки скорости коррозии вместо их совокупности

Условия проведения лабораторных испытаний по методике ООО «ИТ-Сервис»

Методика ООО «ИТ-Сервис»

- 4.5% KCl или 3.5% NaCl
- Концентрация CO_2 – до насыщения
- 65°C
- 120 – 300 ч
- Магнитная мешалка
- Постоянный барботаж ($p_{CO_2} = const$)
- Гравиметрия + электрохимия + концентрация железа + pH до и после

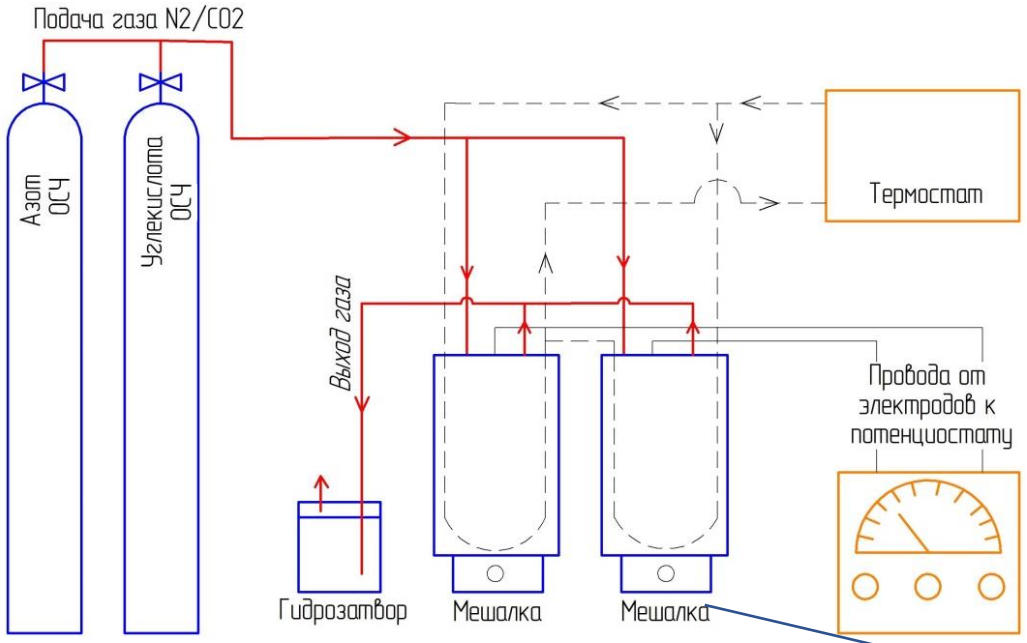
Методика позволяет ранжировать стали по стойкости к CO_2-коррозии. Характер коррозии в процессе испытания меняется, следовательно, необходимо иметь представление о форме кривой зависимости скорости коррозии от времени. Гравиметрический метод анализа и расчёт скорости коррозии через концентрацию железа необходимы для подтверждения результатов электрохимического метода.

Суть электрохимического метода

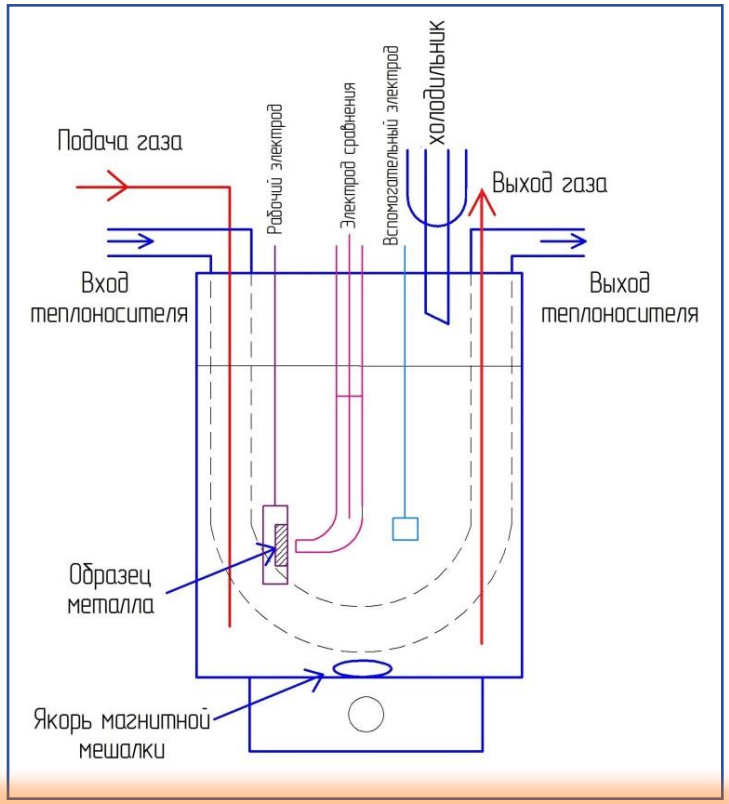
1. Построение поляризационной кривой $I = f(U)$
2. Расчёт линейного поляризационного сопротивления, R, Ом
3. Расчёт скорости коррозии, CR, мм/год

Установка ООО «ИТ-Сервис»

Лабораторная установка



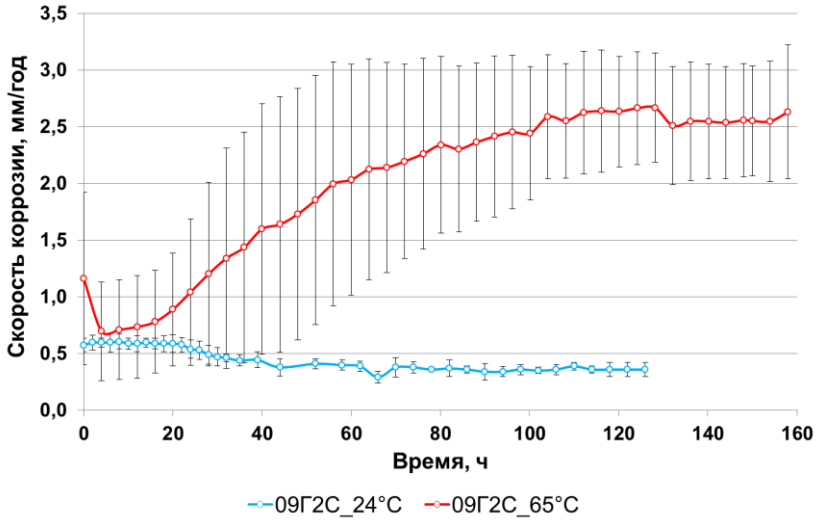
Электрохимическая ячейка



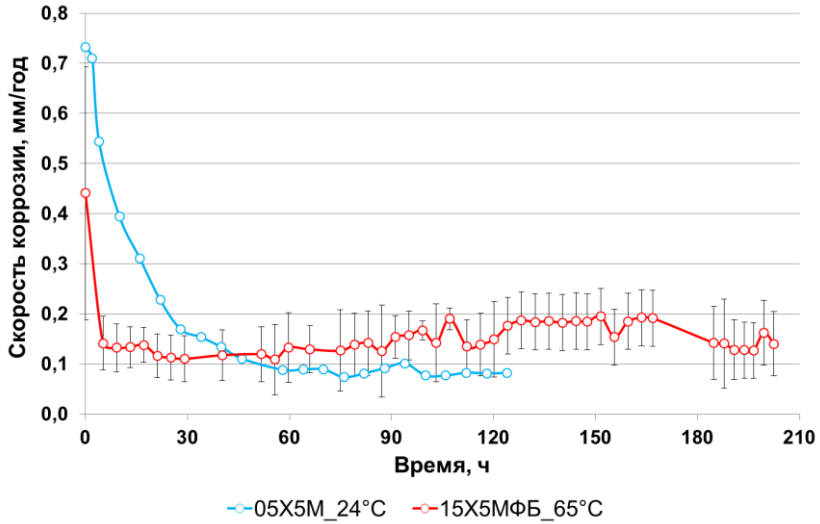
Перед погружением исследуемых образцов в испытательную среду раствор продувается азотом в течение 3 часов, а затем насыщается углекислым газом в течение 1,5 часов. Для испытаний использовались газы квалификации ОСЧ. Выход газа в атмосферу осуществляется через гидрозатвор.

Результаты испытаний по методике ООО «ИТ-Сервис»

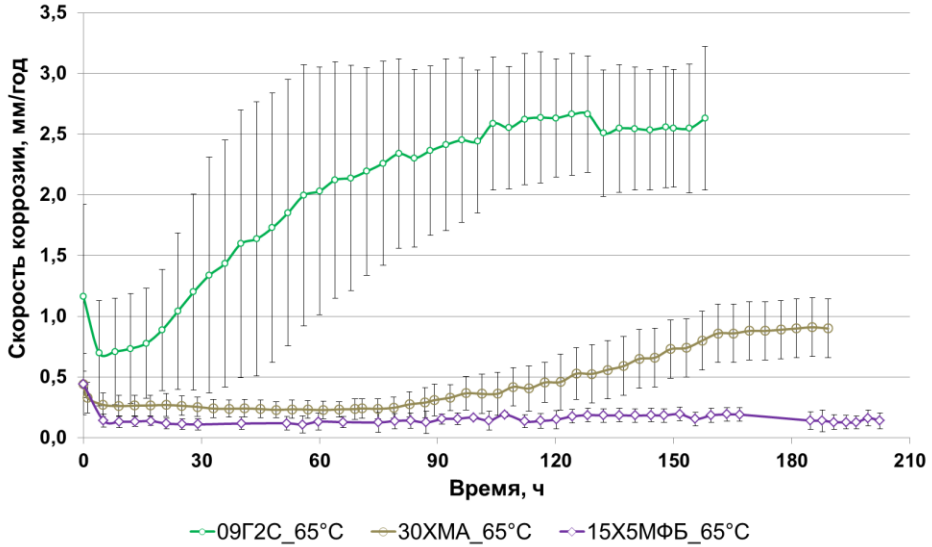
Зависимость скорости коррозии от температуры для стали 09Г2С



Зависимость скорости коррозии от температуры для стали с 5%Cr



Зависимость скорости коррозии от содержания Cr в стали



При комнатной температуре ранжировать стали затруднительно вследствие близких скоростей коррозии, поэтому для испытаний была выбрана температура 65°С.

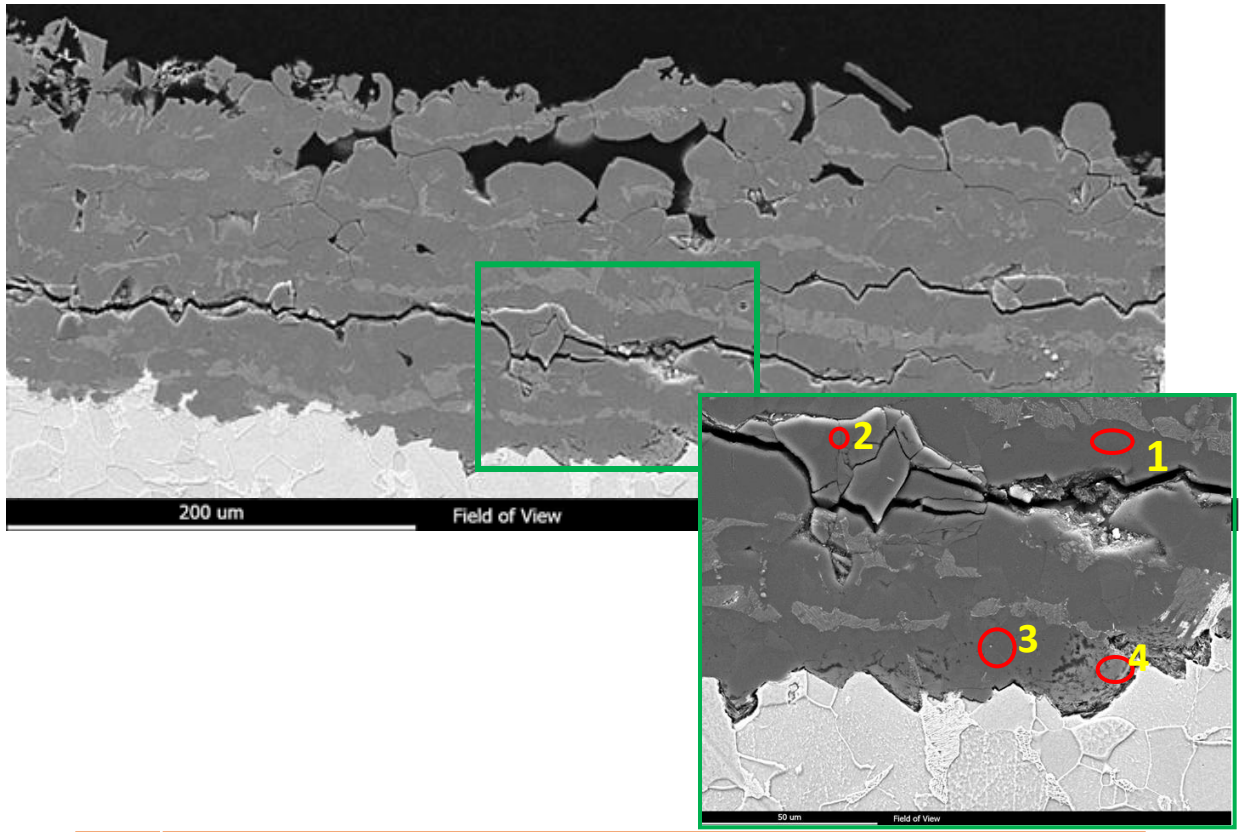
Результаты испытаний по методике ООО «ИТ-Сервис»

Для сталей 09Г2С и 05Х5М скорость коррозии возрастает с повышением температуры, что видно по результатам и электрохимического, и гравиметрического методов. Результаты обоих методов во всех случаях близки, однако электрохимический метод несколько занижает скорость коррозии. Скорости коррозии при лабораторных испытаниях и ОПИ имеют близкие значения. Величина pH во всех случаях возрастает в ходе испытания. При одной и той же температуре pH после испытания выше там, где наблюдается более интенсивная коррозия.

Марка стали	***Температура, °C***	***Скорость коррозии, мм/год***					***pH до***	***pH после***
		Эл/хим метод	*Гравиметр. метод*	*Через $[Fe^{2+}]$*	*Гравимет р. метод после ОПИ Общая коррозия*	*Гравимет р. метод после ОПИ Локальная коррозия*		
09Г2С	24	0.40	0.58	0.55	-	-	3.80	6.43
	65	2.05	2.20	1.53	1.63	2.47		6.07
30ХМА	65	0.52	1.10	1.15	0.75	1.03		5.73
Сталь с 5 масс% Cr	24	0.10	0.16	0.23	-	-		5.04
	65	0.20	0.20	0.16	0.46	0.50		5.42

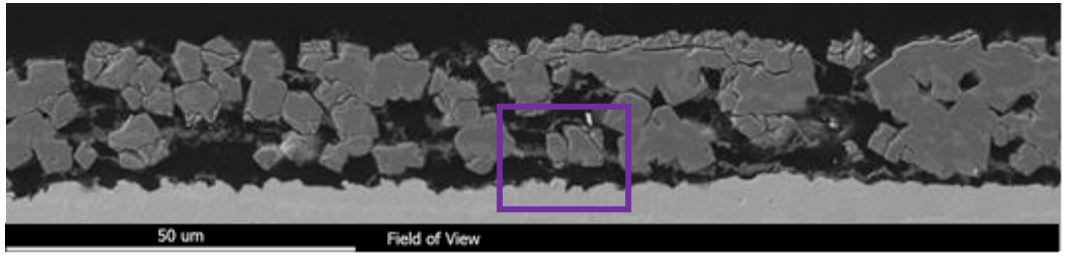
Сравнение продуктов коррозии на стали 09Г2С после испытаний по методике ООО «ИТ-Сервис» и после эксплуатации

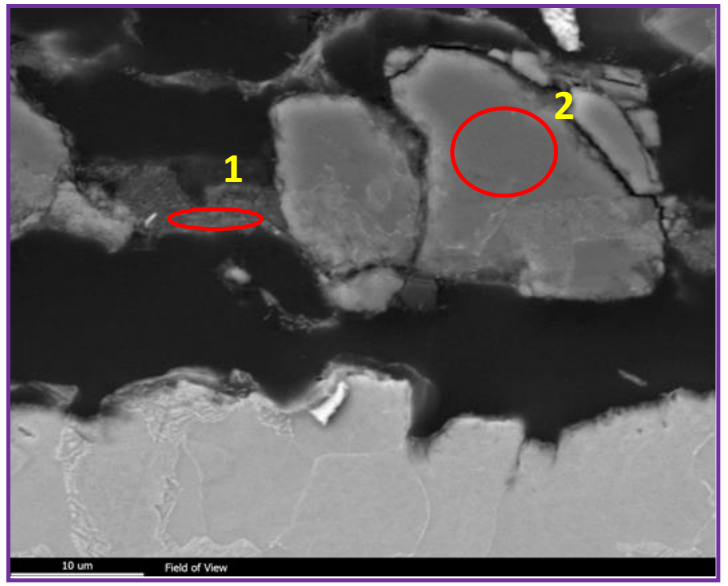
После эксплуатации



	Массовая концентрация элементов, %					
	C	O	Si	Ca	Mn	Fe
1	9,59	31,96	-	-	1,09	Ост.
2	9,60	30,80	-	0,63	1,32	Ост.
3	9,58	32,35	-	-	1,04	Ост.
4	7,95	29,14	1,54	-	0,56	Ост.

После лабораторных испытаний

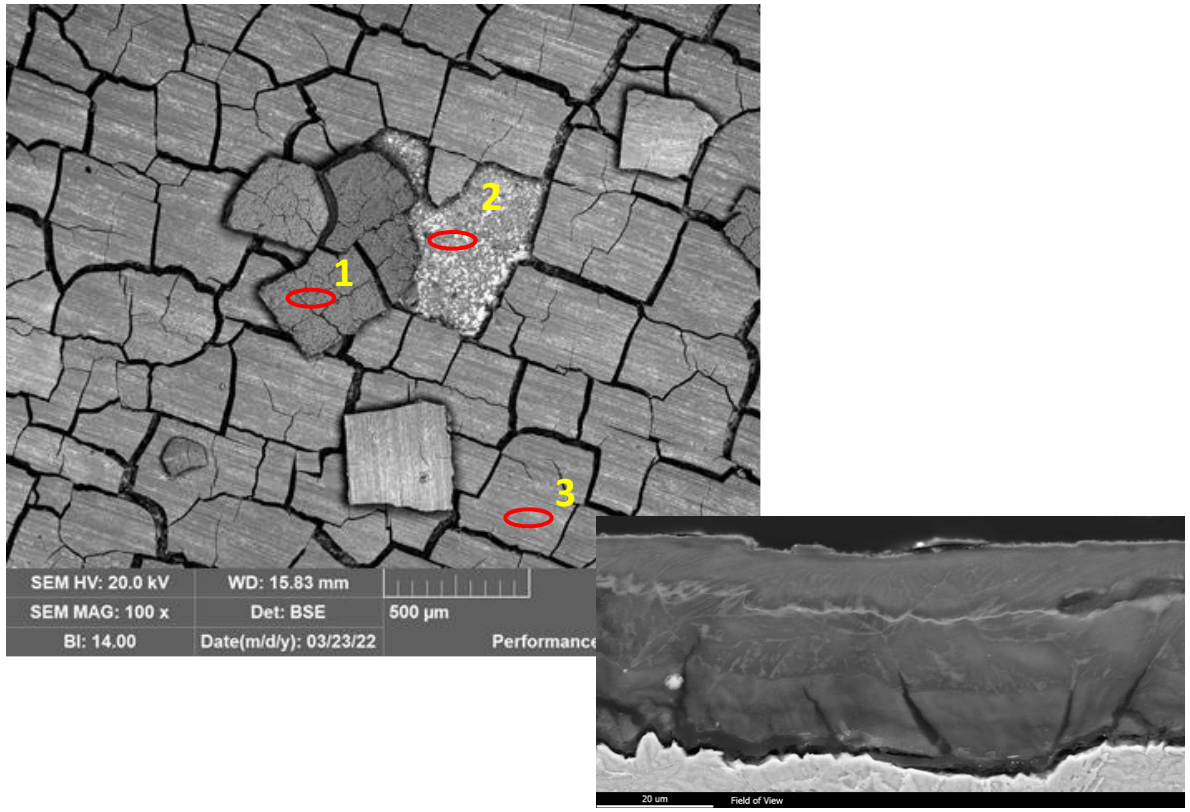




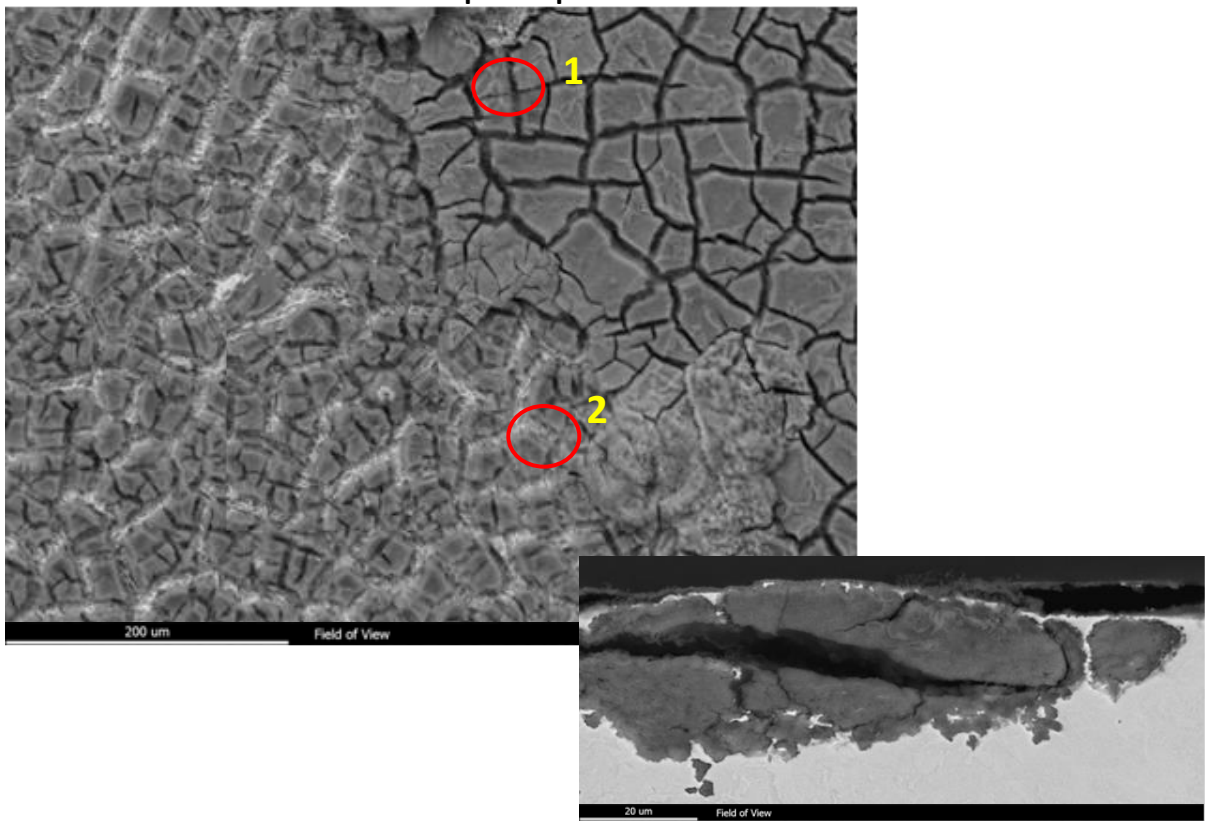
	Массовая концентрация элементов, %					
	C	O	S	Cl	Mn	Fe
1	64,81	19,37	0,66	1,11	-	Ост.
2	7,26	28,65	-	-	1,66	Ост.

Сравнение продуктов коррозии на стали с 5 масс% Cr после испытаний по методике ООО «ИТ-Сервис» и после ОПИ

После ОПИ



После лабораторных испытаний



	Массовая концентрация элементов, %						
	C	O	Ca	Cr	Si	Mo	Fe
1	9,27	52,74	1,68	23,35	0,23	2,43	Ост.
2	7,00	23,41	0,54	12,75	0,33	1,43	Ост.
3	7,09	47,20	2,00	22,30	0,19	3,54	Ост.

	Массовая концентрация элементов, %						
	C	O	Si	Mo	K	Cr	Fe
1	5,63	21,73	0,34	2,20	1,59	34,94	Ост.
2	5,28	13,62	0,32	1,65	5,96	41,95	Ост.

ВЫВОДЫ

Лабораторные коррозионные испытания в растворе 4,5% KCl или 3,5% NaCl при 65°C в условиях постоянного перемешивания и барботирования углекислым газом позволяют проводить ранжирование различных марок сталей по стойкости к углекислотной коррозии.

После испытаний в данной среде значения скорости коррозии, полученные гравиметрическим и электрохимическим методами, имеют удовлетворительную сходимость между собой и с результатами после ОПИ.

Формирующийся слой продуктов коррозии на исследуемых марках сталей (09Г2С, 30ХМА, сталь с 5 масс% Cr) имеет характерный вид для продуктов CO_2-коррозии и аналогичен образцам после ОПИ.

Разработана установка для проведения лабораторных испытаний, позволяющая проводить мониторинг процесса углекислотной коррозии в реальном времени.

Благодарю за внимание

Пирожков Павел
Александрович

+7 902 237 78 60
pirozhkov@its-samara.com

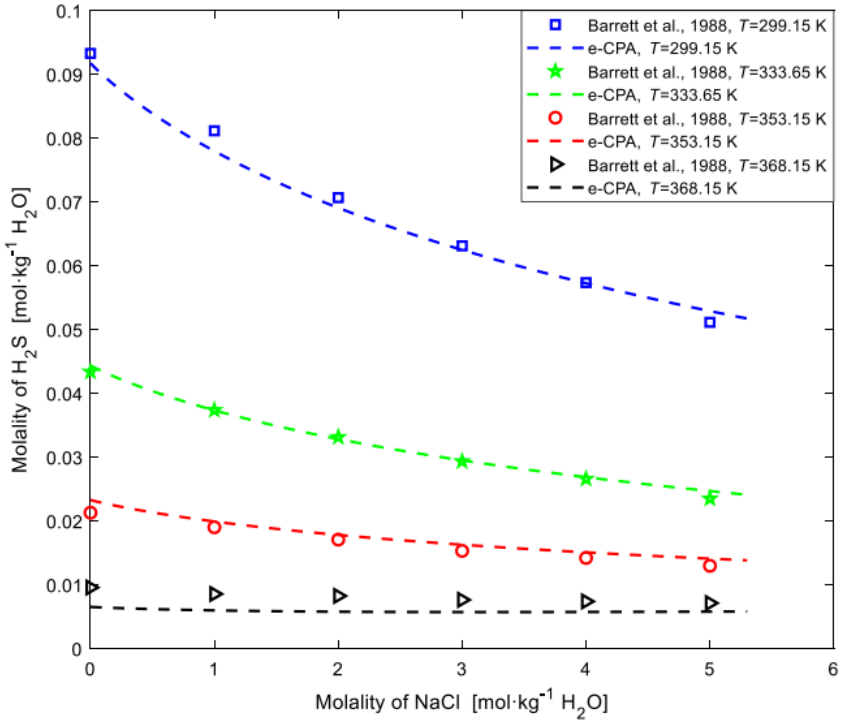
ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

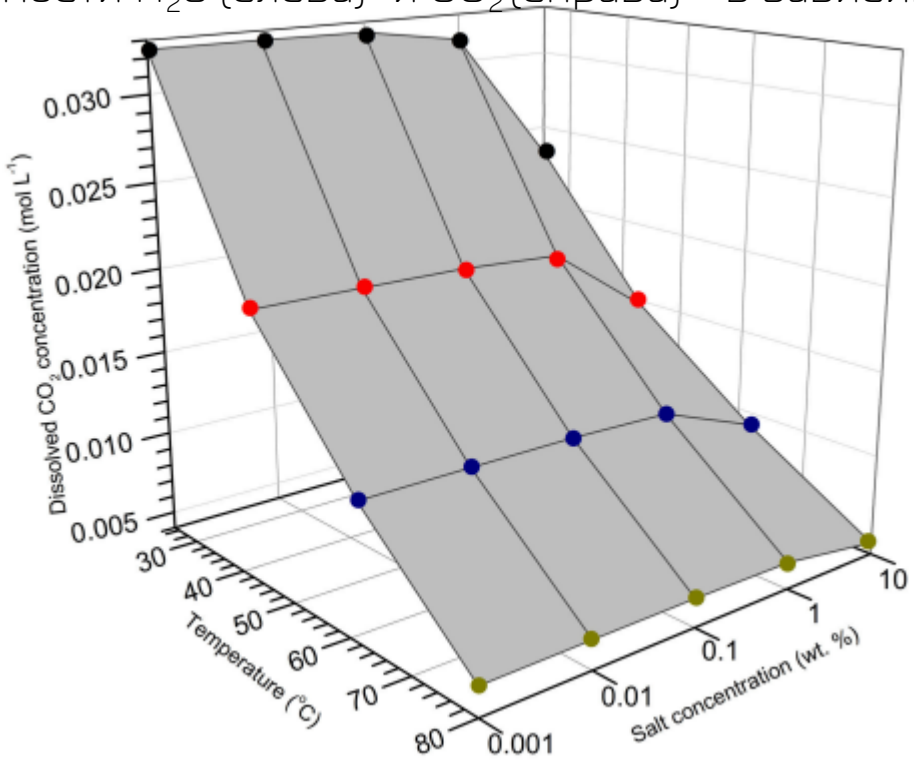
Особенности протекания коррозионных процессов в высокоминерализованных средах. Сравнительные результаты лабораторного моделирования.

Докладчик: Чистопольцева Елена Александровна

Влияние минерализации на растворимость газов

Графики зависимости растворимости H_2S (слева)* и CO_2 (справа)** в зависимости от концентрации NaCl





$H_2S_{(газ)} \leftarrow H_2S_{(раствор)}$

$H_2S_{(раствор)} \leftrightarrow H^+ + HS^-$

$HS^- \leftrightarrow H^+ + S^{2-}$

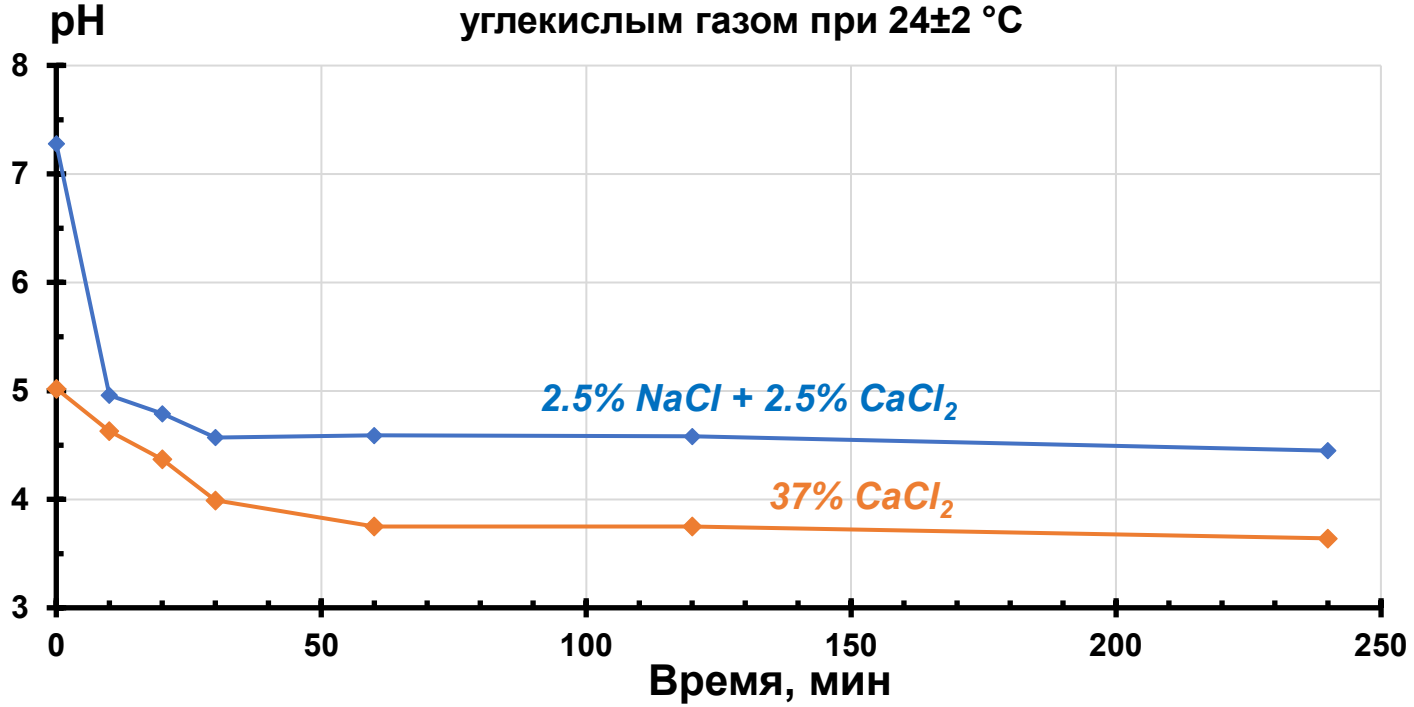
$CO_{2\ (газ)} \leftarrow CO_{2\ (раствор)}$	Растворение
$CO_{2\ (раствор)} + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$	Гидратация
$H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$	Диссоциация I
$HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-}$	Диссоциация II

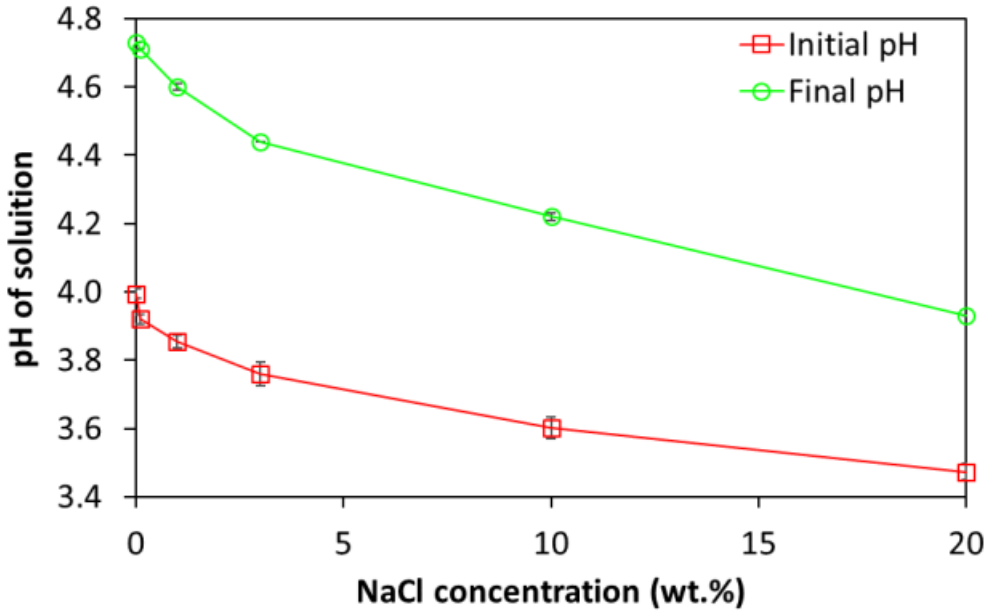
**Sun L., Liang J. Solubility modeling of hydrogen sulfide in aqueous sodium salt solutions. Environmental Technology & Innovation 2023, 32, 103334.*

***Li S., Zeng Z., Harris M.A., Sánchez L.J., Cong H. CO_2 corrosion of low carbon steel under the joint effects of time-temperature-salt concentration. Frontiers in Materials 2019, 6.*

Влияние минерализации на кислотность раствора

График зависимости pH раствора от длительности барботажа углекислым газом при 24±2 °C

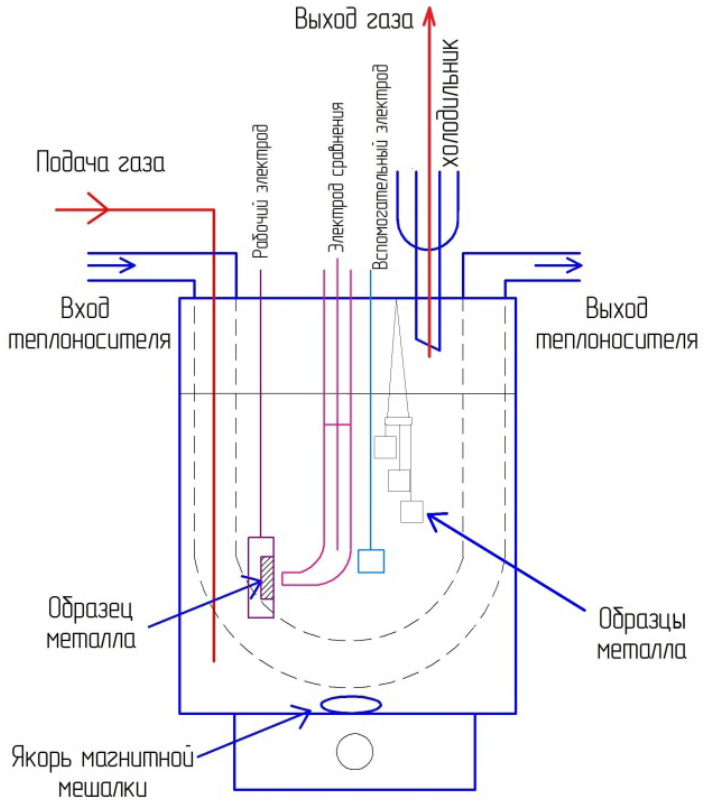


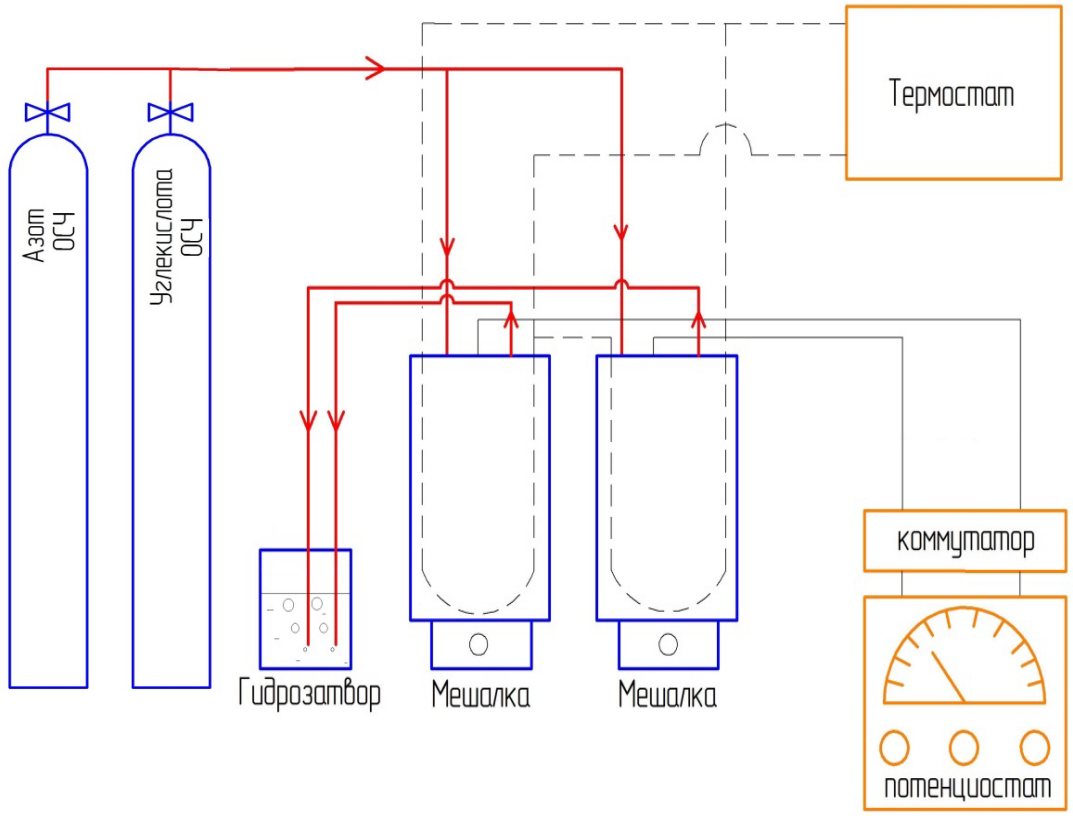


Sani F.M., Brown B., Belarbi Z., Nesic S. Experimental Investigation on the Effect of Salt Concentration on Uniform CO2 Corrosion // NACE International, Corrosion 2019, Paper № 13026

$CO_{2\ (газ)} \leftrightarrow CO_{2\ (раствор)}$	Растворение
$CO_{2\ (раствор)} + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$	Гидратация
$H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$	Диссоциация I
$HCO_3^- \rightarrow H^+ + CO_3^{2-}$	Диссоциация II

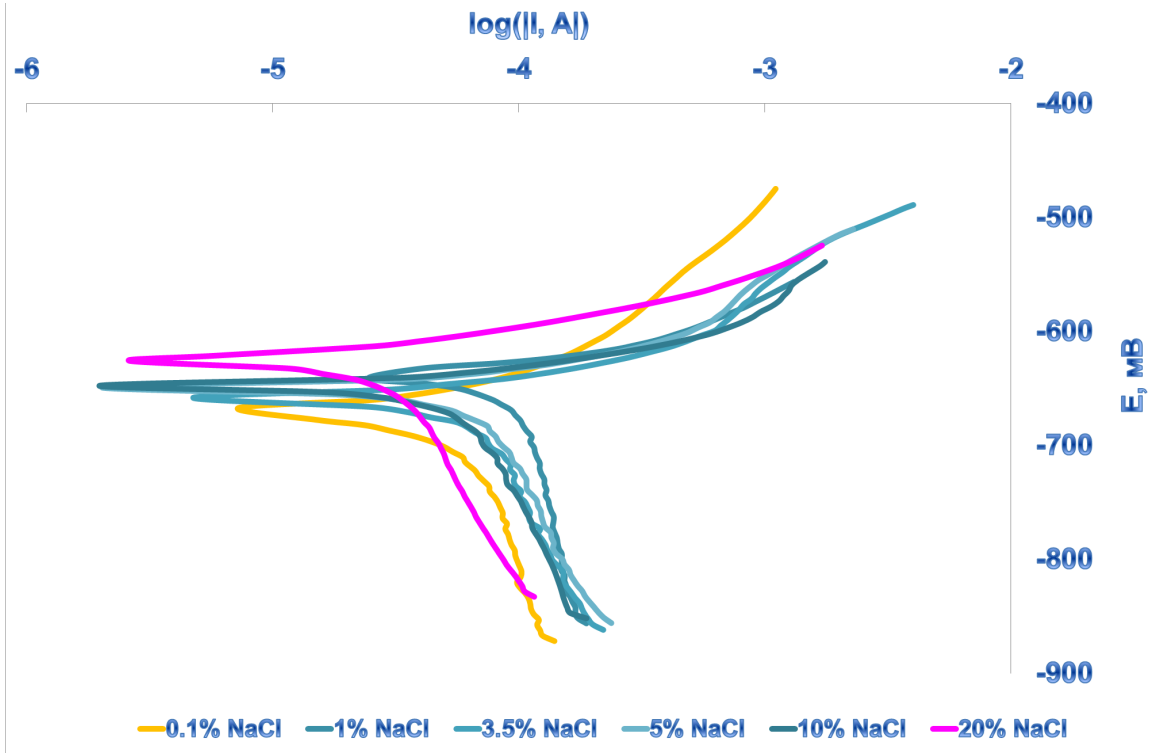
Установка для оценки скорости коррозии



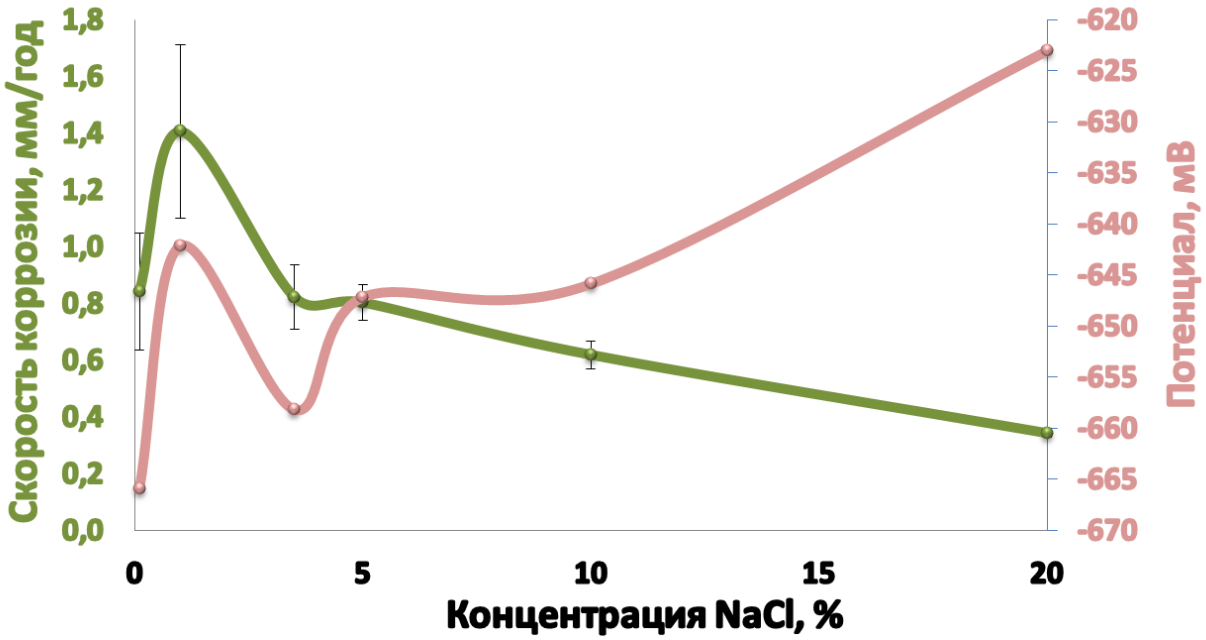


Результаты испытаний

Поляризационные кривые

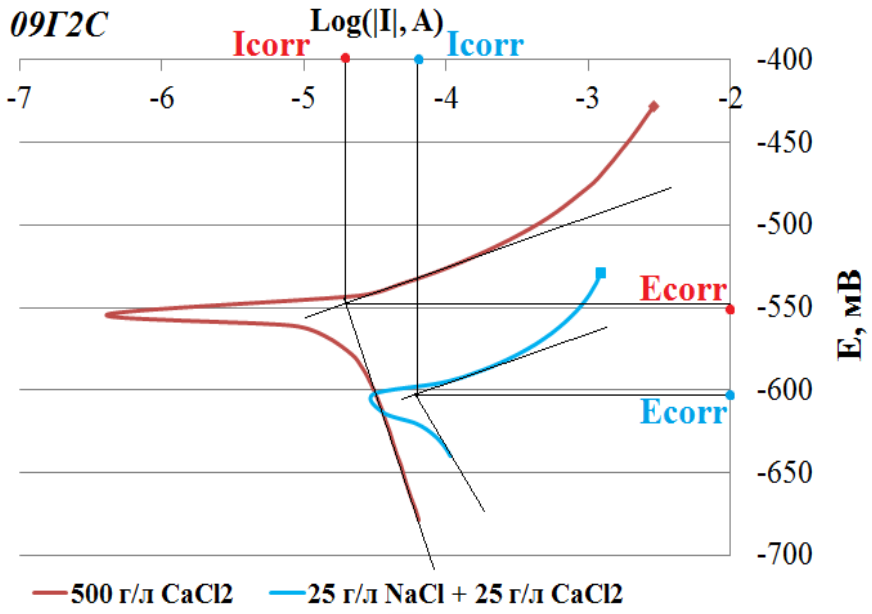


Графики зависимостей скорости коррозии и потенциала коррозии стали 09Г2С от концентрации NaCl при постоянном барботаже CO_2, 25°С, на магнитной мешалке



Результаты испытаний

Поляризационные кривые, снятые на сталях 09Г2С и 05Х5М, при постоянном барботаже CO_2, 45°С, на магнитной мешалке



$I_{corr} < I_{corr}$

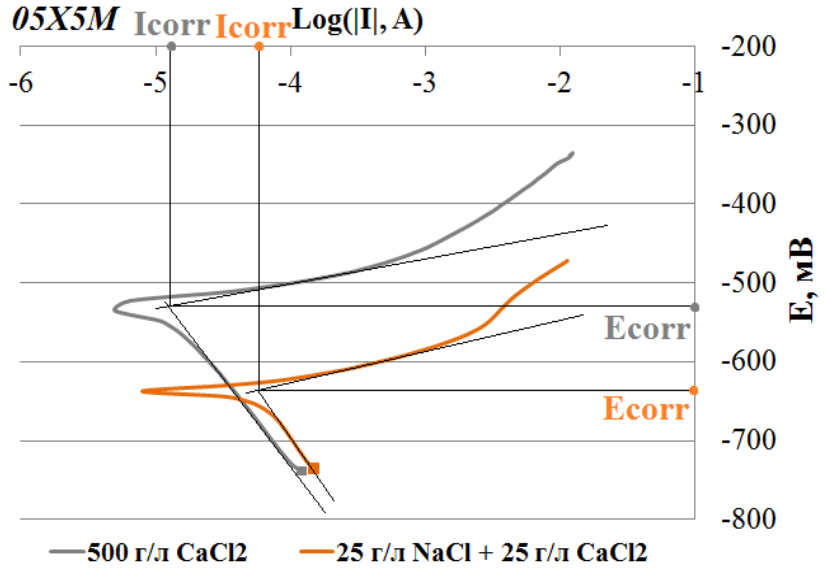
$E_{corr} > E_{corr}$

Сталь 09Г2С более инертна в растворе 500 г/л $CaCl_2$

Сталь 05Х5М более инертна в растворе 500 г/л $CaCl_2$

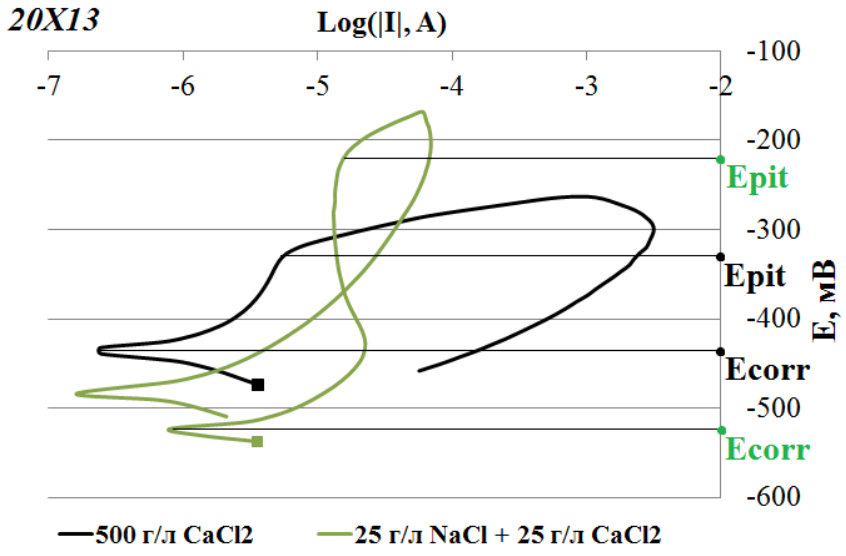
$I_{corr} < I_{corr}$

$E_{corr} > E_{corr}$



Результаты испытаний

Поляризационные кривые, снятые на сталях 20Х13 и AISI 316, при постоянном барботаже CO_2, 45°С, на магнитной мешалке

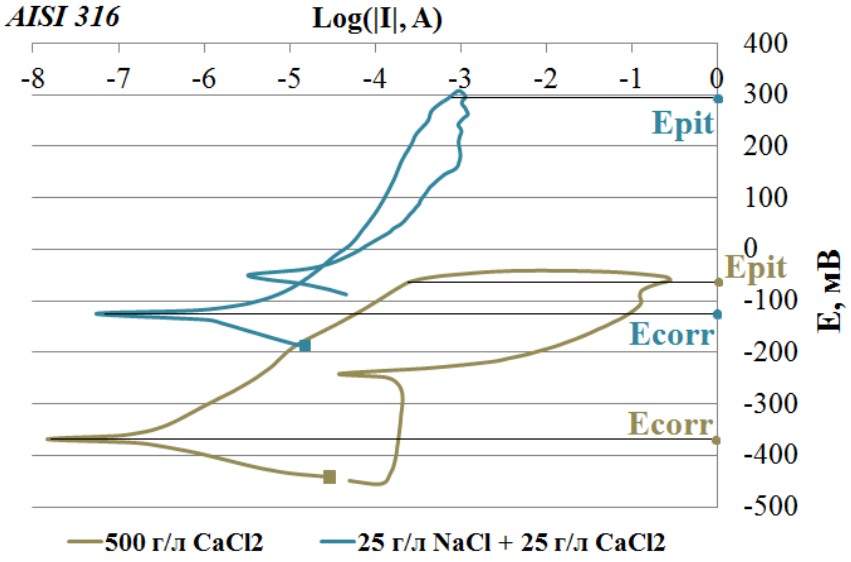


$|E_{pit} - E_{corr}| > |E_{pit} - E_{corr}|$

Сталь 20Х13 более инертна в растворе 25 г/л NaCl + 25 г/л $CaCl_2$

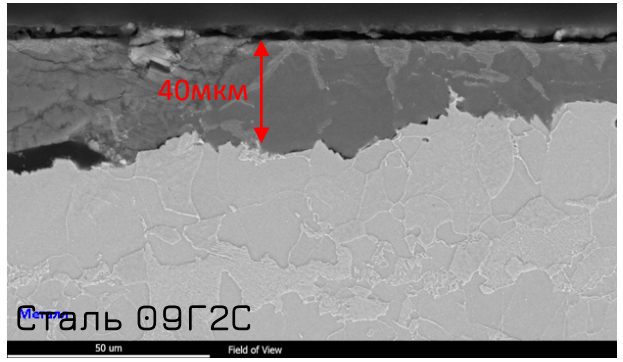
Сталь AISI 316 более инертна в растворе 25 г/л NaCl + 25 г/л $CaCl_2$

$|E_{pit} - E_{corr}| > |E_{pit} - E_{corr}|$



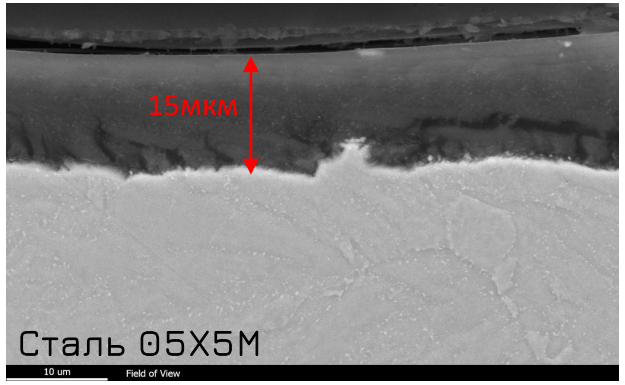
Типичный вид продуктов коррозии после коррозионных испытаний в автоклаве при $P_{общ}$ 40 атм, T=65°C, 24 часа

25 г/л NaCl + 25 г/л CaCl2



Массовая концентрация элементов, %						
C	O	S	Cl	Ca	Mn	Fe
32,28	20,55	00,62	00,90	05,63	01,49	Ост.

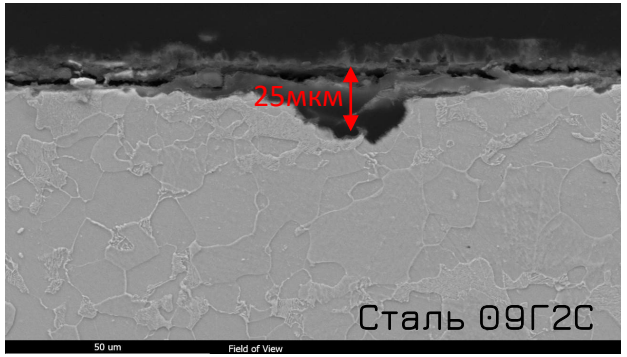
Vкорр = 15,77 мм/год



Массовая концентрация элементов, %							
C	O	Al	Mo	Cl	Ca	Cr	Fe
20,78	30,30	00,50	03,64	00,92	04,60	34,63	Ост.

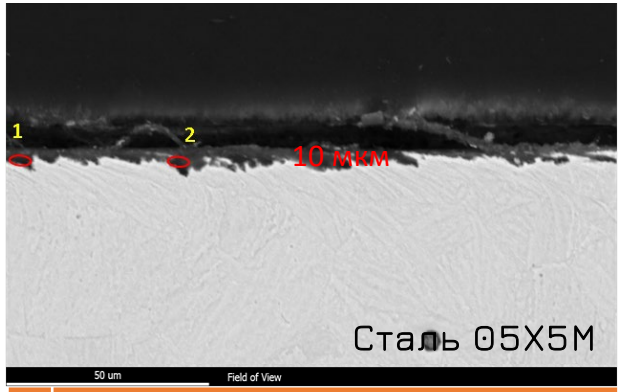
Vкорр = 5,58 мм/год

Среда 500 г/л CaCl2



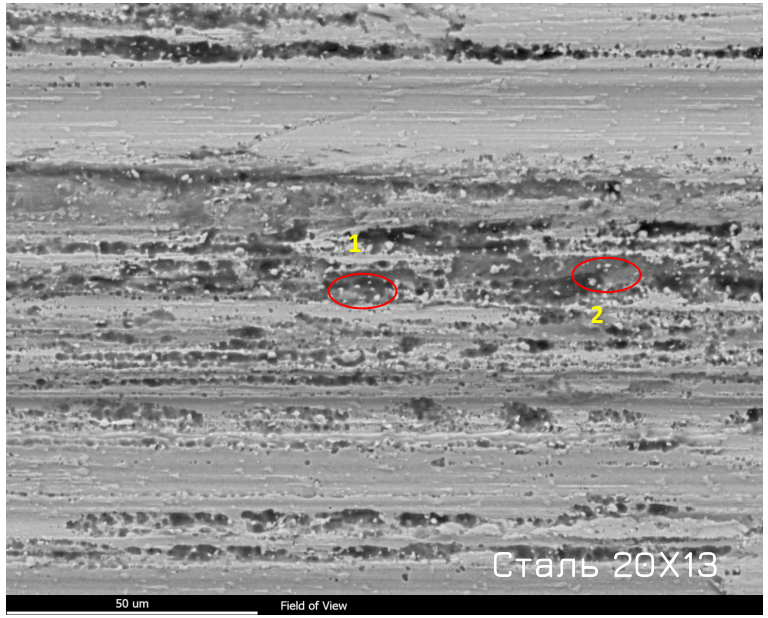
	Массовая концентрация элементов, %					
	C	O	Cl	Ca	Mn	Fe
1	74,97	14,83	01,53	04,85	01,15	Ост.

Vкорр = 1,83 мм/год



	Массовая концентрация элементов, %						
	C	O	Cl	Ca	Cr	Mn	Fe
1	19,45	06,53	02,37	45,89	06,48	00,70	Ост.
2	43,25	06,83	01,08	06,49	05,80	00,45	Ост.

Vкорр = 2,08 мм/год



	Массовая концентрация элементов, %						
	O	Si	Mo	Cl	Ca	Cr	Fe
1	15,84	00,70	00,34	01,45	00,78	19,19	Ост.
2	16,16	01,08	01,43	00,91	01,07	21,13	Ост.

Vкорр = 0,29 мм/год

Выводы

1. Растворимость углекислого газа и сероводорода падает с ростом минерализации раствора.
2. Кислотность раствора увеличивается с повышением минерализации раствора.
3. Скорость коррозии углеродистых сталей имеет максимальное значение в диапазоне концентрации солей от 0 до 5%, а затем монотонно снижается.
4. Скорость коррозии легированных сталей возрастает с повышением содержания хлорид-ионов.