СТИМ

ИТС
ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

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

# Трубки витые для теплообменных аппаратов из высоколегированных сталей



ПОТЫЛИЦЫН МАКСИМ – ДИРЕКТОР ООО «СТИМ»
ЧИСТОПОЛЬЦЕВА ЕЛЕНА – РУКОВОДИТЕЛЬ ДСМ ООО «ИТ-СЕРВИС»

Г. САМАРА, 03-04.09.2024

## Коротко о компании СТИМ

**ООО «СТИМ»**

- Образование компании - 2019 год с целью создания на территории России производства технологии ВИТЫХ ТРУБОК для кожухотрубных теплообменных аппаратов.
- Команда СТИМ обладает высокими компетенциями и большим опытом в области расчета и проектирования теплообменного оборудования
- Собственные технологии и собственное производство витых трубок и проволочных интенсификаторов в г. Новосибирске
- Исследовательская деятельность в области: теплогидравлики / свойств материалов / освоение новых продуктов / разработка ПО

Наши ценности:

I. Доверие
II. Ответственность
III. Экспертность
IV. Развитие
V. Созидание
VI. Идти на встречу друг другу



СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

## Загрузка сегодня

| Трубы 25х2,0х6000 мм (08Х22Н6Т) – 13 тонн | Трубы 25х2,5 мм (Ст20; 15Х5М) – 70 тонн | Трубы 20х2,0х6000 мм (08Х18Н10Т) – 40 тонн |
|---|---|---|







СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

## Предлагаемые технологии

### Технология витых трубок



### Проволочные интенсификаторы



Сохранение ресурсов - Возврат инвестиций - Шаг к декарбонизации

СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

# Бенефиты от внедрения технологий СТИМ:

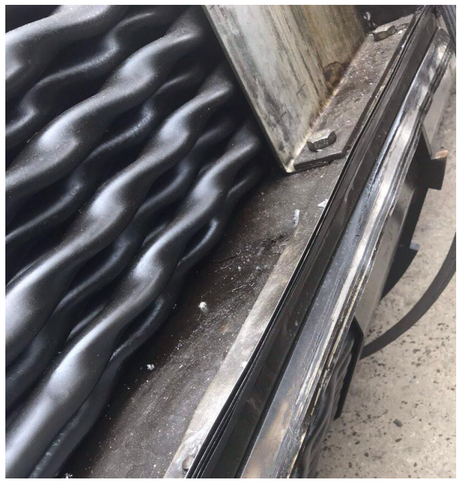
Повышение глубины рекуперации

Снижение загрязнений

Максимальная эффективность на длительном цикле эксплуатации

Эффекты от внедрения, установка АТ (с янв.2018 года):

- ✓ ~ 120 млн рублей в год от увеличения рекуперации (за 6 лет → 720 млн). Окупаемость проекта - 1,5 года.
- ✓ 6 лет работы без чисток без падающего тренда.



Улучшение охлаждения (концевые холодильники, АВО) → Холодильник керосина (с июля 2022 г.)

Снижение потерь от недостаточного охлаждения в летний период.

Увеличение производительности → Ребойлер для ГФУ с 2023 года:

Увеличение производительности на 40%

СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

# Компетенции в области проектирования и изготовления теплообменников с витыми трубками

- ✓ Собственная методика расчета
- ✓ Собственное конструирование
- ✓ Собственное производство витой трубы
- ❖ Изготовление витой трубы/ теплообменников / пучков



СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

# Доступные материалы и конструкции

1) Конструктив теплообменных аппаратов с витыми трубками:

Теплообменники или пучки с плавающей головкой / U – образные пучки

Теплообменники жесткотрубные

2) Марки стали труб:

Углеродистая сталь / Жаропрочные стали (ХМ) /Нержавеющие стали/Дуплексные стали.

3) Размер труб

Диаметр: 16, 20, 25 мм / Толщина: 2.0, 2.5, 3.0 мм /Длина до 21 м.



# Проблематика применения витых трубок в условиях освоения технологии в РФ

## Аргументы для внедрения

I. Применение витых труб дает экономический эффект от внедрения (снижение CAPEX и OPEX).

II. Длительный опыт и широкое распространение в мире на различных применениях.

## Что лимитирует:

i. Технология подробно не описана в литературе;

ii. Нормативная/справочная документация РФ (ГОСТ, ТУ, РД, РТМ) и международные стандарты (ASME, API, TEMA) ограничено(обобщенно) описывает подходы к работе с витой или профилированной трубой;

iii. Различные подходы и понимание научной школы РФ и других стран к вопросам снижения рисков коррозии после профилирования

## Неудачные практика применения витых трубок

**Витая трубка трубного пучка парогенератора установки каталитического крекинга (FCC)**

**Основные технические характеристики парогенератора:**

**рабочее давление, МПа**

- сторона кожуха –4,5
- сторона трубок –0,9;

**рабочая температура, °С:**

- сторона кожуха –121÷258
- сторона трубок –288÷360;

**рабочая среда:**

- сторона кожуха –вода/пар;
- сторона трубок –кубовый продукт КК.

**Вид поверхности трубки парогенератора**





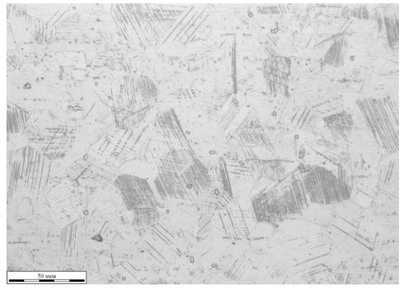
# Результаты исследования витой трубы после выхода из строя

## Химический состав стали:

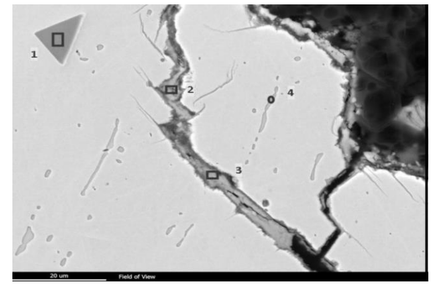
| Массовая доля элементов, % | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **C** | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Al | Co | Cu | V | Nb | N | Ti |
| **0,039** | 0,43 | 1,01 | 0,035 | <0,005 | 17,6 | 9,42 | 0,457 | 0,013 | 0,190 | 0,26 | 0,085 | 0,034 | 0,009 | 0,33 |
| **Требования ASTM A249 для стали TP321, не более** | | | | | | | | | | | | | | |
| **0,08** | 1,00 | 2,00 | 0,045 | 0,030 | 17,0-19,0 | 9,0-12,0 | – | – | – | – | – | – | 0,10 | 5(C+N)-0.70 или 0,24-0,70 |

Отклонений химического состава металла разрушив-шейся трубки от требований нормативной документации не выявлено.

**Микроструктура металла**



**Вид трещин в металле трубки**

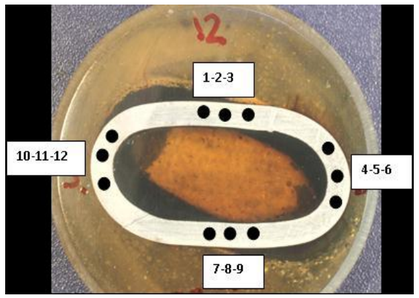





## Измерение микротвердости HV (Труба электросварная):

| Значение твердости (среднее), HV 100 | | | |
|---|---|---|---|
| **на 3 часа** | **на 6 часов** | **на 9 часов** | **на 12 часов** |
| **323** | **362** | **332** | **349** |
| **Требования ASTM A249, не более 188HV** | | | |

Металл поврежденной трубки не соответствует требованиям нормативной документации по твердости.




Выводы:

Разрушение витой трубки трубного пучка парогенератора произошло из-за развития коррозионного растрескивания под напряжением. Вероятными причинами, которые способствовали развитию коррозионного растрескивания являются:

- **наличие щелочной среды**, контактирующей с внешней поверхностью трубки;
- **не соответствие металла трубки** требованиям ASTM A249 а именно: ее холодная деформация в процессе изготовления без последующей термической обработки, и **значения твердости**, существенно **превышающие регламентированные стандартом**.

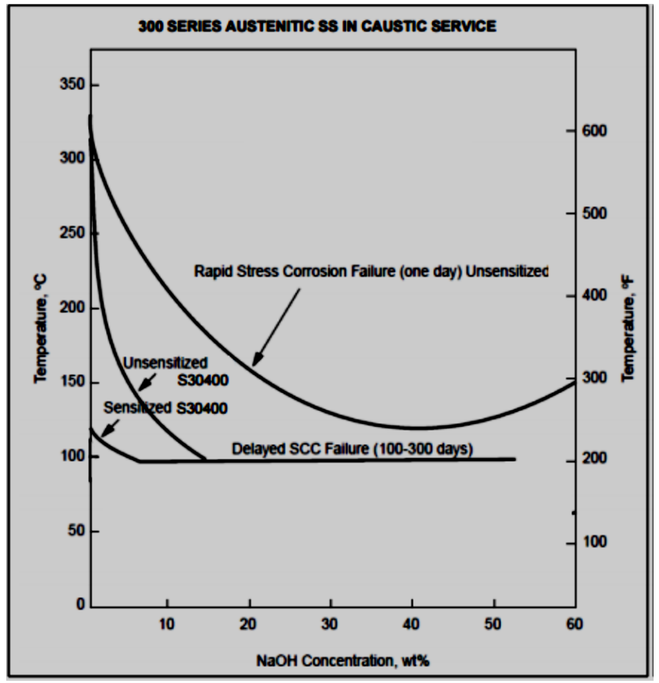



**Диаграмма влияния концентрации щелочи и температуры для сталей 300 серии (NACE SP040315)**

Следует отметить, что при температурах около 250°C для развития щелочного растрескивания достаточно очень малых концентраций щелочи в рабочей среде.

При этом следует принимать во внимание выявленный наклеп и повышенную твердость стали.

# Исследование характеристик витой трубы ООО «СТИМ»

| Свойства | Материал стали | | Примечание |
|---|---|---|---|
| | 08Х18Н10Т | 08Х22Н6Т (Дуплекс) | |
| Вид стали | аустенитная | аустенитно-ферритная | |
| Твердость HV – Исходная (до профилирования) | 188-241 | 253-277 | На основании лабораторных испытаний |
| Твердость HV – Витая (после профилирования) | 235-303 (+25%) | 291-332 (+20%) | Металл упрочняется (признак наличия напряжений)<br>Рекомендации по твердости:<br>Для стали 08Х18Н10Т ≤ 250 HV<br>Для стали 08Х22Н6Т ≤ 310 HV |
| Стойкость к МКК Витая (не термообработанная) | Стойкая | Стойкая | Метод АМУ по ГОСТ 6032 |
| Стойкость к СКРН (не термообработанная) | Стойкая | Стойкая | СКРН ПО СТАНДАРТУ NACE TM0177 |
| Вывод | 1. Профилирование приводит к повышению твердости в следствии наклепа (признаки наклепа).<br>2. Профилирование не влияет на ухудшение стойкости к МКК и КР | | |

**Условия для снятия напряжений после скручивания**

Согласно ГОСТ 34347-2014 (п.п. 5.11.4; 5.11.7) термообработка требуется:

- Для аустенитных сталей, предназначеннных для работы в средах, вызывающих КР, а также при температурах выше 350 °С средах, вызывающих МКК
- Элементы выполненные из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса методом холодной штамповки или холодным фланжированием, следует подвергать термической обработке, если они предназначены для работы в средах, вызывающих КР.

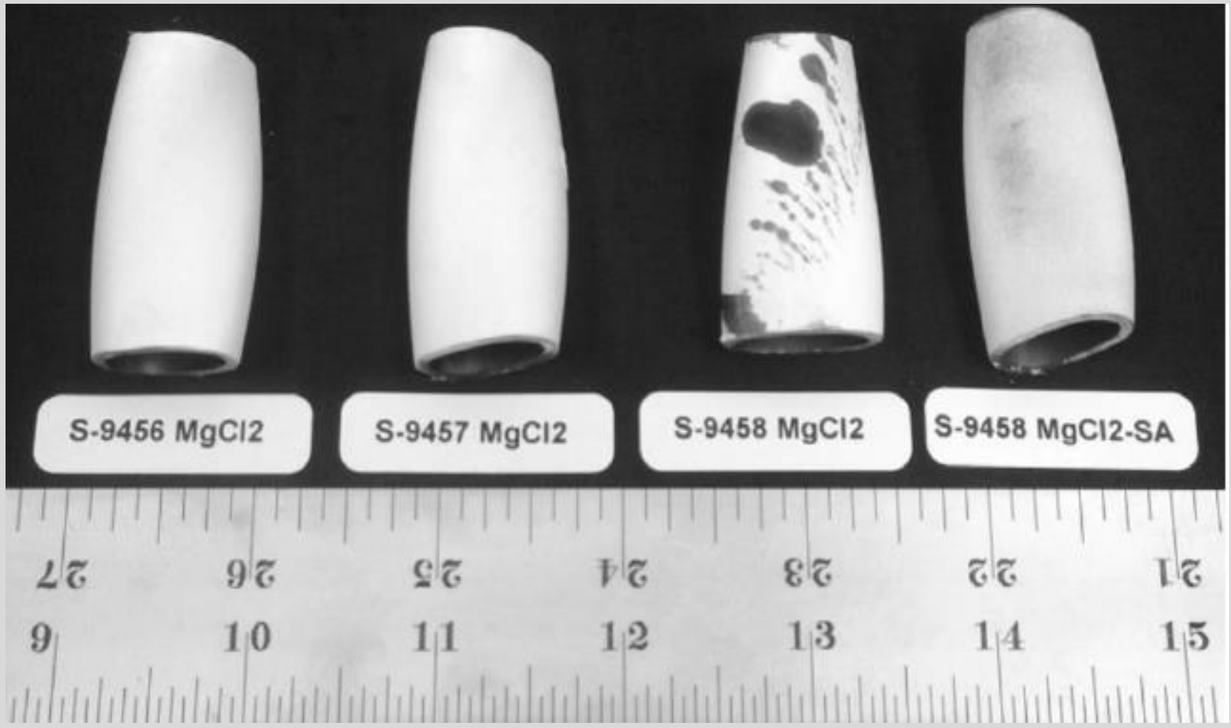
В остальных случаях термообработку допускается не проводить, если относительное удлинение при растяжении в исходном состоянии металла не менее 30 % при степени деформации в холодном состоянии не более 15 %.

# Исследование характеристик витой трубы ООО «СТИМ»

- **Международный опыт (Публикация NACE Corrosion 2009 Paper #09338), тезисы:**
- Термообработка не требуется Согласно ASME (2) Code 1, если:
- Расчетная температура не превышает 540°C (1000°F), а деформация материала превышает 15%.
- Сохранялось опасение, что отсутствие термообработки после скручивания увеличит риск образования хлоридного КР в процессе эксплуатации. Отчасти это объяснялось тем, что широко распространены случаи образования КР на нетермообработанных U-образных отводах стали серии 300.

Лабораторные исследования показали:

- **<u>Витые трубки с термообработкой - не подвержены хлоридному КР</u>**
- Витые трубки без термообработки – подвержены хлоридному КР




Образцы скрученных трубок из нержавеющей стали 321 через 5 часов при 155°C, кипящем 42% MgCl2.

**<u>Трещины в образце S-9458 (без термообработки) выделены пенетрантом.</u>**

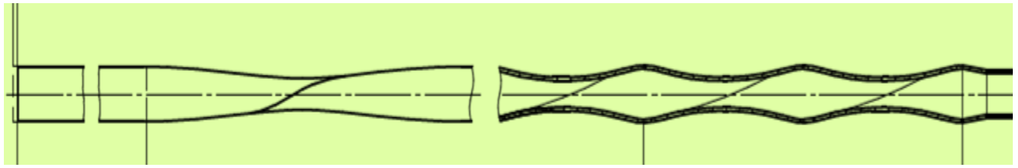
Никаких существенных трещин не наблюдалось в отожженных на раствор образцах S-9456 и S-9458-SA, а также в стабилизированном образце S-9457.

# Исследование характеристик витой трубы ООО «СТИМ»

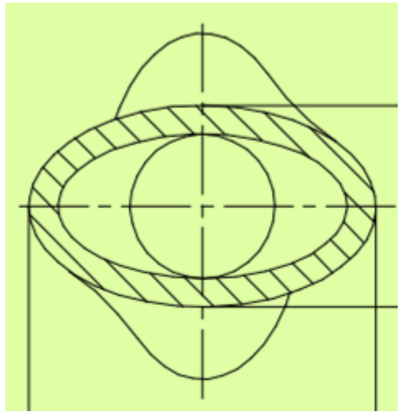
Для исключения рисков возникновения коррозии под напряжением были проведены исследования, в области:

## 1. Определение и снижения степени деформации

Продольный профиль витой трубы



Поперечное сечение профиля.





## 2. Разработка режима термической обработки

Внешний вид трубы гладкого профиля




Внешний вид трубы витого профиля



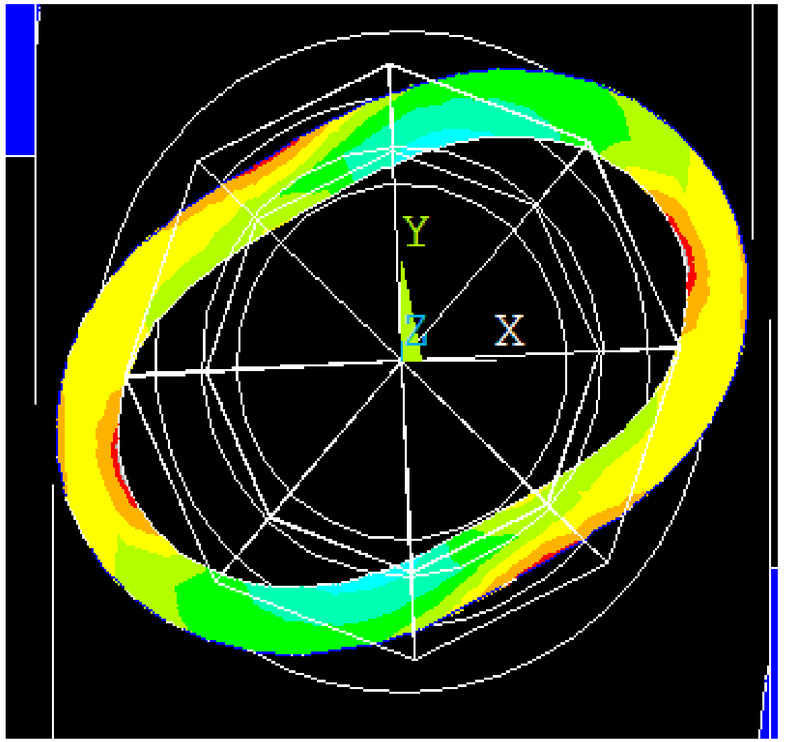
СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

# Определение и снижения степени деформации

## Результат исследования

1. Степень деформации определена математическим моделирование (методом конечных элементов) на программе Ansys на основании существующей геометрии профиля (сумма влияния овализации и кручения)
2. Максимальное значение степени деформации составило 14,58%
3. Разработан новый тип профиля со сниженной степенью деформации до 12,5

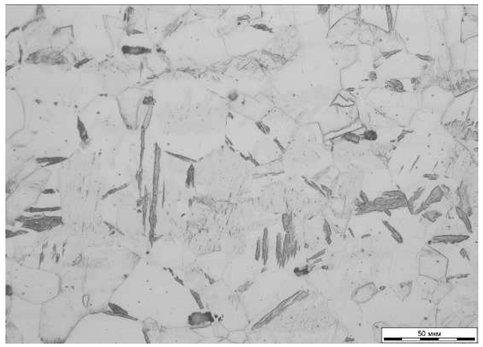




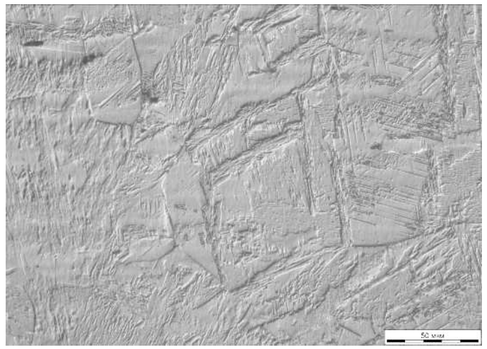

# Разработка режима термической обработки

## Влияние термической обработки на микроструктуру металла труб из стали 08Х18Н10Т

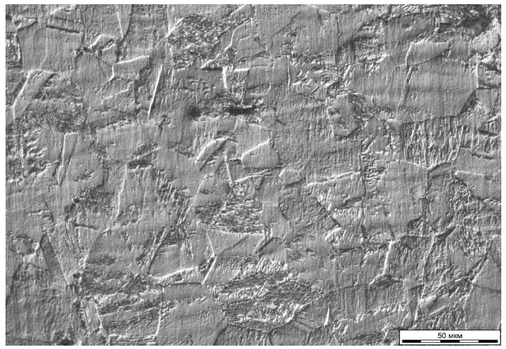
труба до профилирования
159 HV $\sigma_B$=686 МПа $\sigma_T$=369 МПа



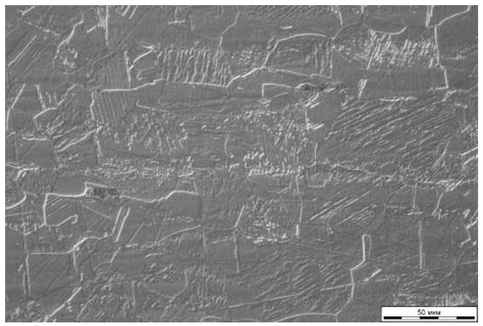
Витая труба после ТО по режиму аустенитизация (Нагрев до 1050°С, выдержка 40 мин., охлаждение в воду)
169 HV $\sigma_B$=626 МПа $\sigma_T$=330 МПа



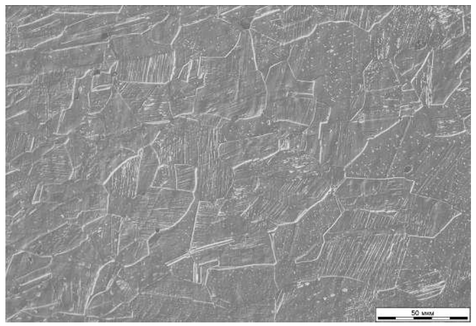
Витая труба после ТО по режиму высокотемпературный отжиг (Нагрев до 900°С, выдержка 4 ч., охлаждение в печи до 300°С, охлаждение на воздухе) 147 HV $\sigma_B$=671 МПа $\sigma_T$=366 МПа



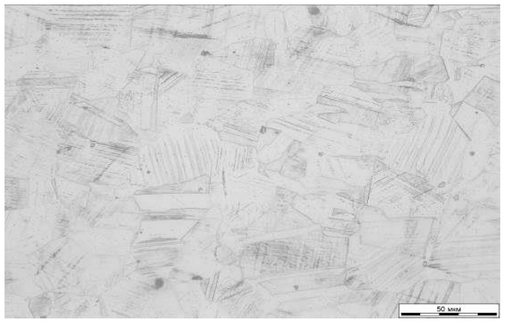
Витая труба без ТО
215 HV $\sigma_B$=778 МПа $\sigma_T$=587 МПа



Витая труба после ТО по режиму низкотемпературный отпуск (Нагрев до 390°С, выдержка 2ч, охлаждение на воздухе) 194 HV

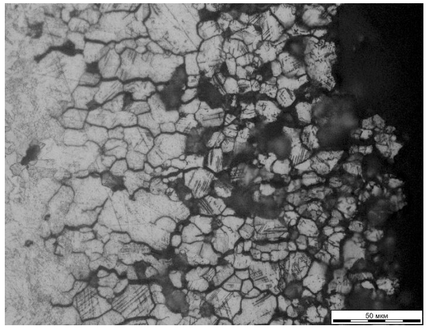


Витая труба после ТО по режиму высокотемпературный отпуск (Нагрев до 600°С, выдержка 1ч, охлаждение на воздухе) 192 HV

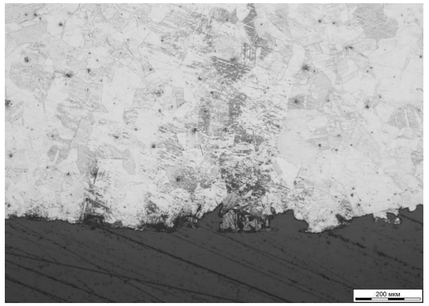


# Разработка режима термической обработки

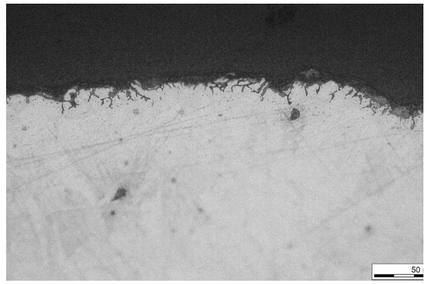
| Вид изделия | Режим термообработки | Стойкость металла к МКК по ГОСТ 6032, метод АМУ с последующим сплющиванием, длина трещин | Стойкость к СКРН по NACE 0177, метод С. Пороговое напряжение, % от $\sigma_{T\ min}$ | Стойкость к хлоридному растрескиванию по ASTM G36 в среде $MgCl_2 6H_2O$, длина трещин |
|---|---|---|---|---|
| Труба до профилирования | - | 80мкм | >40 | 25 мкм растрескивание |
| Витой профиль | - | - | >40 | 25 мкм растрескивание |
| | ТО №1: Аустенитизация | 25мкм | >40 | 20 мкм, язвы |
| | ТО №2. Высокотемпературный отжиг | 10мкм | >40 | 15-25 мкм, растрескивание |
| | ТО №3: Низкотемпературный отпуск | - | >40 | - |
| | ТО№4. Высокотемпературный отпуск | - | >40 | - |




**Характерный вид межзеренных трещин, после испытаний на МКК. Витая труба после ТО по режиму низкотемпературный отпуск(Нагрев до Т=390˚, выдержка 2часа., охлаждение на воздухе)**




**Характерный вид поверхности С-колец после испытаний на СКРН. Витая труба после ТО по режиму аустенитизация (Нагрев до Т=1050˚, выдержка 40мин., охлаждение в воде)**




**Характерный вид поверхности после испытаний на стойкость к коррозионному хлоридному растрескиванию по ASTM G36. Витая труба после ТО по режиму высокотемпературный отжиг. (Нагрев до Т=900˚, выдержка 4часа., охлаждение в печи до 300С)**

# Выводы

1. Применение витых трубок является перспективным направлением технических улучшений теплообменных аппаратов, т.к. они дают экономический эффект. Данная технология имеет широкое распространение и многолетний опыт эксплуатации. Влияние профилирования на стойкость к коррозии многократно исследовалась.
2. Проведенные лабораторные исследования по влиянию различных режимов термической обработки витых труб из стали 12Х18Н10Т на механические и коррозионные свойства показали:

- -профилирование труб повышает прочностные свойства металла труб, что увеличивает вероятность развития коррозионного растрескивания в агрессивных средах;
- -проведение ТО по всем предложенным режимам понижает прочностные свойства, твердость менее 20 ед. HRC, в результате чего выполняются требования НТД;
- -рекомендуемыми режимами термической обработки для труб из аустенитной стали 08Х18Н10Т является: аустенитизация при 1050°С или высокотемпературный отжиг. В результате термической обработки формируется однородная структура с полиэдрической формой зерен, которая обеспечивает высокий уровень коррозионной стойкости к СКРН, стойкость к МКК и хлоридному растрескиванию.

3. Для снижения рисков эксплуатации нержавеющих аустенитных сталей в условиях коррозионного растрескивания трубы после профилирования необходимо подвергать термической обработки по режиму аустенизации или стаблизирующего отжига.

СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

**Всегда с вами!!!**

e-mail: office@stim-he.ru

сайт: https://stim-he.ru/



**Сохранение ресурсов - Возврат инвестиций - Шаг к декарбонизации**

МИСИС УНИВЕРСИТЕТ

НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ РОССИИ

НАУКА И УНИВЕРСИТЕТЫ

# Исследование локальной и общей коррозии сталей с различным содержанием хрома

**Дмитрий Кудашов**
К.т.н., директор филиала МИСИС

Место проведения: ИТ-Сервис, г. Самара

Дата проведения: 2-4 сентября 2024 г.

# Методика проведения испытаний

МИСИС УНИВЕРСИТЕТ
ГИБРИДНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ РОССИИ
НАУКА И УНИВЕРСИТЕТЫ

**Типичный вид образцов для испытаний:**

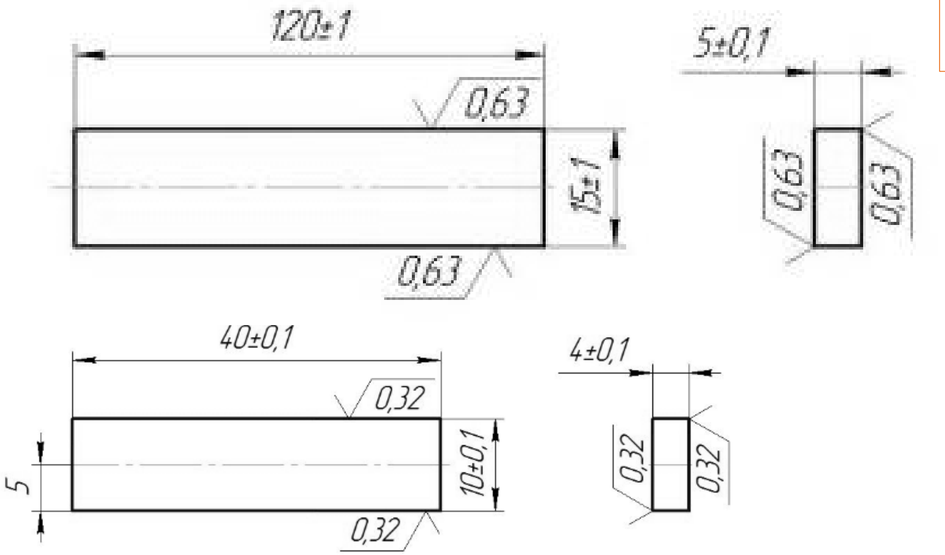



**Схема установки для проведения коррозионных испытаний на общую коррозию по методике ООО «ИТ-Сервис»**

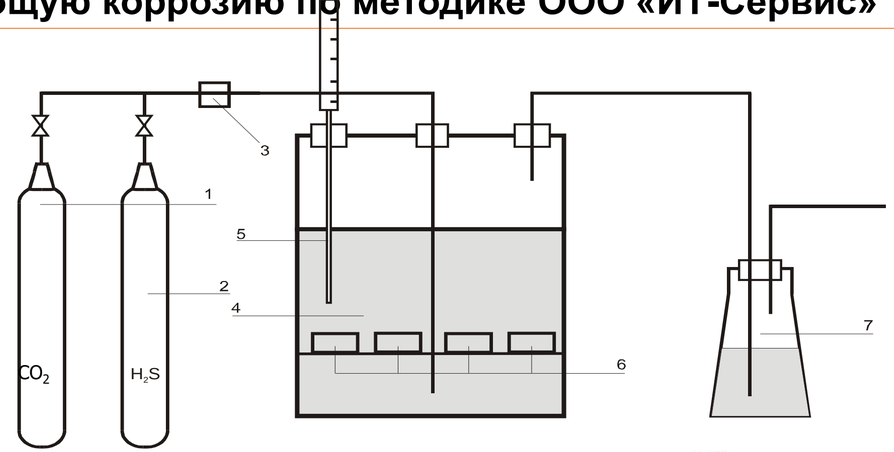
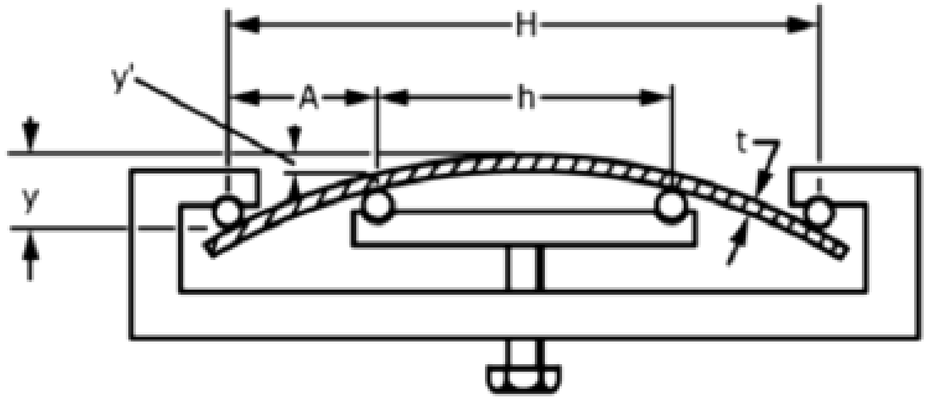
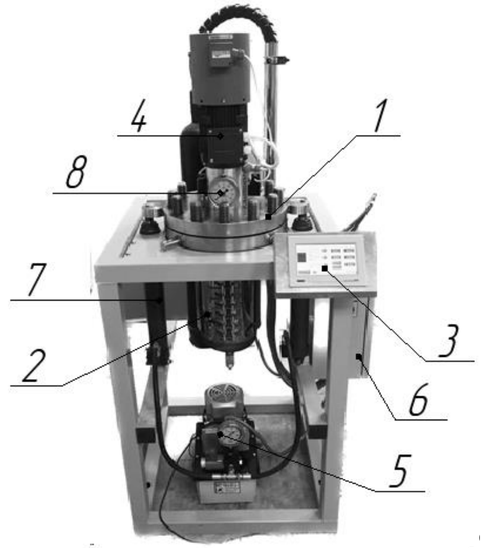



**Схема нагружения образцов для испытания на стойкость к СКРН по ASTM G39 (метод четырёхточечного изгиба)**




**Вид автоклавной установки «РВД»**



# Влияние класса прочности стали 08Х1Г на коррозионную стойкость в сложных многокомпонентных агрессивных средах, содержащих одновременно $CO_2$ и $H_2S$.

МИСИС УНИВЕРСИТЕТ
ГИБРИДНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ РОССИИ
НАУКА И УНИВЕРСИТЕТЫ

**Объекты исследования:**

**Сталь 08Х1Г после закалки с 910 °С**

**И отпуска при Т от 550 до 750 °С**

| Сталь | Массовая доля элементов, % | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Cu | Al | Nb | V | Ti |
| **08Х1Г** | 0,07 | 0,23 | 0,72 | 0,014 | 0,012 | 1,10 | <0,01 | 0,15 | 0,17 | 0,009 | 0,05 | 0,04 | 0,004 |

| Марка стали | $T_{закалки}$ | $T_{отпуска}$ | Класс прочности | Прочностные свойства | | | Твердость (HV) | $KCV_{-60}$, Дж/см$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $\sigma_т$, МПа | $\sigma_{В}$, МПа | $\delta_5$, % | | |
| 08Х1Г<br>Рсм = 0,18<br>$Ac_1$ = 739 °С<br>$Ac_3$ = 894 °С | 910-920 вода-ванна | Закалка без отпуска | - | 683 | 920 | 15 | - | - |
| | | 550 | L80 | 644 | 733 | 16 | 248 | 236 |
| | | 600 | K60 | 611 | 696 | 18 | 241 | 244 |
| | | 650 | | 499 | 600 | 20 | 225 | 307 |
| | | 680 | | 533 | 611 | 19 | 207 | 296 |
| | | 700 | K56 | 545 | 600 | 21 | 213 | 308<br>313 |
| | | 720 | K56 | 488 | 570 | 21 | 186 | 326 |
| | | 750 | K52 | 455 | 549 | 26 | 176 | 346 |

# Результаты коррозионных испытаний стали 08Х1Г различных классов прочности

| Класс прочности | Скорость коррозии мм/год | Условия испытаний | Параметры среды | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | T, °C | pH | концентрация H2S, мг/л | концентрация CO2, мг/л |
| К60 | 0,47 | 5%NaCl Рпарц. CO2 1 атм | 20 | 4,07-5,42 | - | 770 - 1650 |
| К56 | 0,44 | | | | | |
| К52 | 0,43 | | | | | |
| К60 | 0,16 | 5%NaCl Рпарц. CO2 0,9 атм Рпарц. H2S 0,1 атм | 20 | 4,04-4,90 | 229-187 | - |
| К56 | 0,16 | | | | | |
| К52 | 0,17 | | | | | |
| К60 | 0,26 | 5%NaCl Рпарц. CO2 0,5 атм Рпарц. H2S 0,5 атм | 20 | 4,13-4,60 | 1120-1430 | |
| К56 | 0,27 | | | | | |
| К52 | 0,27 | | | | | |
| К60 | 0,22 | 5%NaCl Рпарц. CO2 1 атм | 50 | 4,09-5,30 | - | 858-847 |
| К56 | 0,22 | | | | | |
| К52 | 0,24 | | | | | |

# Результаты коррозионных испытаний стали 08Х1Г

| Объекты испытаний | Условия испытаний | Скорость коррозии, м/год | Параметры среды | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | T, °C | pH | концентрация H2S, мг/л | концентрация CO2, мг/л |
| **закалка + отпуск 550** | 5%NaCl Рпарц. CO2 0,5 атм Рпарц. H2S 0,5 атм. | 0,16 | 50 | 4,23-4,76 | 929 - 1047 | - |
| **закалка + отпуск 600** | | 0,18 | | | | |
| **закалка + отпуск 650** | | 0,17 | | | | |
| **закалка + отпуск 550** | 25%NaCl Рпарц. CO2 0,5 атм Рпарц. H2S 0,5 атм. | 0,06 | 50 | 4,61-4,53 | 946-997 | - |
| **закалка + отпуск 600** | | 0,05 | | | | |
| **закалка + отпуск 650** | | 0,06 | | | | |
| **закалка + отпуск 550** | 5%NaCl Рпарц. CO2 0,9 атм Рпарц. H2S 0,1 атм. | 0,30 | 50 | 3,85-5,08 | 113-225 | - |
| **закалка + отпуск 600** | | 0,29 | | | | |
| **закалка + отпуск 650** | | 0,30 | | | | |
| **закалка + отпуск 550** | 25%NaCl Рпарц. CO2 0,9 атм Рпарц. H2S 0,1 атм. | 0,11 | 50 | 4,03-4,81 | 111-164 | |
| **закалка + отпуск 600** | | 0,11 | | | | |
| **закалка + отпуск 650** | | 0,12 | | | | |

# Химический состав продуктов коррозии образца из стали 08Х1Г после различных режимов термической обработки после испытаний в среде 25%NaCl водного раствора при температуре 50°С насыщенного смесью газов 50%$CO_2$+50%$H_2S$ при атмосферном давлении

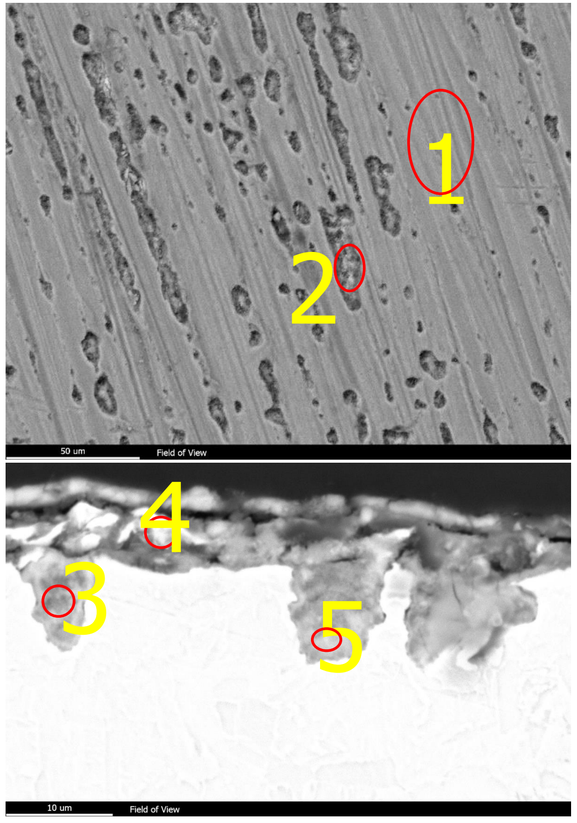
МИСИС УНИВЕРСИТЕТ

ГИБРИДНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ РОССИИ

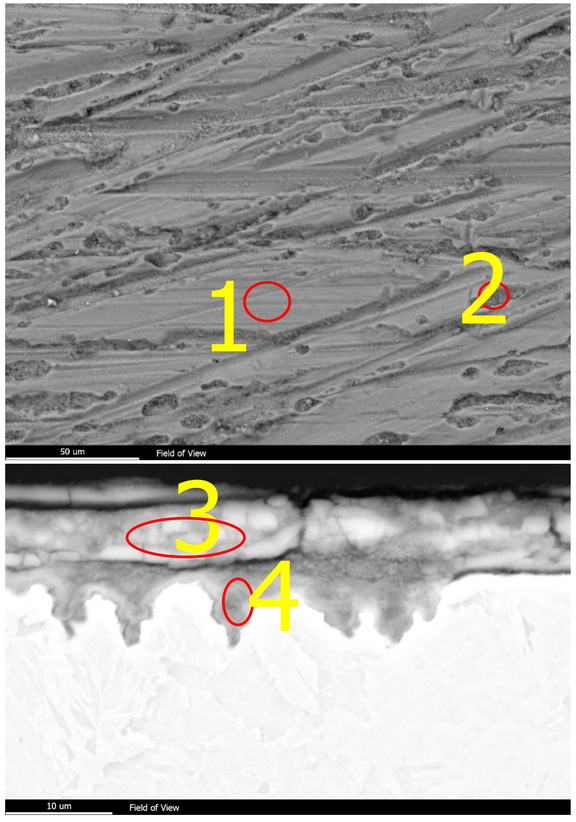
НАУКА И УНИВЕРСИТЕТЫ

### Закалка + отпуск 550С



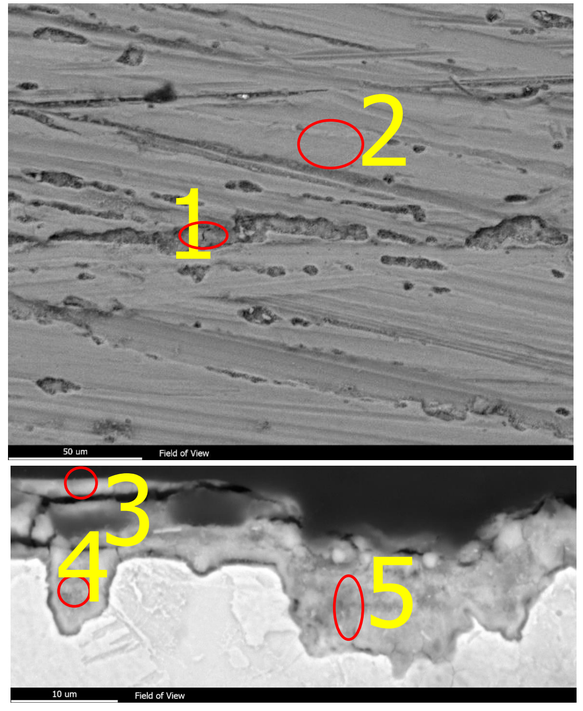

| № | O | Si | S | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 02,77 | - | 21,96 | 01,39 | 00,63 | ост |
| 2 | 06,93 | - | 27,45 | 02,06 | 00,35 | ост |
| 3 | 7,61 | - | 26,28 | 1,09 | - | ост |
| 4 | 4,85 | 0,31 | 3,88 | 1,32 | 0,71 | ост |
| 5 | 6,00 | - | 25,54 | 1,04 | 0,4 | ост |

### Закалка + отпуск 600С




| № | O | Si | S | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 07,93 | 01,13 | 28,08 | 02,36 | 00,28 | ост |
| 2 | 06,10 | - | 26,43 | 02,44 | 00,46 | ост |
| 3 | 4,12 | - | 21,96 | 2,16 | - | ост |
| 4 | 1,91 | - | 19,06 | 1,21 | - | ост |

### Закалка + отпуск 650С

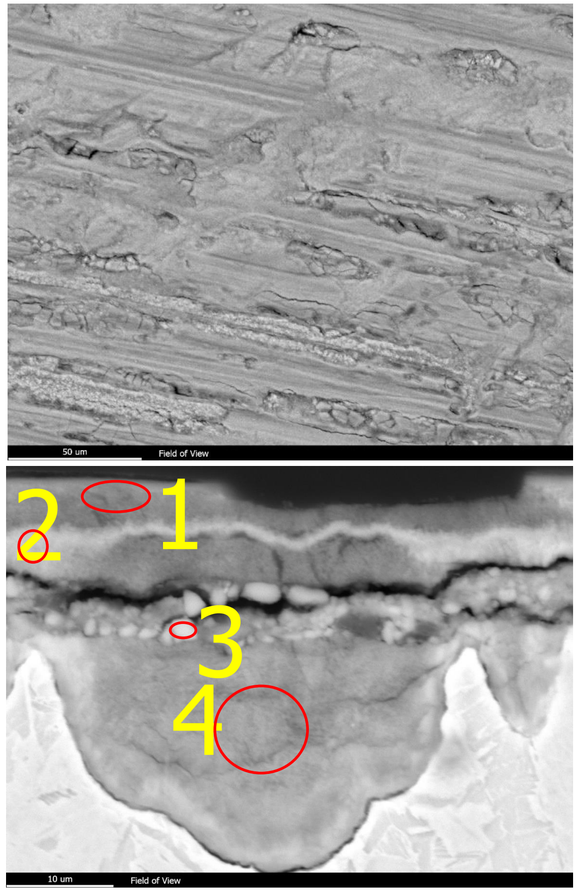



| № | O | Si | S | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 05,21 | - | 28,88 | 01,82 | 00,46 | ост |
| 2 | 05,64 | - | 28,48 | 02,11 | 00,32 | ост |
| 3 | 6,76 | - | 15,21 | 1,09 | - | ост |
| 4 | 7,58 | - | 28,69 | 1,15 | - | ост |
| 5 | 8,97 | 0,53 | 19,50 | 1,08 | - | ост |

# Химический состав продуктов коррозии образца из стали 08Х1Г после различных режимов термической обработки после испытаний в среде 5%NaCl водного раствора при температуре 50°С насыщенного смесью газов 50%$CO_2$+50%$H_2S$ при атмосферном давлении

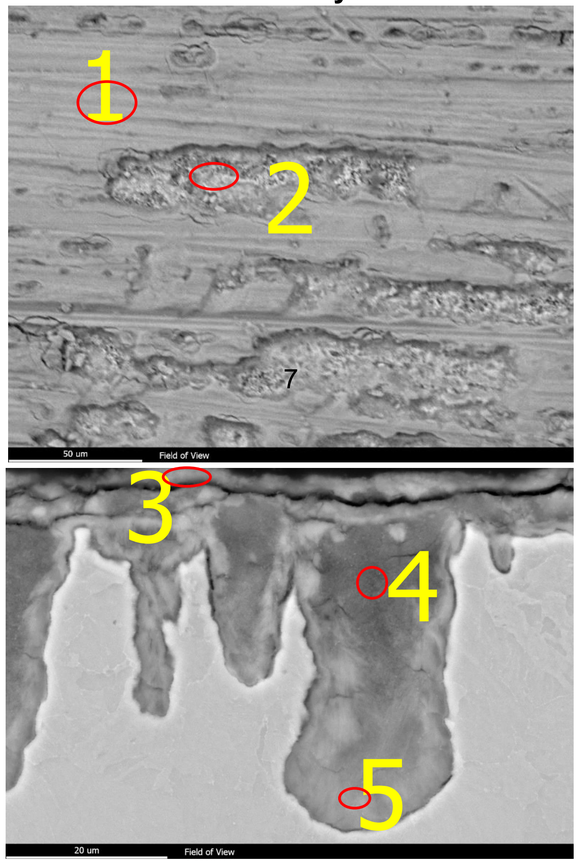
МИСИС УНИВЕРСИТЕТ
ГИБРИДНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ РОССИИ
НАУКА И УНИВЕРСИТЕТЫ

### Закалка + отпуск 550С



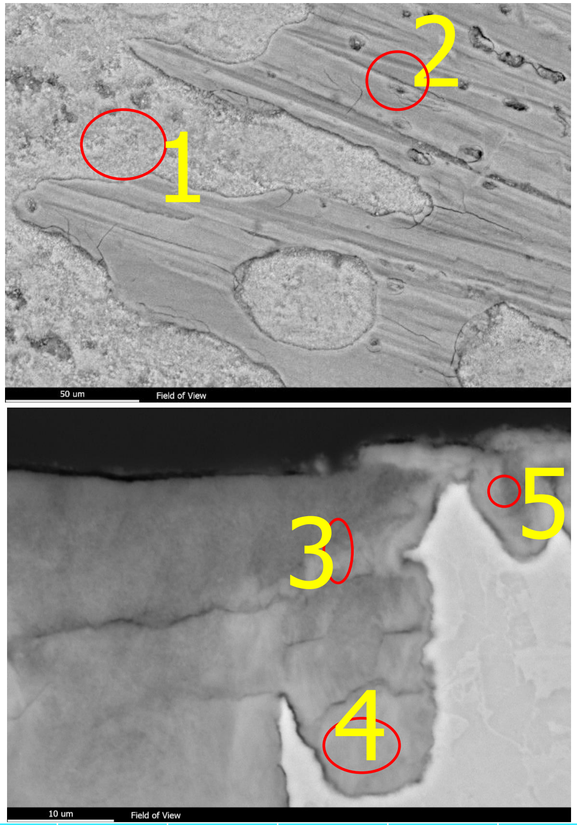

| № | O | S | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3,68 | 17,06 | 3,60 | - | ост |
| 2 | 2,68 | 22,53 | 2,71 | - | ост |
| 3 | 3,96 | 22,50 | 2,81 | 0,47 | ост |
| 4 | 2,64 | 23,00 | 2,23 | - | ост |

### Закалка + отпуск 600С




| № | O | S | Cl | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 08,02 | 30,57 | - | 04,02 | 00,40 | ост |
| 2 | 06,20 | 29,55 | - | 03,35 | 00,35 | ост |
| 3 | 02,33 | 14,88 | 01,01 | 00,51 | - | ост |
| 4 | 01,97 | 20,49 | - | 04,10 | - | ост |
| 5 | 02,11 | 23,45 | - | 01,98 | - | ост |

### Закалка + отпуск 650С

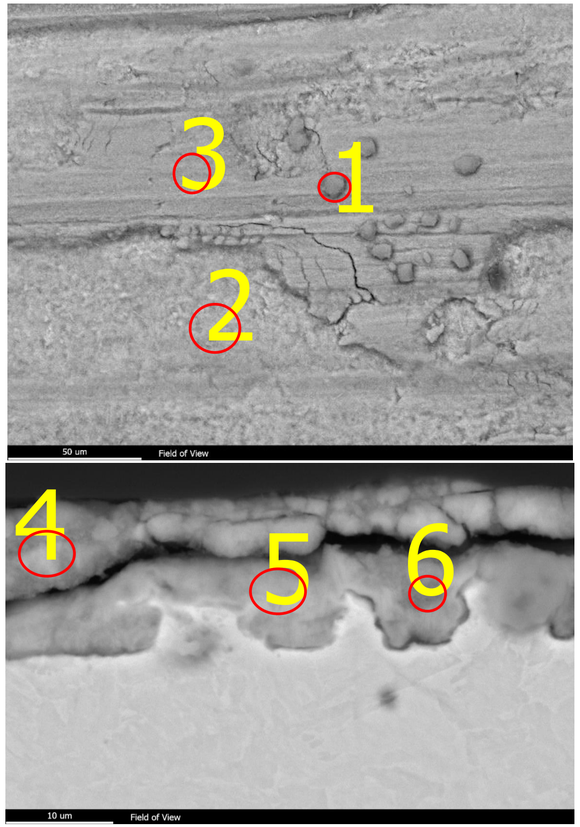



| № | O | S | K | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 05,78 | 31,02 | - | 02,09 | 00,39 | ост |
| 2 | 12,64 | 27,16 | - | 05,59 | 00,23 | ост |
| 3 | 03,38 | 18,90 | 00,69 | 03,86 | 00,30 | ост |
| 4 | 02,32 | 24,06 | - | 01,93 | - | ост |
| 5 | 02,19 | 21,25 | 00,91 | 02,71 | 00,27 | ост |

# Химический состав продуктов коррозии образца из стали 08Х1Г после различных режимов термической обработки после испытаний в среде 5%NaCl водного раствора при температуре 50°С насыщенного смесью газов 90%$CO_2$+10%$H_2S$ при атмосферном давлении

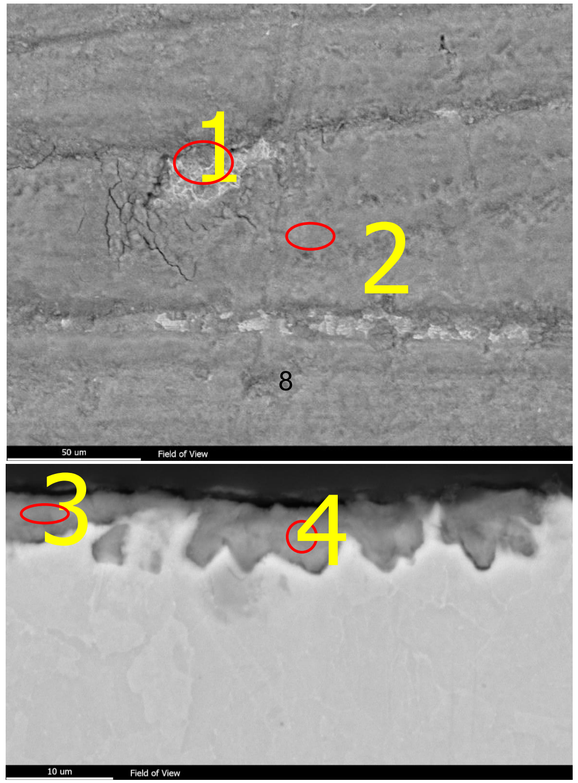
МИСИС УНИВЕРСИТЕТ
ГИБРИДНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ РОССИИ
НАУКА И УНИВЕРСИТЕТЫ

### Закалка + отпуск 550С



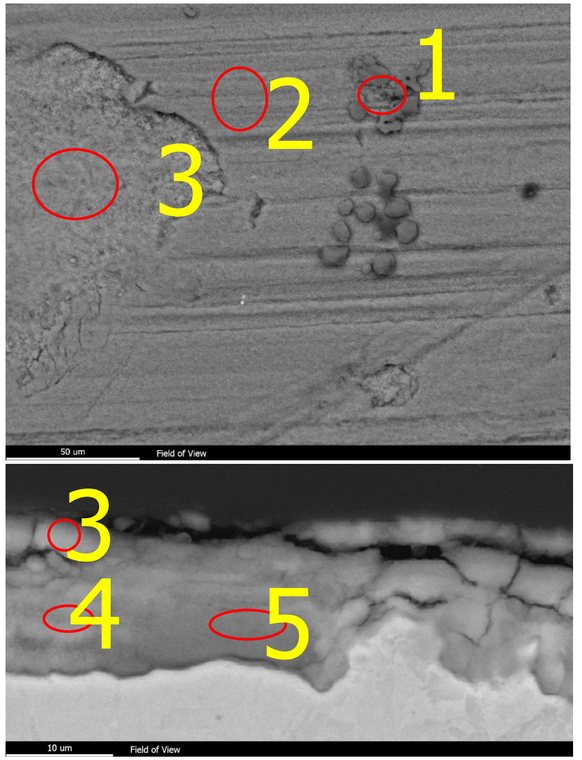

| № | O | S | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | - | 90,89 | - | | ост |
| 2 | 10,69 | 28,60 | 03,28 | 00,30 | ост |
| 3 | 14,21 | 25,30 | 03,96 | 00,33 | ост |
| 4 | 2,85 | 19,04 | 2,32 | 0,29 | ост |
| 5 | 2,30 | 18,83 | 1,84 | 0,55 | ост |
| 6 | 2,77 | 22,72 | 2,07 | - | ост |

### Закалка + отпуск 600С




| № | O | S | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 06,30 | 06,18 | 01,58 | 00,87 | ост |
| 2 | 09,29 | 28,43 | 03,00 | 00,42 | ост |
| 3 | 2,71 | 15,96 | 1,88 | 0,26 | ост |
| 4 | 2,40 | 14,31 | 1,96 | 0,28 | ост |

### Закалка + отпуск 650С




| № | O | S | K | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 08,00 | 50,97 | - | 03,42 | - | ост |
| 2 | 12,93 | 25,43 | - | 04,71 | 00,42 | ост |
| 3 | 09,36 | 29,40 | - | 02,98 | 00,42 | ост |
| 4 | 3,24 | 21,60 | - | 3,12 | 0,46 | ост |
| 5 | 3,53 | 15,41 | 0,55 | 2,01 | - | ост |
| 6 | - | 1,01 | - | 1,33 | 0,98 | ост |

# Химический состав и механические свойства сталей с различным содержанием хрома после выбранных режимов термообработки

МИСИС УНИВЕРСИТЕТ
ГИБРИДНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ РОССИИ
НАУКА И УНИВЕРСИТЕТЫ

| Образец | Массовая доля элементов, % | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Cu | Al | Nb | V | Ti | N |
| 2121_08Х2М | 0,09 | 0,22 | 0,32 | 0,013 | 0,011 | 1,90 | 0,13 | 0,15 | 0,17 | 0,17 | 0,05 | 0,05 | 0,012 | 0,007 |
| 2122_08Х2Г | 0,09 | 0,29 | 0,92 | 0,014 | 0,011 | 1,90 | <0,01 | 0,01 | <0,005 | 0,02 | 0,03 | <0,005 | 0,011 | 0,007 |
| 2151_08Х5Г | 0,07 | 0,25 | 0,90 | 0,014 | 0,012 | 5,00 | <0,01 | 0,02 | <0,005 | 0,01 | 0,04 | <0,005 | 0,04 | 0,007 |
| 219_10Х9МНФБ | 0,07 | 0,31 | 0,55 | 0,012 | 0,005 | 8,88 | 1,05 | 0,40 | 0,006 | 0,013 | 0,09 | 0,22 | 0,018 | - |
| 20 сталь сравнения | 0,18 | 0,20 | 0,52 | 0,012 | 0,013 | <0,005 | <0,01 | 0.009 | 0.01 | <0,005 | - | - | - | - |

| Марка стали | Режим ТО | Класс прочности | Прочностные свойства | | | Твердость (HV) | $KCV_{-60}$, Дж/см$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $\sigma_т$, МПа | $\sigma_в$, МПа | $\delta_5$, % | | |
| 08Х2М | закалка+ отпуск 650 | L80 | 609 | 679 | 19 | 220 | 285 |
| 08Х2Г | закалка+ отпуск 650 | L80 | 581 | 656 | 18 | 222 | 271 |
| 08Х5Г | закалка+ отпуск 650 | К60 | 505 | 632 | 20 | 208 | 204 |
| 10Х9МНФБ | закалка+ отпуск 750 | L80 | 590 | 718 | 18 | 232 | 107 |

# Влияние химического состава и режимов термической обработки различных сталей на коррозионную стойкость в агрессивных средах

МИСИС УНИВЕРСИТЕТ
ГИБРИДНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ РОССИИ
НАУКА И УНИВЕРСИТЕТЫ

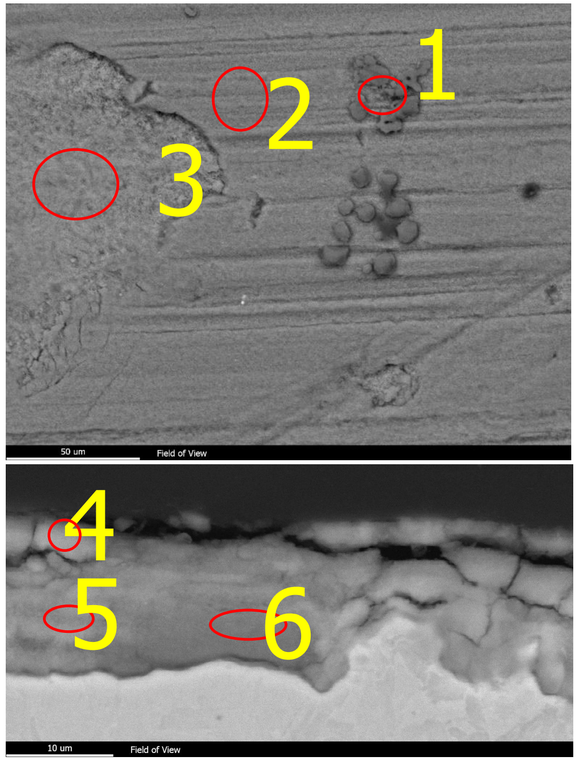
## Результаты коррозионных испытаний стали

| Объекты испытаний | Условия испытаний | Скорость коррозии, м/год | Скорость коррозии, м/год | Параметры среды | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Т, °С | pH | концентрация H2S, мг/л |
| 08Х2М (отп 650) | 5%NaCl Рпарц. CO2 0,9 атм Рпарц. H2S 0,1 атм | 0,22/0,22 | 0,22 | 50 | 4,25-5,01 | 93-153 |
| 08Х2Г (отп 650) | | 0,12/0,13 | 0,13 | | | |
| 08Х5Г (отп 650) | | 0,17/0,16 | 0,17 | | | |
| 10Х9МНФБ (отп 700) | | 0,0048/0,0068 | 0,0 | | | |
| Сталь 20 | | 0,28/0,27 | 0,28 | | | |

# Химический состав продуктов коррозии образца из различных марок сталей после термической обработки (ЗАКАЛКА + ОТПУСК 650С) после испытаний в среде 5%NaCl водного раствора при температуре 50°С насыщенного смесью газов 90% $CO_2$ и 10% $H_2S$ при атмосферном давлении

МИСИС УНИВЕРСИТЕТ
ГИБРИДНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ РОССИИ
НАУКА И УНИВЕРСИТЕТЫ

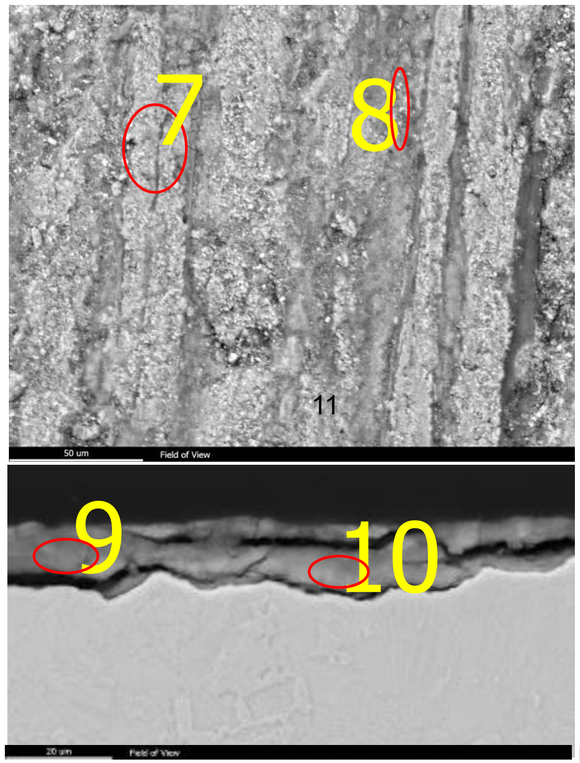
Сталь 08Х1Г







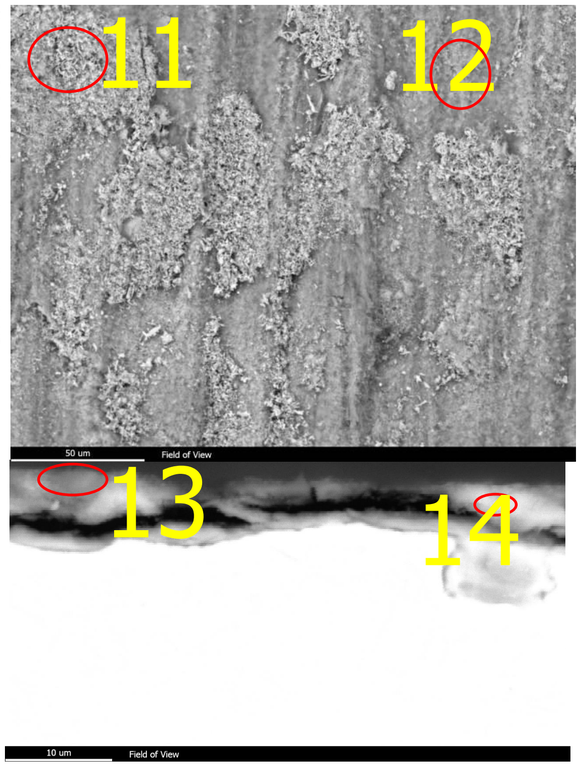
Сталь 08Х2М







Сталь 08Х2Г





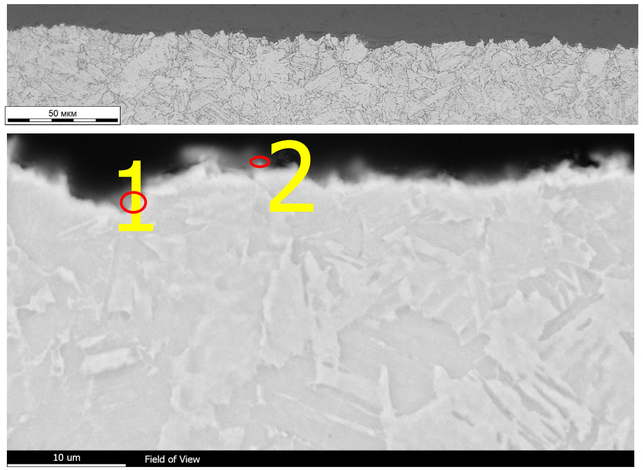


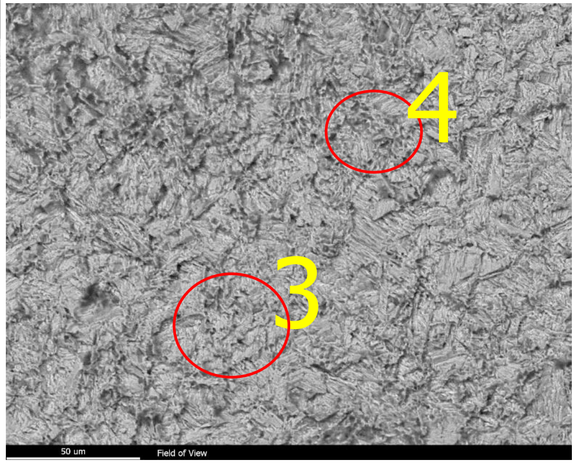
| № | O | Si | S | K | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 08,00 | - | 50,97 | - | 03,42 | - | Ост. |
| 2 | 12,93 | - | 25,43 | - | 04,71 | 00,42 | Ост. |
| 3 | 09,36 | - | 29,40 | - | 02,98 | 00,42 | Ост. |
| 4 | 03,24 | - | 21,60 | - | 03,12 | 00,46 | Ост. |
| 5 | 03,53 | - | 15,41 | 00,55 | 02,01 | - | Ост. |
| 6 | - | - | 01,01 | - | 01,33 | 00,98 | Ост. |
| 7 | 07,42 | - | 30,17 | - | 04,36 | 00,14 | Ост. |

| № | O | Si | S | K | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 10,94 | - | 25,60 | - | 08,22 | 00,25 | Ост. |
| 9 | 03,84 | 00,67 | 14,26 | 01,02 | 07,61 | - | Ост. |
| 10 | 04,35 | 00,72 | 17,25 | 00,82 | 08,85 | - | Ост. |
| 11 | 06,05 | 00,53 | 29,29 | - | 04,16 | 00,41 | Ост. |
| 12 | 12,33 | 00,99 | 24,17 | - | 07,75 | 00,63 | Ост. |
| 13 | - | -- | 02,38 | - | 02,55 | 01,27 | Ост. |
| 14 | 01,75 | | 04,34 | 00,68 | 03,24 | 01,31 | Ост. |

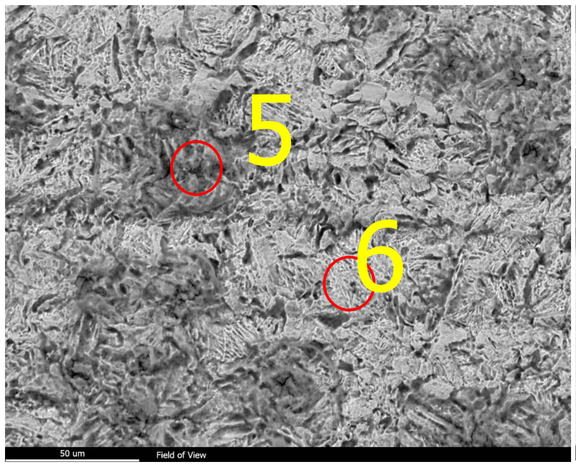
## 5%NaCl, 20°C 1 атм $CO_2$

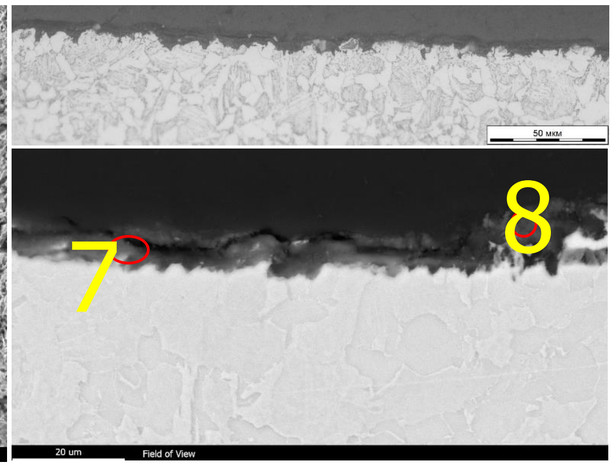
Закалка + отпуск 650С




## 5%NaCl, 50°C 1 атм $CO_2$




| № | O | Si | S | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.36 | - | - | 1.14 | 0.97 | Ост. |
| 2 | 1.63 | - | - | 1.30 | 0.98 | Ост. |
| 3 | 3.49 | 0.42 | 0.37 | 1.61 | 0.99 | Ост. |
| 4 | 3.88 | 0.32 | 0.48 | 1.82 | 1.11 | Ост. |

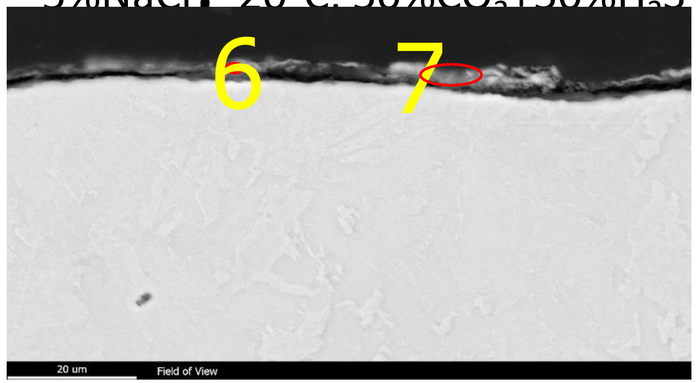
| № | O | Si | S | Cl | Ca | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | - | 0,55 | 0,92 | - | - | 2,24 | 0,82 | Ост. |
| 6 | - | - | 0,46 | - | - | 1,85 | 1,08 | Ост. |
| 7 | 4,44 | 0,58 | - | 0,39 | 0,60 | 4,76 | 0,79 | Ост. |
| 8 | 7,53 | 0,36 | - | 1,09 | 0,62 | 4,41 | 0,69 | Ост. |

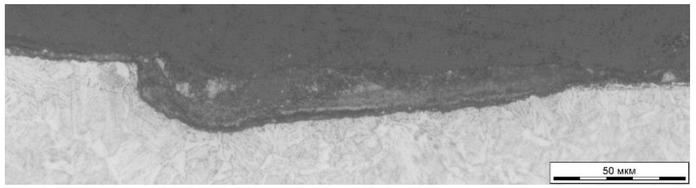
# Закалка + отпуск 650С

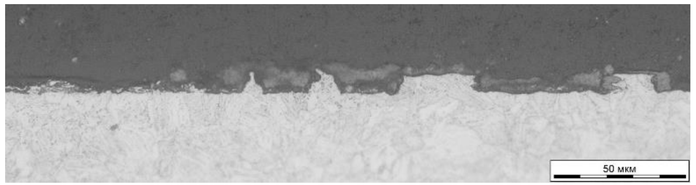
5%NaCl, 20°C, 90%$CO_2$+10%$H_2S$

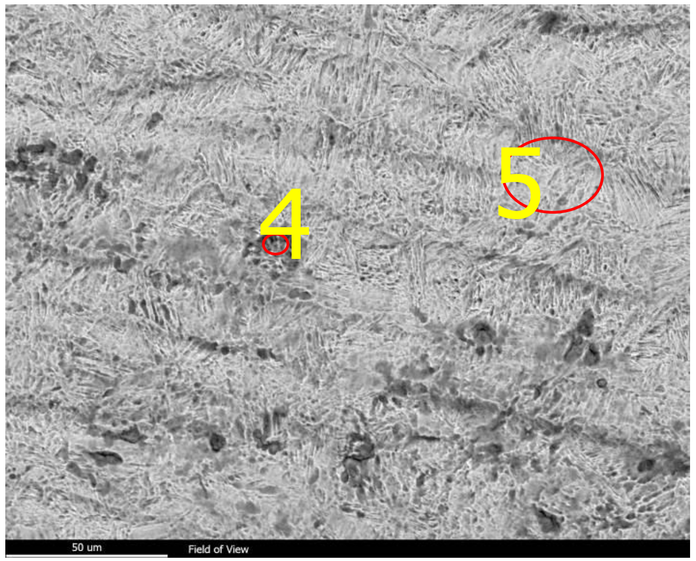


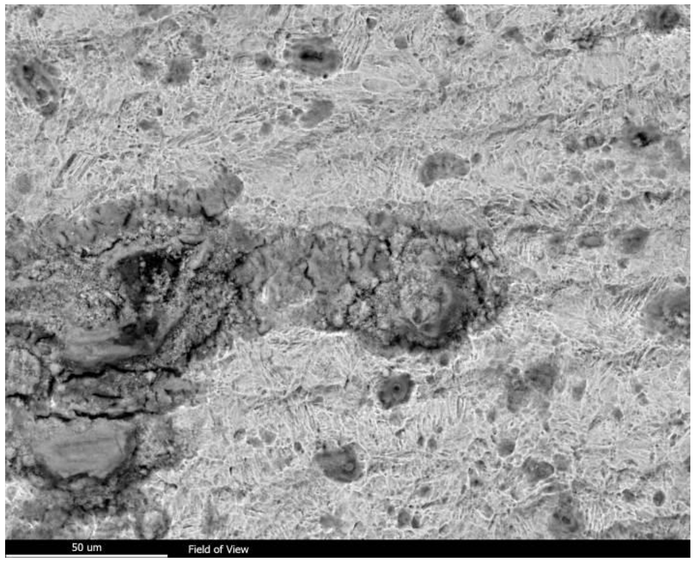

5%NaCl, 20°C, 50%$CO_2$+50%$H_2S$




| № | O | Si | S | K | Ca | Cl | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.14 | - | 5.55 | 0.35 | 0.34 | - | 2.62 | 1.23 | Ост. |
| 2 | 3.83 | - | 9.01 | 0.37 | 0.44 | - | 1.95 | 0.82 | Ост. |
| 3 | 4.23 | - | 14.23 | 0.53 | - | - | 2.57 | 0.62 | Ост. |
| 4 | 11.75 | 0.59 | 2.89 | - | - | - | 2.31 | 0.73 | Ост. |
| 5 | - | 0.59 | 1.13 | - | - | - | 1.52 | 1.03 | Ост. |
| 6 | 3,64 | 0,30 | 1,37 | - | - | - | 1.61 | 0.90 | Ост. |
| 7 | 3,32 | - | 0,52 | - | - | 0.72 | 0.88 | 0.64 | Ост. |

# Выводы

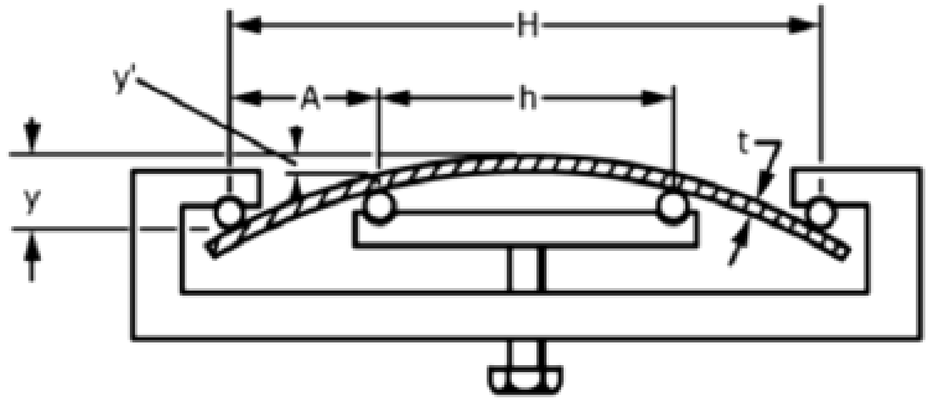
**Проведённые испытания и исследования сталей, содержащих Cr от 1,0 до 9,0масс.% , по оценке коррозионной стойкости в сложных $CO_2$ и $H_2S$-содержащих многокомпонентных средах, показали:**

1. Ведущим механизмом коррозии в средах, содержащих $CO_2$ и $H_2S$ одновременно является равномерная сульфидная коррозия, в результате которой на поверхности образца формируется защитная сульфидная пленка, снижающая скорость коррозии. Малые добавки $H_2S$ в модельную среду подавляют процесс углекислотной коррозии;
2. Повышение минерализации модельной среды с 5% до 25% NaCl приводило к резкому падению скорости коррозии для всех исследуемых условий;
3. Скорость общей коррозии в сложных $CO_2$ и $H_2S$-содержащих многокомпонентных средах практически НЕ зависит от температурного режима отпуска объемной термической обработки;
4. Легирование сталей Cr от 1,0 до 9,0 масс% приводит к снижению скорости общей коррозии в сложных $CO_2$ и $H_2S$-содержащих многокомпонентных средах по сравнению с нелегированной сталью 20. В интервале концентраций хрома от 2,0 до 5,0 масс% снижение скорости коррозии монотонное на 30-40%. При легировании хромом 9,0 масс% сталь становится пассивной в исследуемой среде, скорость коррозии составляет 0 мм/год;
5. В результате выдержки в $CO_2$ и $H_2S$-содержащей среде на поверхности хромсодержащих сталей формируются двухслойные продукты коррозии. Нижний слой представлен гидроксидом хрома, а верхний слой – сульфиды железа. Чем больше содержания хрома в основном металле стали, тем более защитными свойствами обладает нижний слой.

# Условия испытаний на локальную коррозию

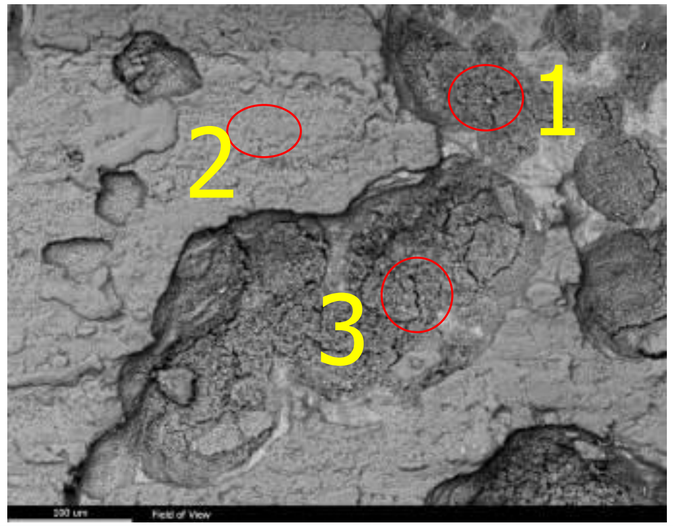
| Нагрузка от $\sigma_т^{min}$ | Модельный раствор | Т испы-тания, С° | Р испы-тания, атм | Прод-ть испытания, ч |
|---|---|---|---|---|
| 85% | NACE TM0177 тип С (5%NaCl+0,4%$CH_3COONa$) насыщ. смесью газов $CO_2$ (90%)+$H_2S$ (10%) | 25 | 1 | 720 |
| | NACE TM0177 тип С (5%NaCl+0,4%$CH_3COONa$) насыщ. смесью газов $CO_2$ (80%)+$H_2S$ (20%) | | | |
| | NACE TM0177 р-р С + CO2 (90%)+H2S (10%) | 60 | | |
| | NACE TM0177 р-р С + CO2 (90%)+H2S (10%) | | 10 | 360 |

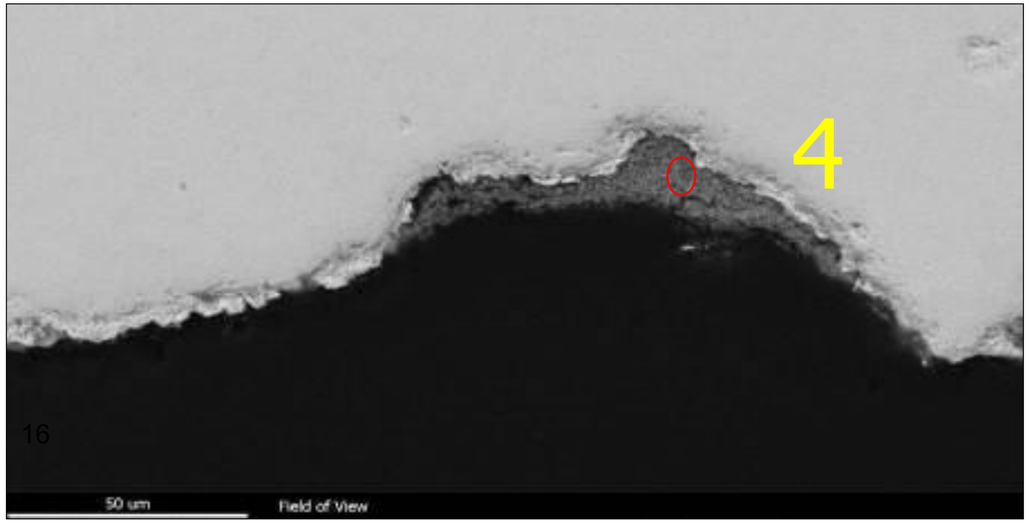
**Подготовка поверхности образцов: шлифованная и без подготовки (с окалиной)**



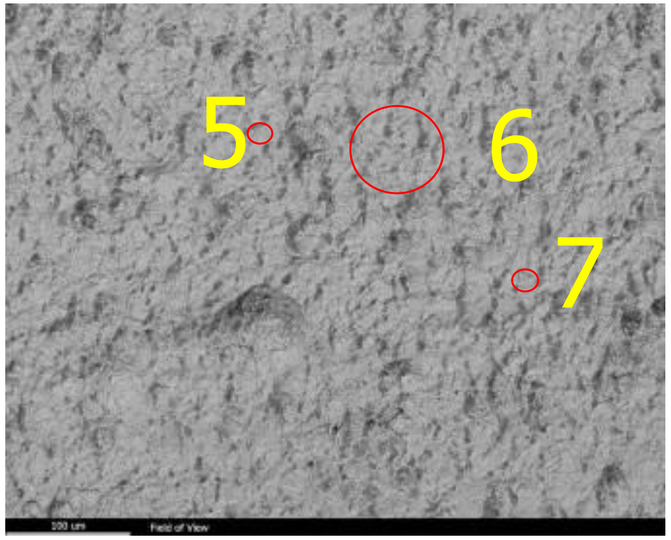
# Испытание в среде: NACE TM0177 тип С + $CO_2$ (80%)+$H_2S$ (20%), Р-1атм, Т комнатная. Время выдержки 720ч.

**Сталь 09Г2С. (растянутая поверхность, нешлифованная)**



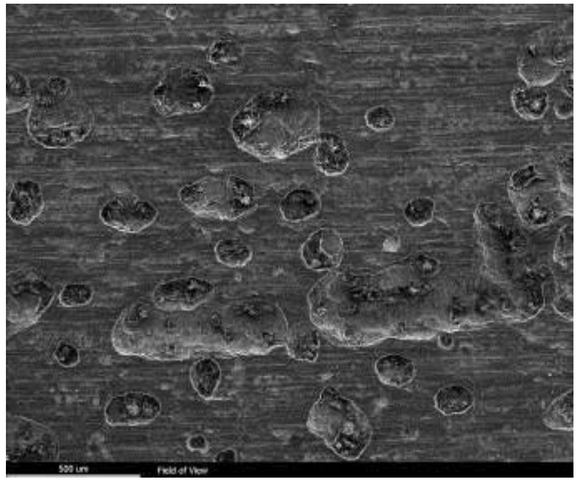

**(растянутая поверхность, шлифованная)**

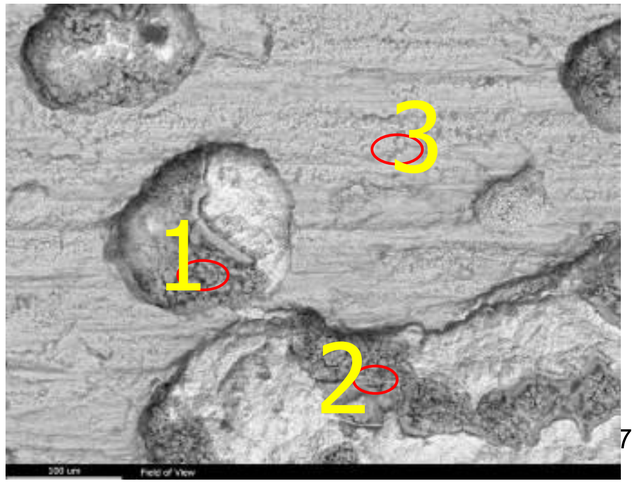



| | O | Si | S | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 15,06 | 0,44 | 16,76 | - | Ост. |
| 2 | - | - | 35,03 | - | Ост. |
| 3 | 9,99 | 0,35 | 16,72 | 0,99 | Ост. |
| 4 | 7,09 | | 22,42 | - | Ост. |
| 5 | 7,60 | 0,76 | 2,26 | 1,68 | Ост. |
| 6 | 5,03 | 0,59 | 1,35 | 1,69 | Ост. |
| 7 | 7,21 | 0,68 | 2,33 | 1,65 | Ост. |

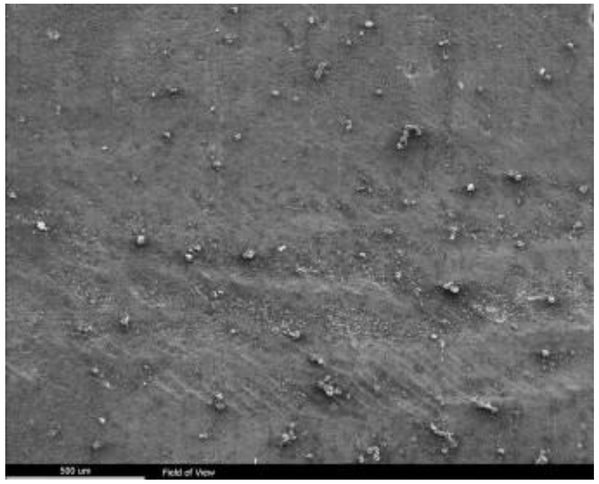
# Испытание в среде: NACE TM0177 тип С + $CO_2$ (90%)+$H_2S$ (10%), Р-1атм, Т комнатная. Время выдержки 720ч.

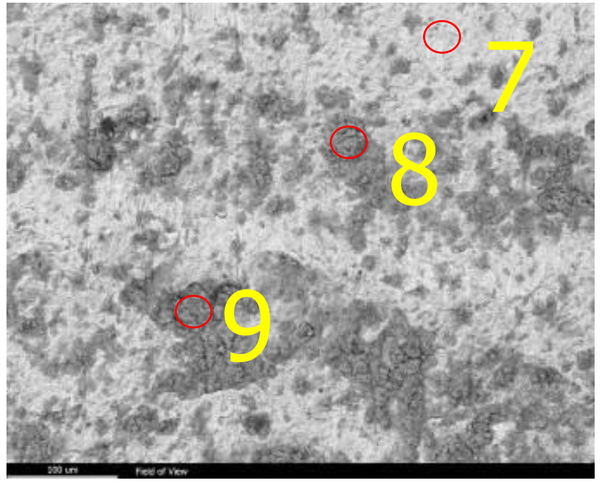
**Сталь 09Г2С. (растянутая поверхность, нешлифованная)**

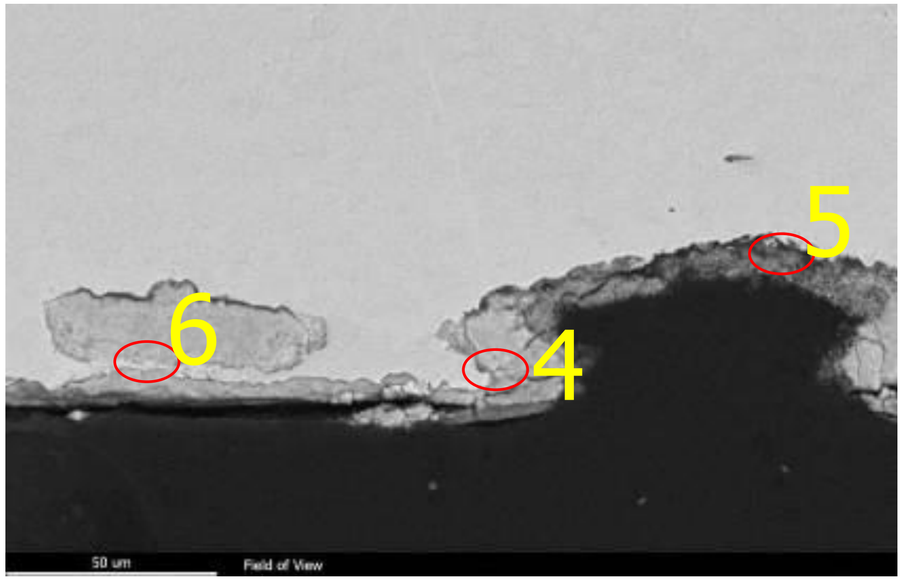




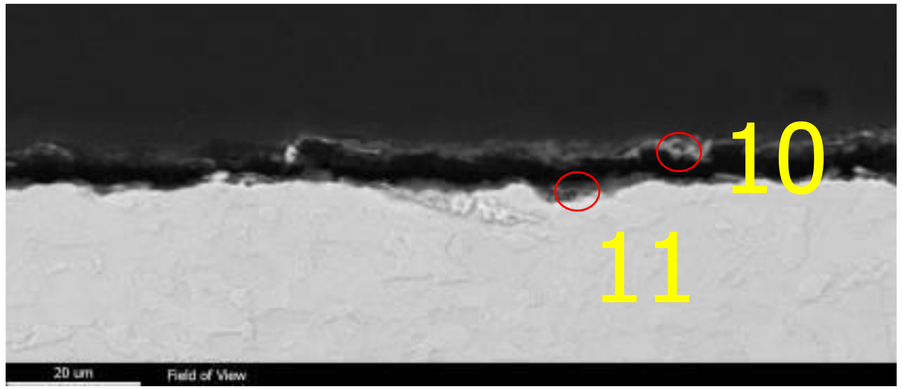

**Сталь 09Г2С. (растянутая поверхность, шлифованная)**





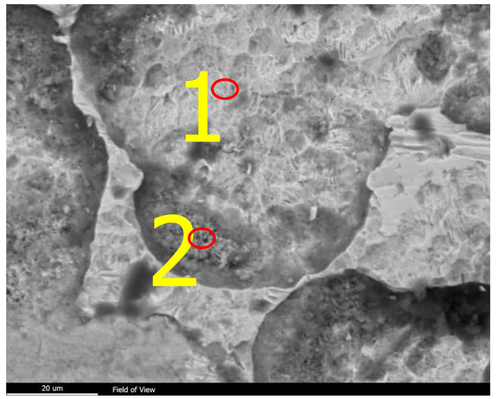



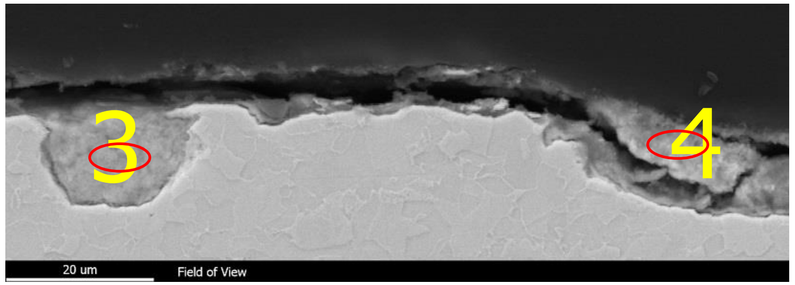

| | O | Si | S | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20,20 | 00,54 | 01,44 | 01,40 | Ост. |
| 2 | 19,86 | - | 01,81 | 01,43 | Ост. |
| 3 | 06,30 | - | 30,29 | - | Ост. |
| 4 | - | - | 37,05 | - | Ост. |
| 5 | 09,66 | - | 09,79 | 00,84 | Ост. |
| 6 | - | - | 36,25 | - | Ост. |
| 7 | 25,94 | 00,39 | 04,72 | 00,84 | Ост. |
| 8 | 24,34 | 00,57 | 02,16 | 00,99 | Ост. |
| 9 | 04,57 | 00,71 | 00,43 | 01,60 | Ост. |
| 10 | 09,20 | 00,78 | 09,20 | 00,66 | Ост. |
| 11 | 06,44 | 00,48 | 06,44 | 00,51 | Ост. |



# Испытание в среде: NACE TM0177 тип С + $CO_2$ (90%)+$H_2S$ (10%), Р-1атм, Т=60°С. Время выдержки 360ч.

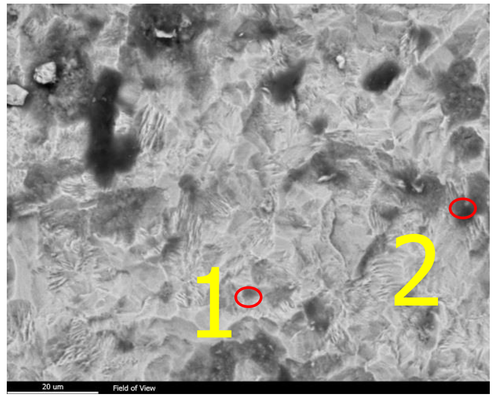
## 05ХГБ Растянутая поверхность

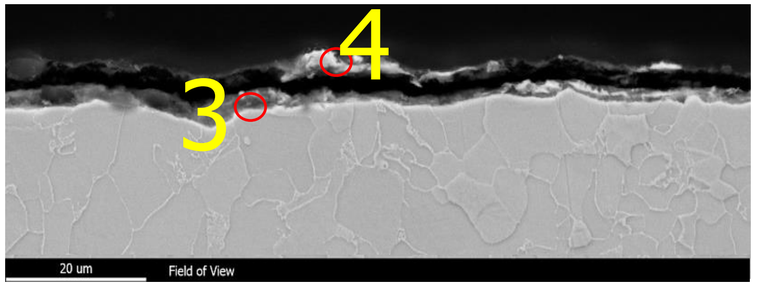



| | O | Na | Si | S | Cl | Cr | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2,87 | - | 0,43 | 0,65 | - | 0,91 | 0,95 | Ост. |
| 2 | 10,93 | 3,28 | 0,20 | 21,43 | 2,24 | 0,80 | - | Ост. |
| 3 | - | - | - | 30,91 | - | 1,39 | - | Ост. |
| 4 | 4,34 | - | - | 12,05 | - | 0,40 | - | Ост. |

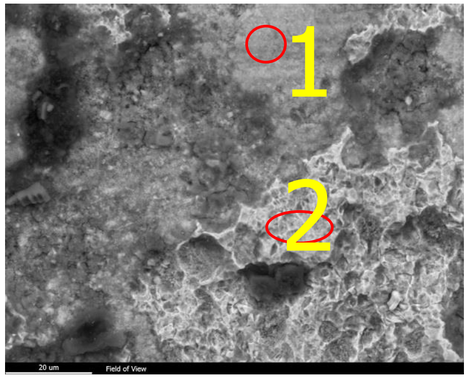
## 09ГСФ Растянутая поверхность

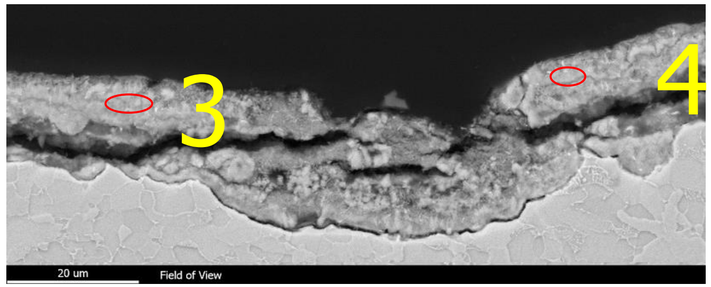



| | O | Na | Si | S | Mn | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2,42 | - | 0,68 | 0,93 | 1,42 | Ост. |
| 2 | 11,10 | 1,73 | 0,35 | 7,84 | 0,83 | Ост. |
| 3 | 10,72 | - | 0,57 | 1,22 | 0,81 | Ост. |
| 4 | - | - | 0,58 | - | 1,30 | Ост. |

## Ст 20 Растянутая поверхность

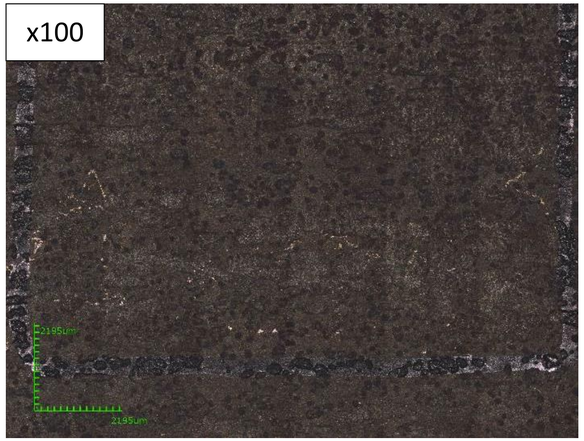


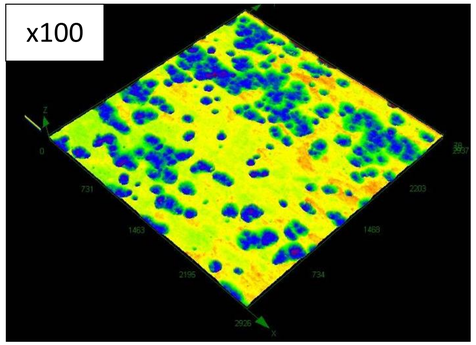



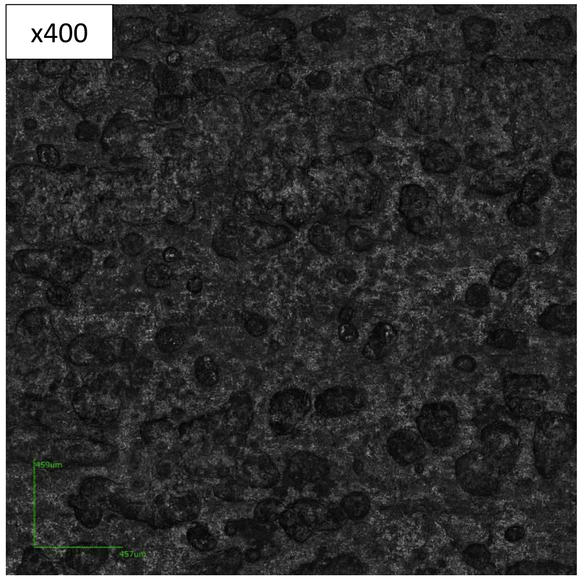

| | O | Si | S | Fe |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 3,52 | - | 30,44 | Ост. |
| 2 | 4,85 | 0,46 | 1,61 | Ост. |
| 3 | 3,35 | - | 17,98 | Ост. |
| 4 | - | - | 22,50 | Ост. |

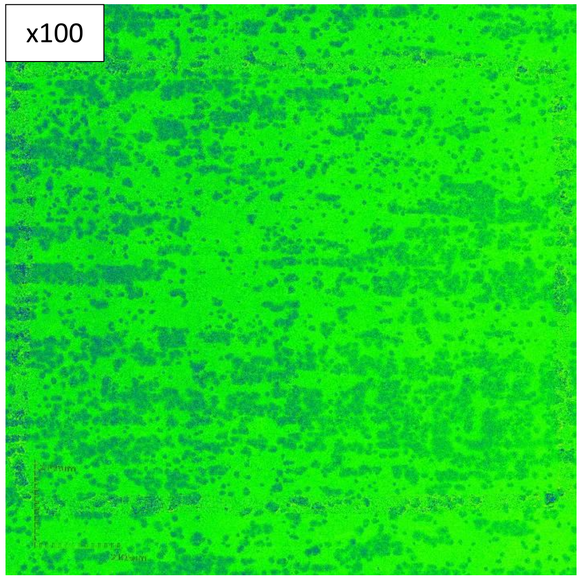
# Анализ плотности и глубины язв на единицу площади на нешлифованных образцах стали 09Г2С после коррозионных испытаний

**NACE TM0177 тип C + $CO_2$ (90%)+$H_2S$ (10%)**

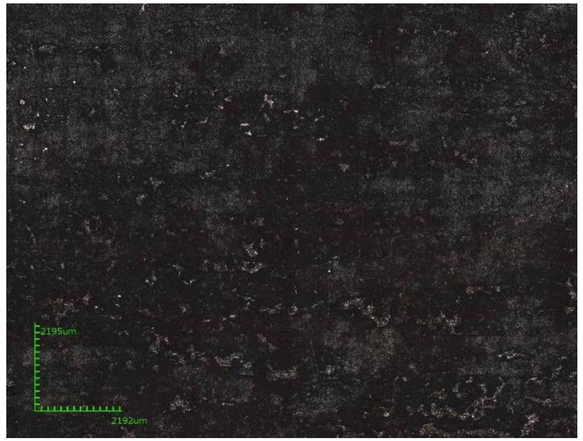


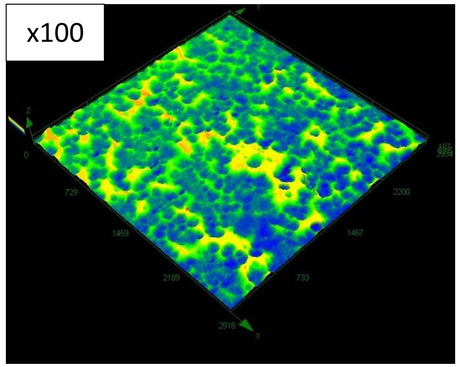



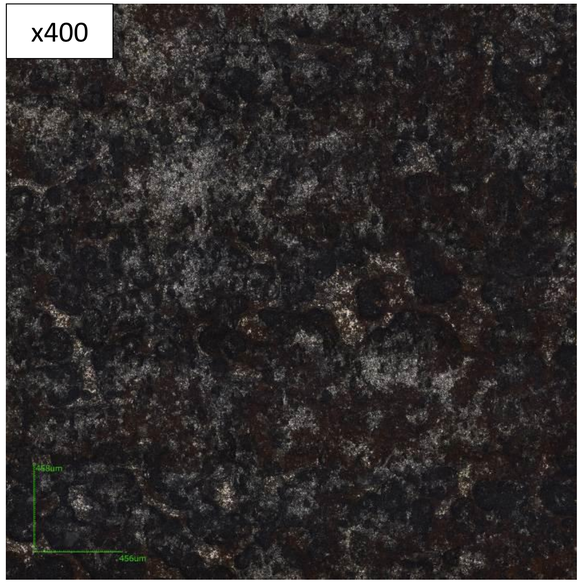



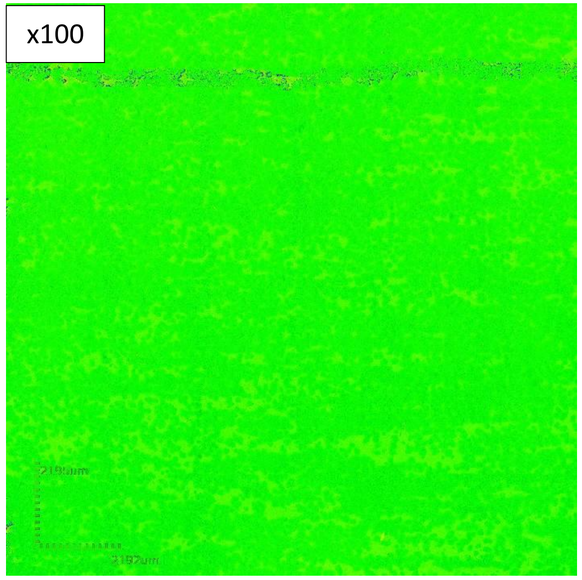




**NACE TM0177 тип C + $CO_2$ (80%)+$H_2S$ (20%)**





| Подготовка поверхности | Нагрузка | Модельный раствор | T испытания, С° | P испытания, атм | Прод-ть испытания, ч | Скорость локальной коррозии, мм/год |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 09Г2С |
| Шлифованная поверхность | 85% | NACE TM0177 тип С (5%NaCl+0,4%$CH_3COONa$) насыщ. смесью газов $CO_2$ (90%)+$H_2S$ (10%) | 25 | 1 | 720 | 0 |
| Нешлифованная поверхность (с окалиной) | | | | | | 0,60 |
| Шлифованная поверхность | | NACE TM0177 тип С (5%NaCl+0,4%$CH_3COONa$) насыщ. смесью газов $CO_2$ (80%)+$H_2S$ (20%) | | | | 0 |
| Нешлифованная поверхность (с окалиной) | | | | | | 0,67 |
| Шлифованная поверхность | | NACE TM0177 тип А: (5%NaCl+ 0,5%$CH_3COOH$) попеременная подача CO2 и H2S каждые 180 часов | | | | 0,12 |
| Шлифованная поверхность | | NACE TM0177 тип А: (5%NaCl+ 0,5%$CH_3COOH$) смена раствора и попеременная подача газов CO2 и H2S каждые 180 часов | | | | 0,22 |
| Шлифованная поверхность | | NACE TM0177 р-р С + CO2 (90%)+H2S (10%) | 60 | | | 0,52 |
| Нешлифованная поверхность (с окалиной) | | | | | | 0,31 |
| Шлифованная поверхность | | NACE TM0177 р-р С + CO2 (90%)+H2S (10%) | | 10 | 360 | 0,70 |
| Нешлифованная поверхность (с окалиной) | | | | | | 0,25 |

# Выводы

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

- При испытаниях на СКРН в растворе С в средах со смесью $CO_2$ и $H_2S$ как при комнатной, так и при повышенной температуре на поверхности с растягивающими напряжениями создаются условия для возникновения локальной коррозии
- На образцах с неподготовленной поверхностью (с окалиной) язвы образовывались при всех опробованных испытательных средах

- Количество и размер язв зависит от химического состава стали. Наибольшее количество локальных поражений выявлено на поверхности образца из стали 20.
- Для количественной оценки параметров язв (доля поверхности и глубина) можно использовать конфокальную микровскопию

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ РОССИИ
НАУКА И УНИВЕРСИТЕТЫ

# Спасибо за внимание!

Работа была выполнена в рамках комплексного проекта по теме «Разработка и внедрение комплексных технологий производства бесшовных труб из сталей нового поколения с управляемой коррозионной стойкостью при осложненных условиях эксплуатации для топливно-энергетического комплекса Российской Федерации» в рамках Соглашения №075-11-2023-011 от 10.02.2023 г. по постановлению Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г.

**Выражаю благодарность сотрудникам коллектива:**
ИТЦ Выксунского завода ОМК,
кафедре ОМД НИТУ МИСИС,
а также НИЛ «ГНМ» НИТУ МИСИС

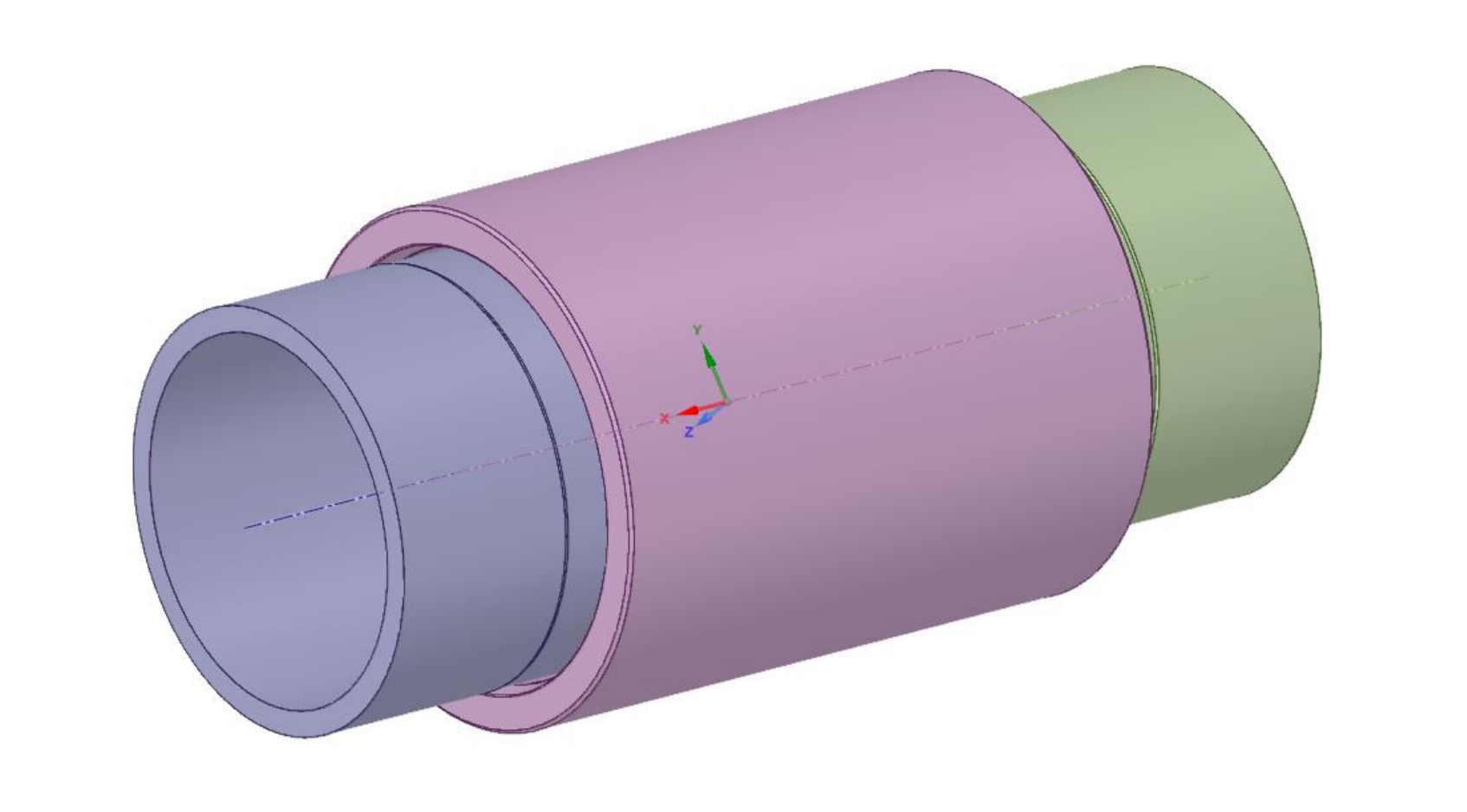
**ООО НАУЧНО-КОММЕРЧЕСКАЯ ФИРМА « СБК »**
**РФ, 152912, г. Рыбинск, Ярославской обл., ул. Зои Космодемьянской, 33-33**
**тел./факс: (4855) 216-504, +7 9108137542, E-mail: bukaty_sa@mail.ru**

# Моделирование напряжённо-деформированного состояния объектов добычи нефти и газа с целью выявления наиболее нагруженных зон и прогнозирования возможных разрушений

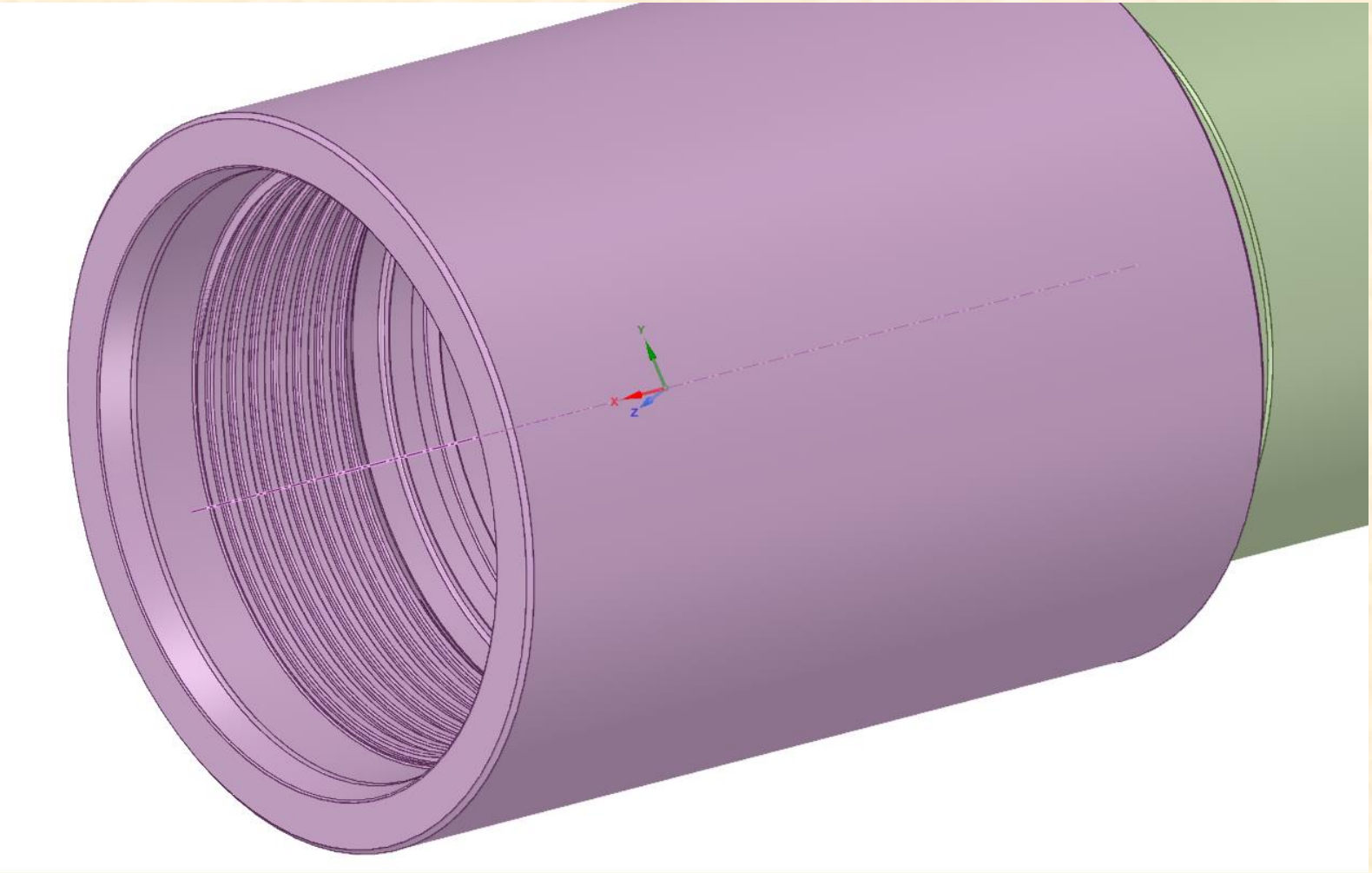
Научный руководитель
д-р техн. наук, профессор Букатый С.А.

**Моделирование и расчёты на прочность трубопроводов и их соединений с учётом остаточных напряжений, коррозии и прочих факторов снижающих надёжность и долговечность трубопроводов**

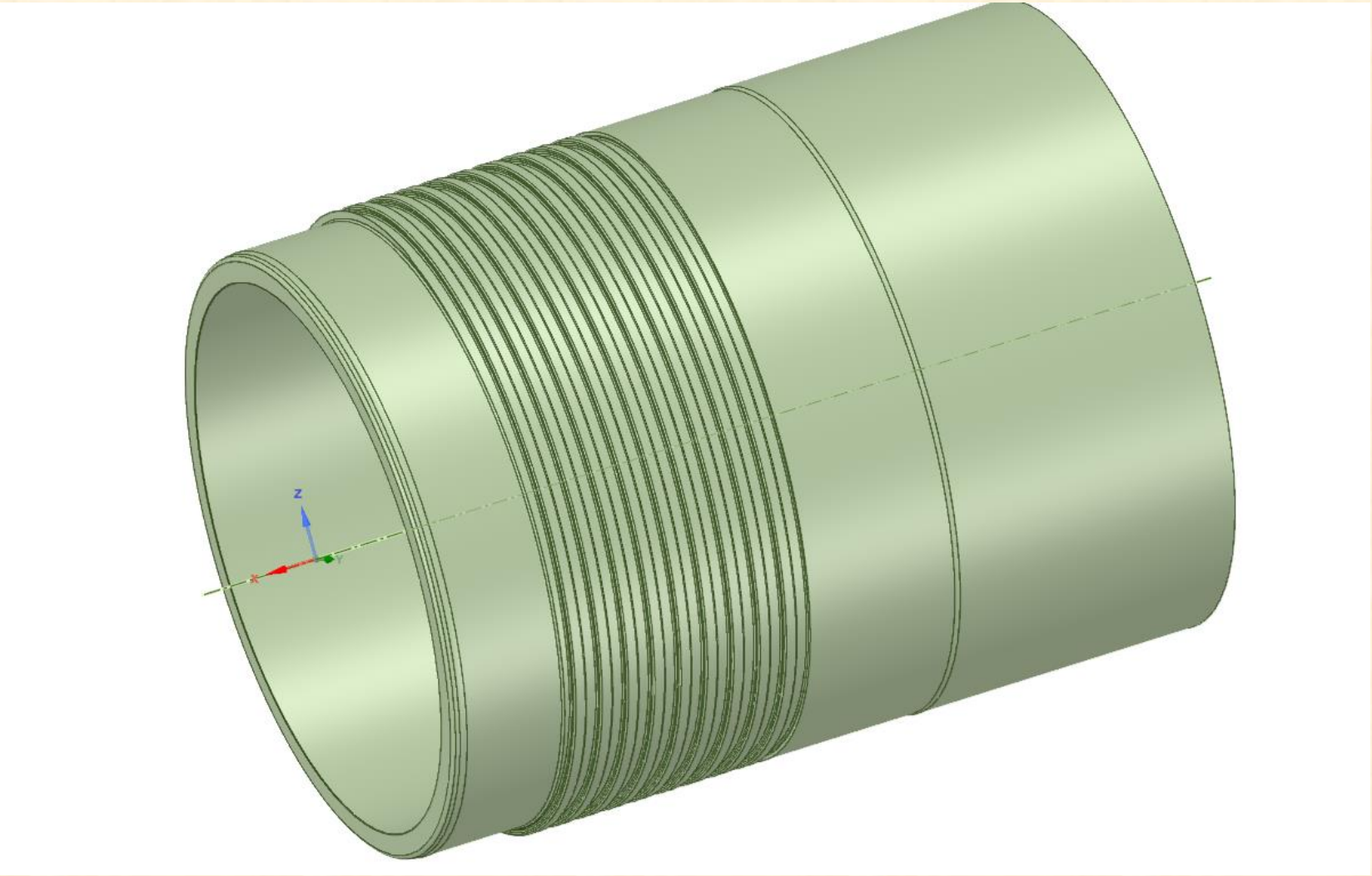
# Конечно-элементные расчёты на прочность трубных соединений



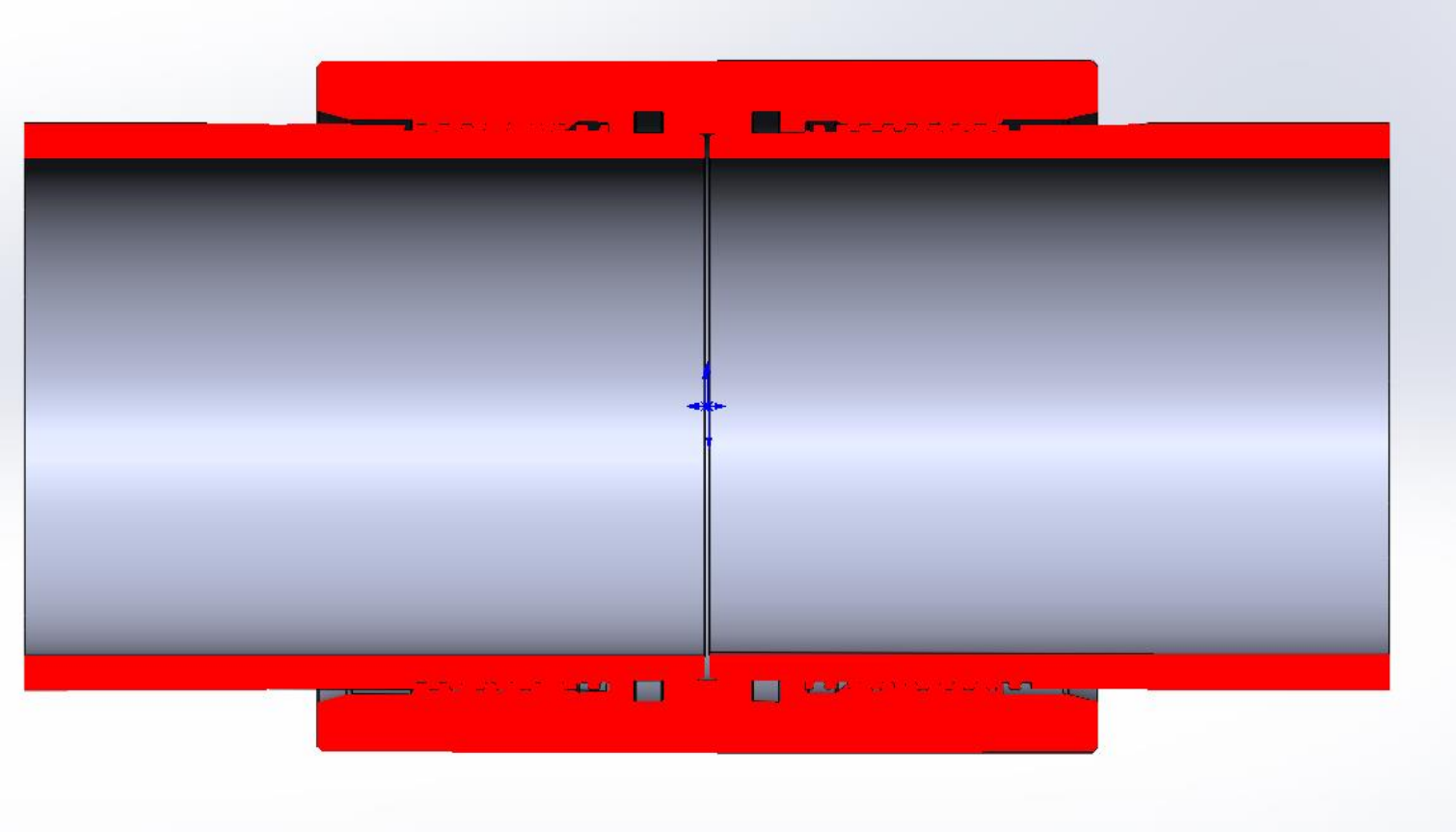
# Резьбовые части муфты



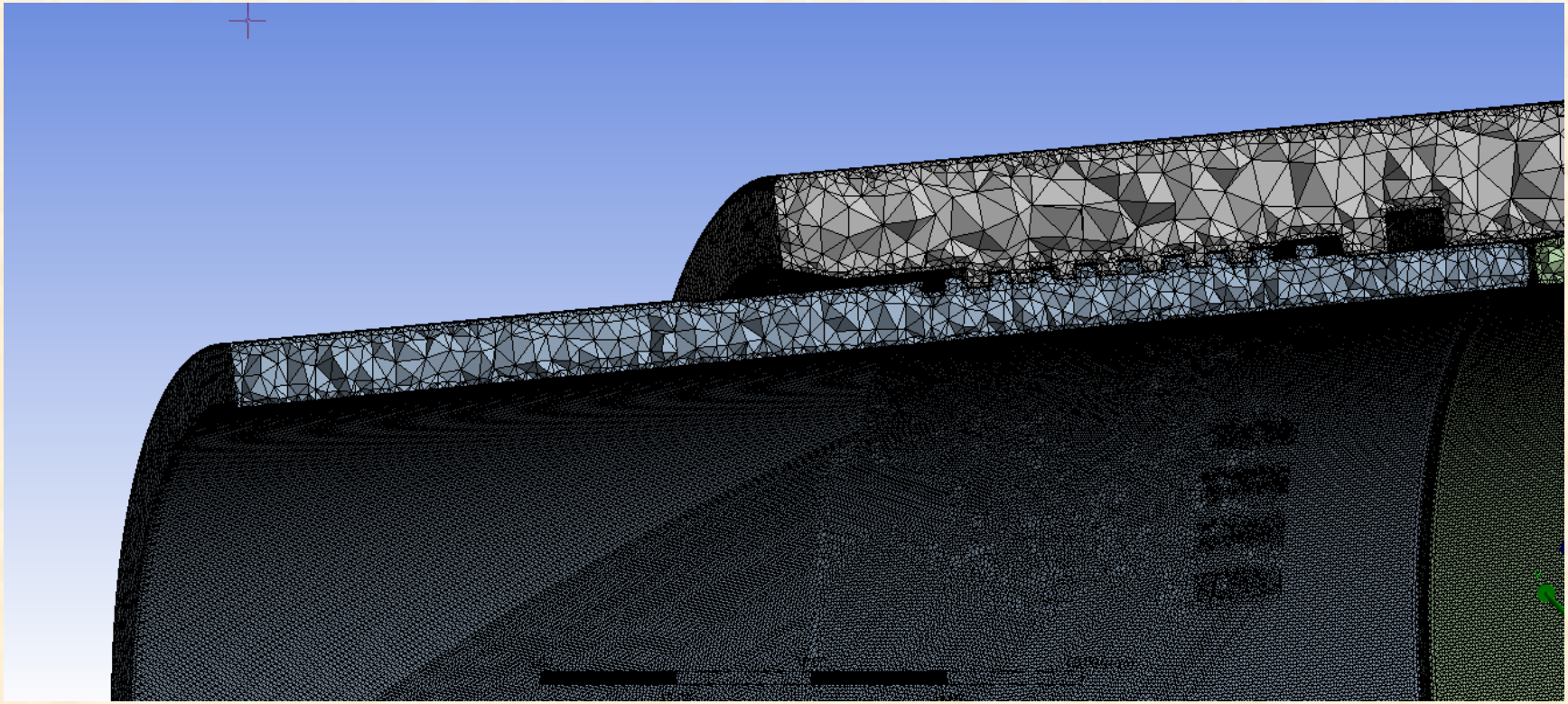
# Резьбовые части трубы



# Виртуальная модель соединения в разрезе

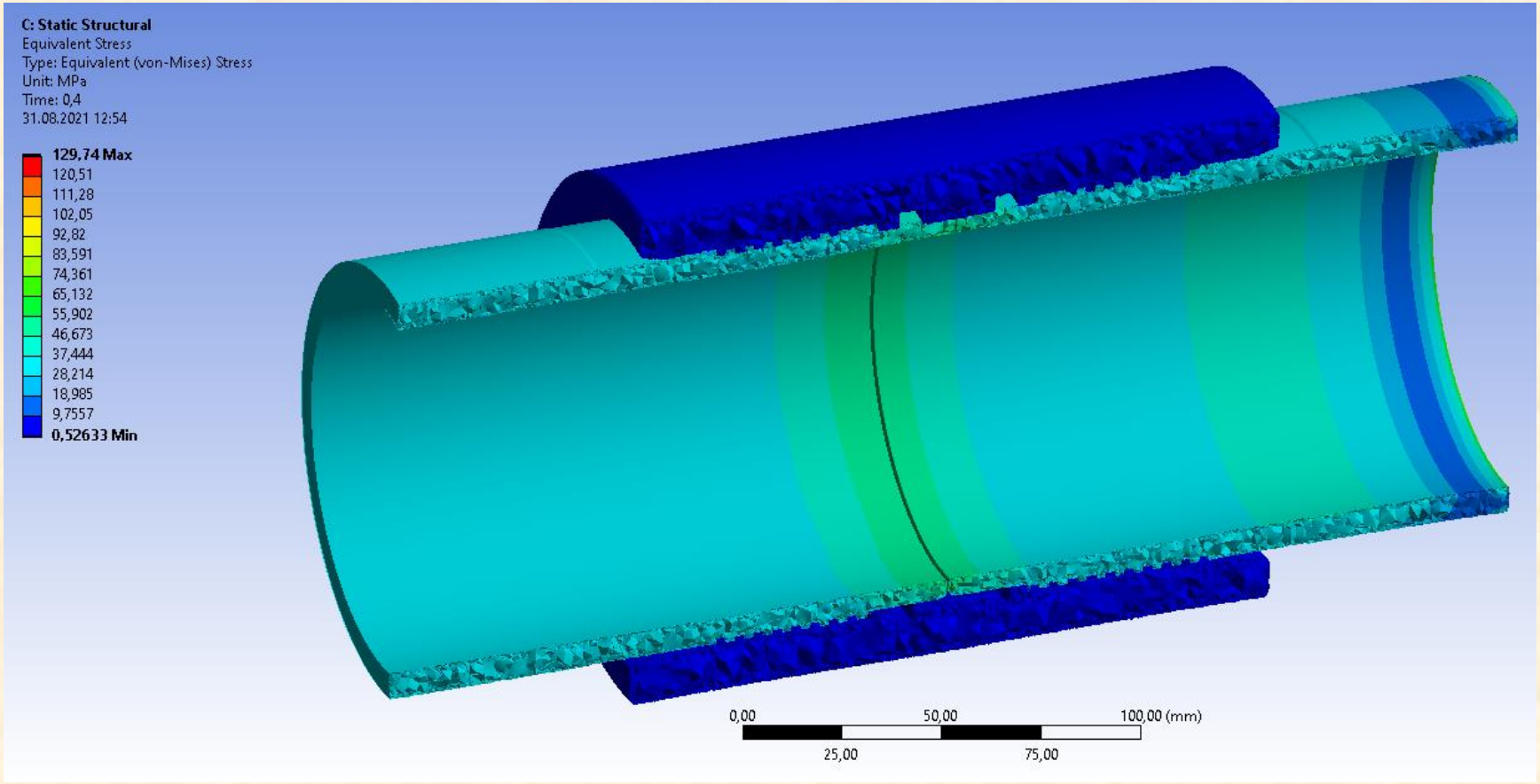


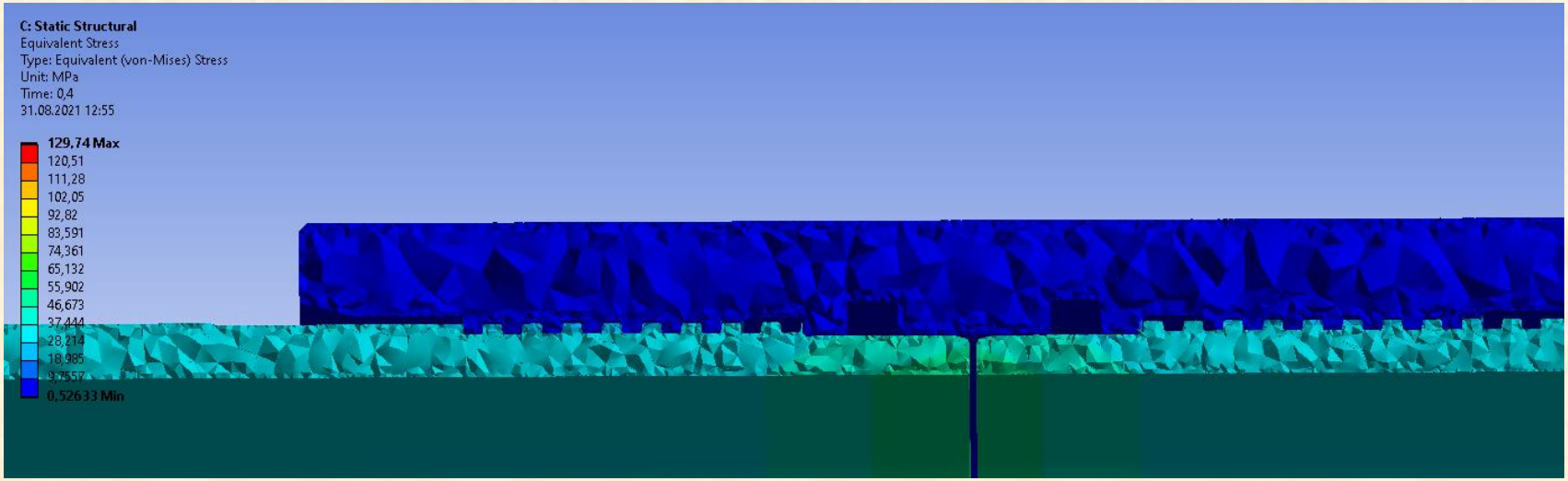
# Конечно-элементная модель соединения



**Материал труб 09Г2С**
**Материал муфты 32Г2**
**К модели было приложено рабочее давление 11МПа**

# Результаты расчётов методом конечных элементов



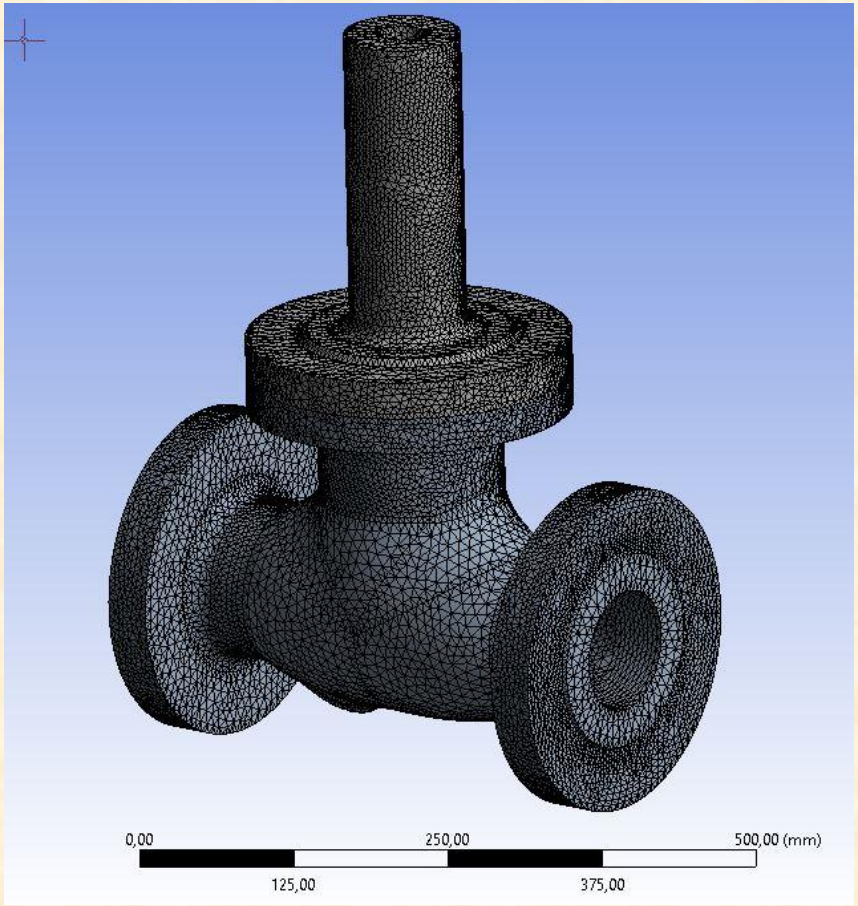


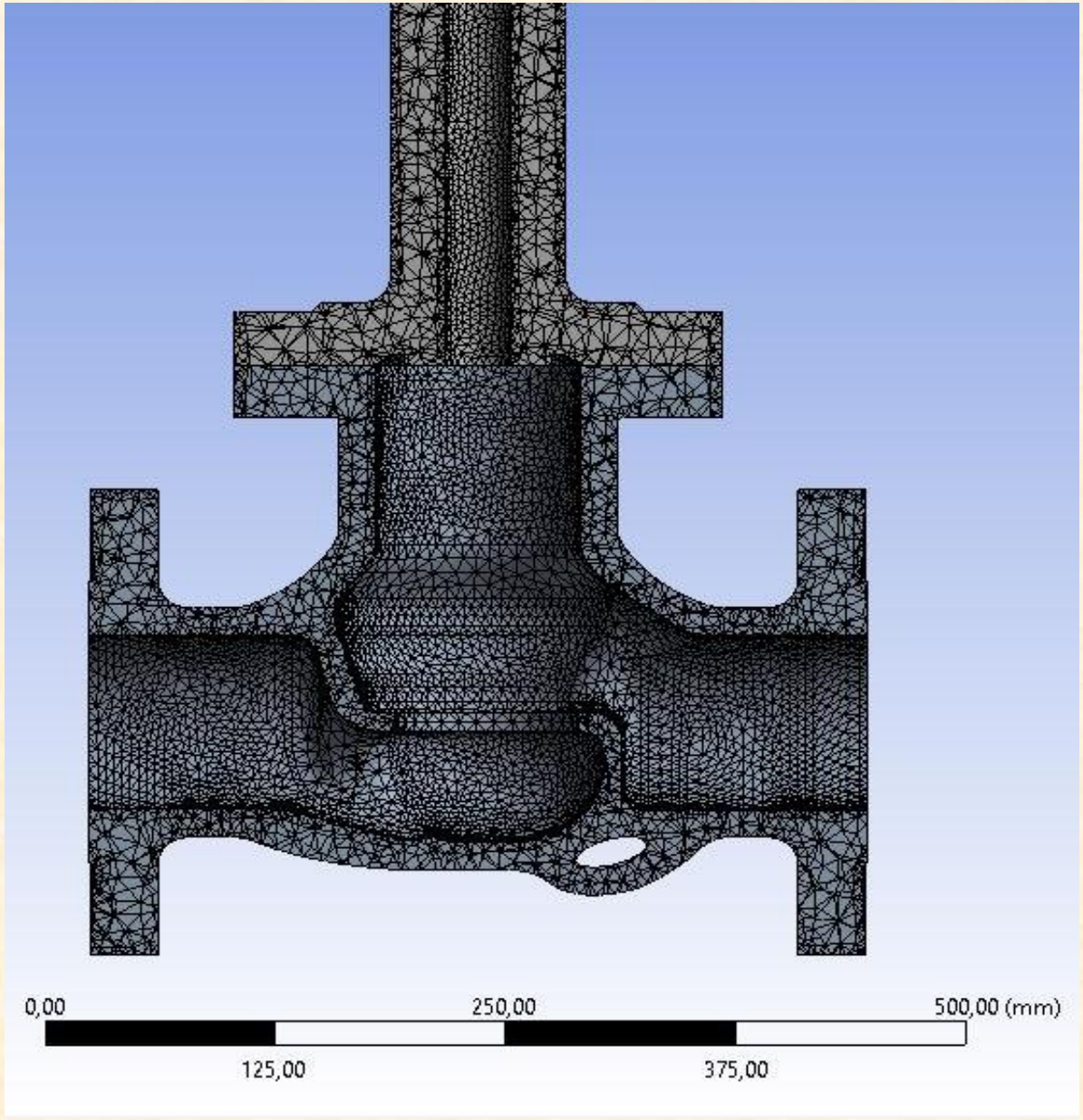

Результаты расчётов позволили получить распределение напряжений и определить наиболее нагруженную зону в соединении при воздействии внутреннего давления.

# Анализ деформаций запорной арматуры с учётом монтажных факторов

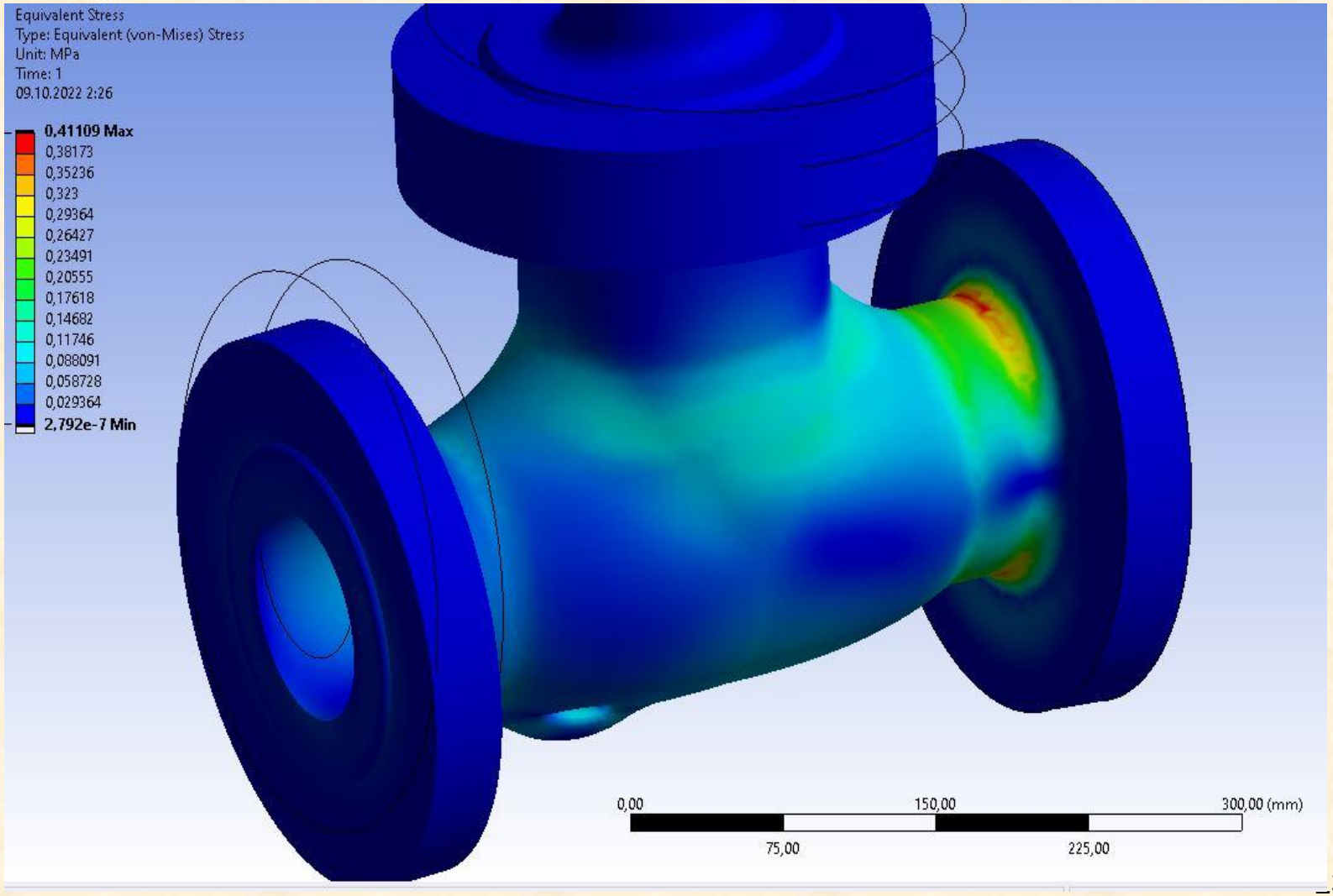
# Запорная арматура марки DN100 PN100



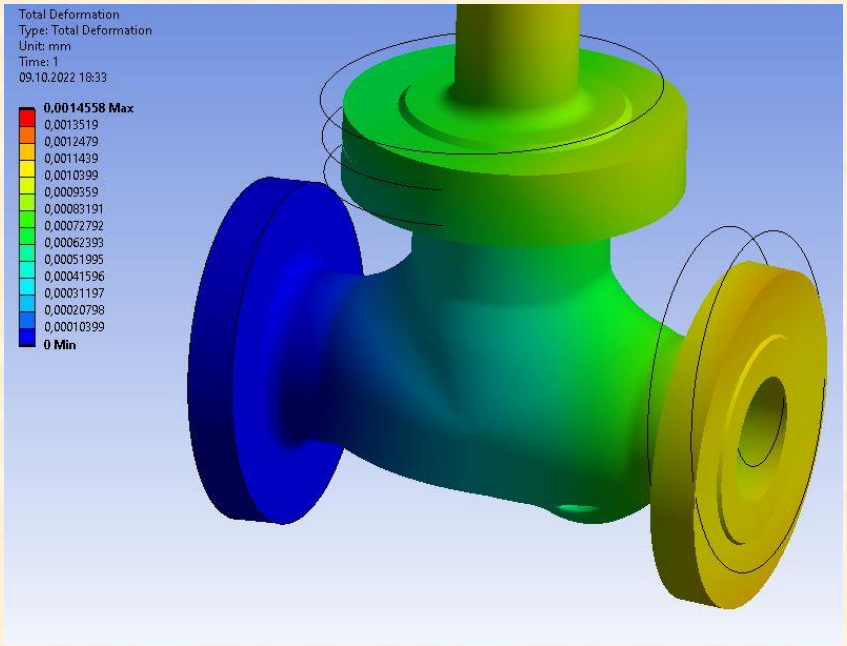


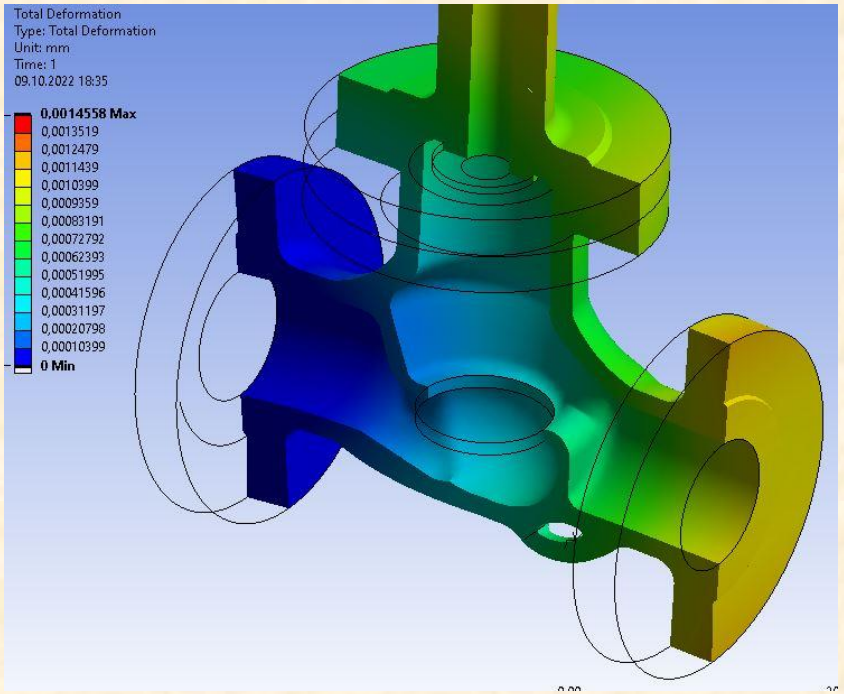

0,00
250,00
500,00 (mm)
125,00
375,00

# Расчёт напряжённо-деформированного состояния запорной арматуры

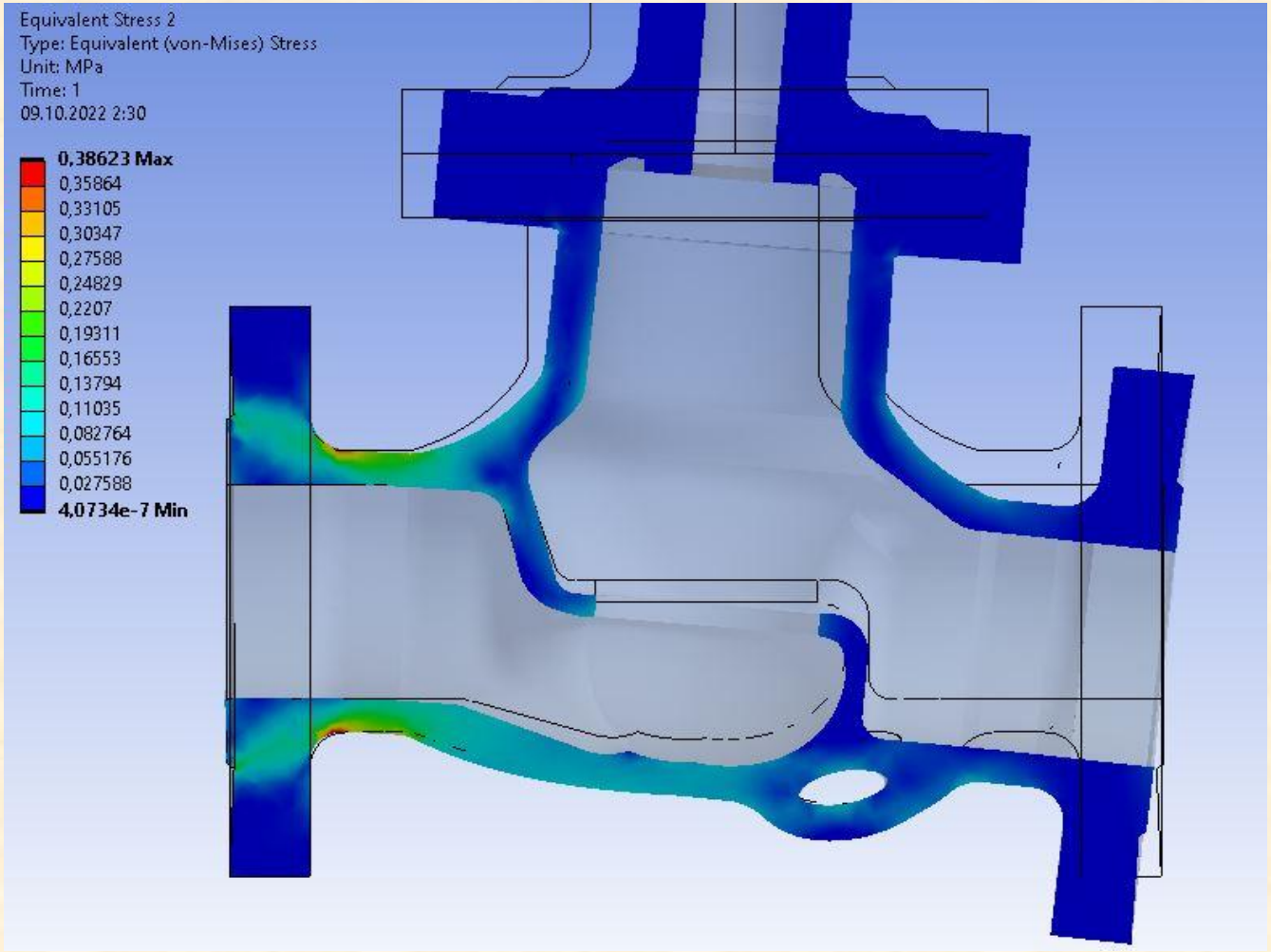


# Деформации запорной арматуры

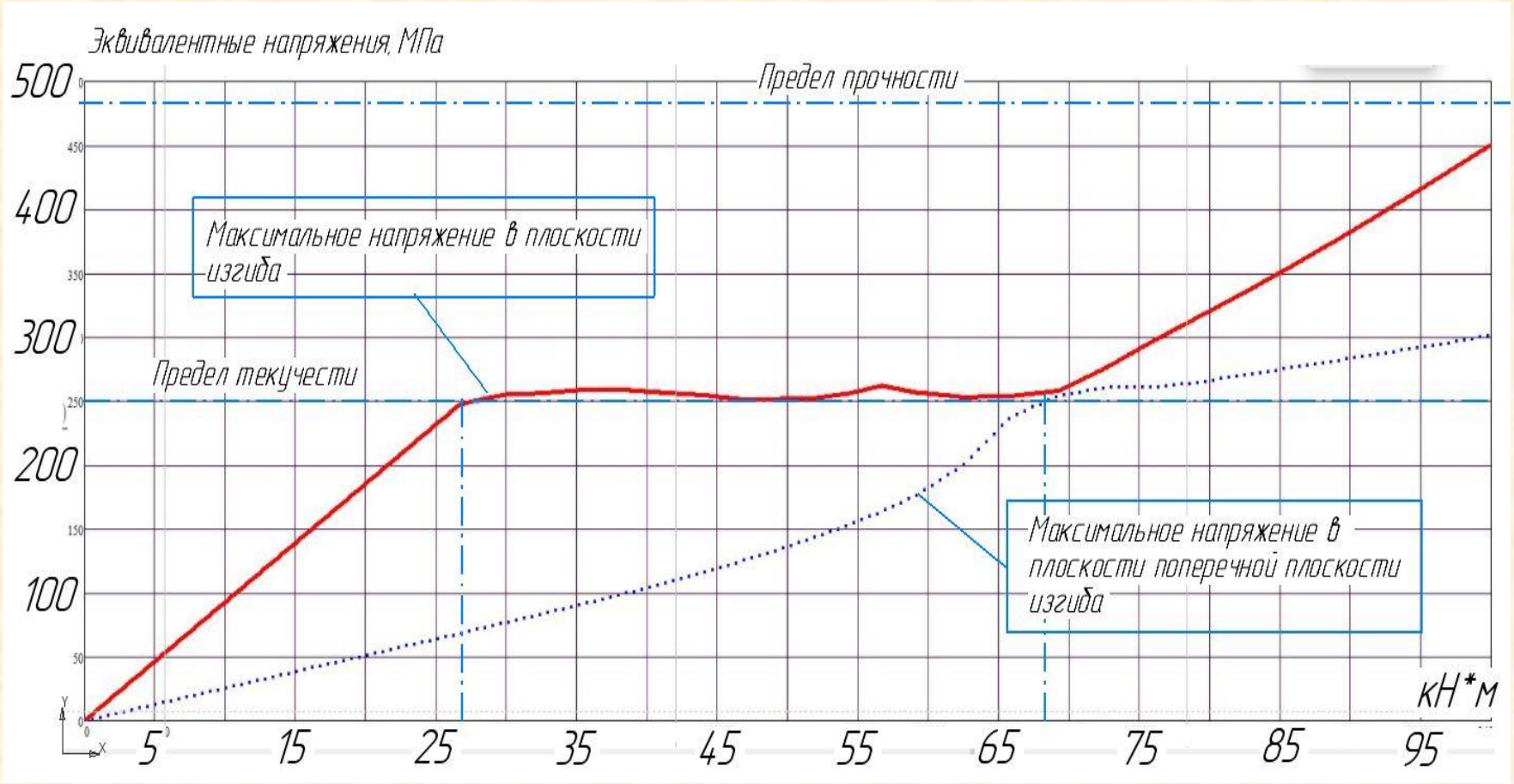


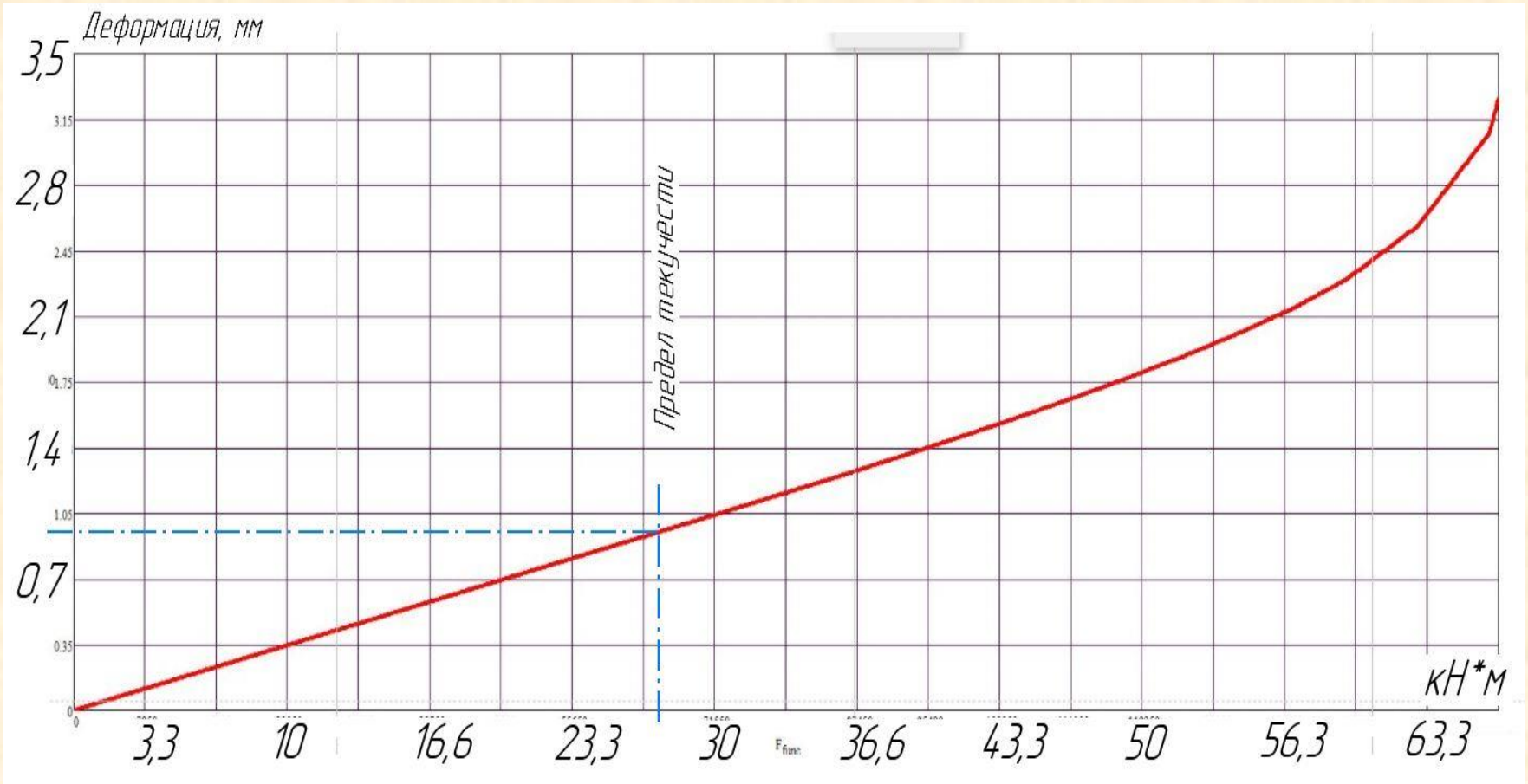
# Распределение эквивалентных напряжений, в зоне плоскости изгиба узла



# Изменение величины максимальных эквивалентных напряжений в зависимости от изгибающего момента



# Изменение величины деформации проходного сечения запорной арматуры в зависимости от изгибающего момента



# Выводы

- Рассматриваемая запорная арматура была подвергнута нагрузкам, вызвавшим пластические деформации корпуса.
- Началу возникновения пластических деформаций соответствует усилие 1087,6 кг при плече 2,5 м.
- Полученное усилие, вызвавшее пластические деформации запорной арматуры могло быть вызвано не параллельностью конструкции, в которую встраивалась запорная арматура, а именно, деформации могли быть получены в результате стягивания запорной арматуры с фланцами в составе конструкции, имеющими существенные отклонения от параллельности.

# Учёт коррозии в расчётах на прочность на примере штанг насосных ШН-19

**Цель работы:** повышение выносливости штанг насосных ШН19 на основе исследования их напряжённо-деформированного состояния

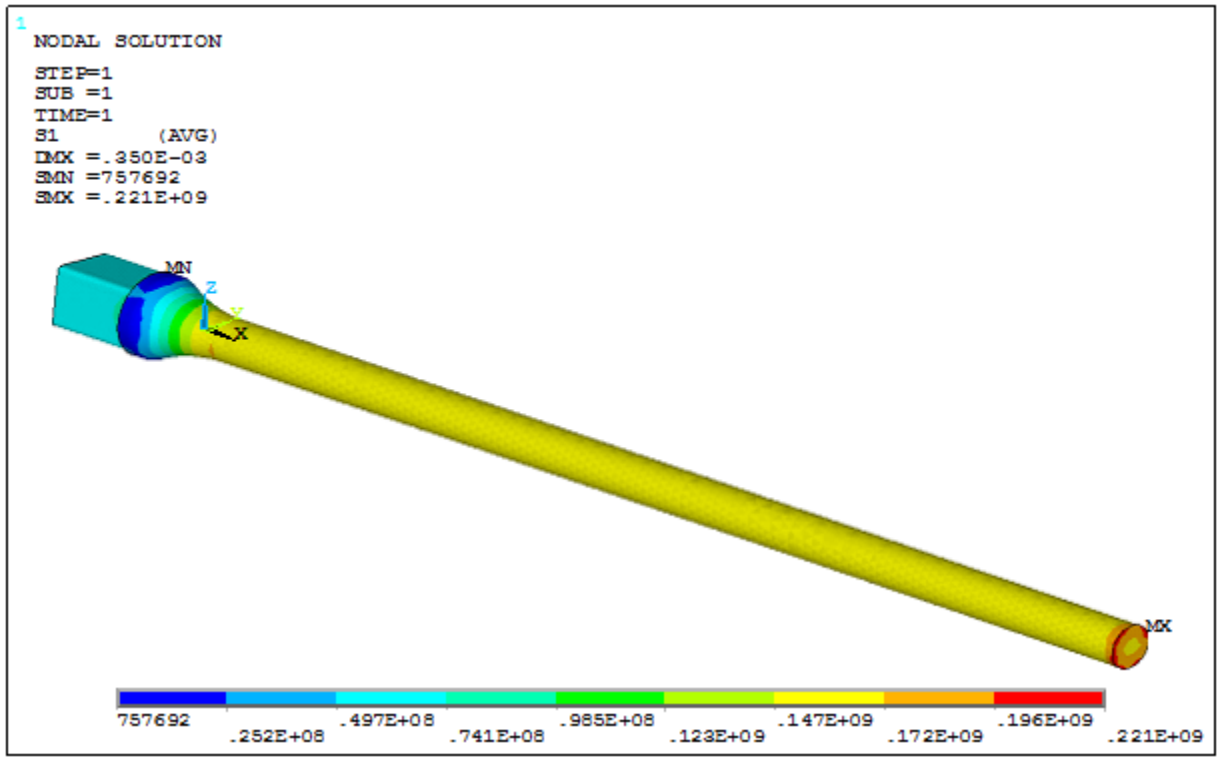
**Задачи:**

1) Выявление причин преждевременного разрушения штанг ШН19 на основе анализа их напряжённо-деформированного состояния
2) Исследование остаточных напряжений в поверхностном слое штанг без наработки и с наработкой
3) Составление рекомендаций по повышению выносливости штанг насосных

# Граничные условия

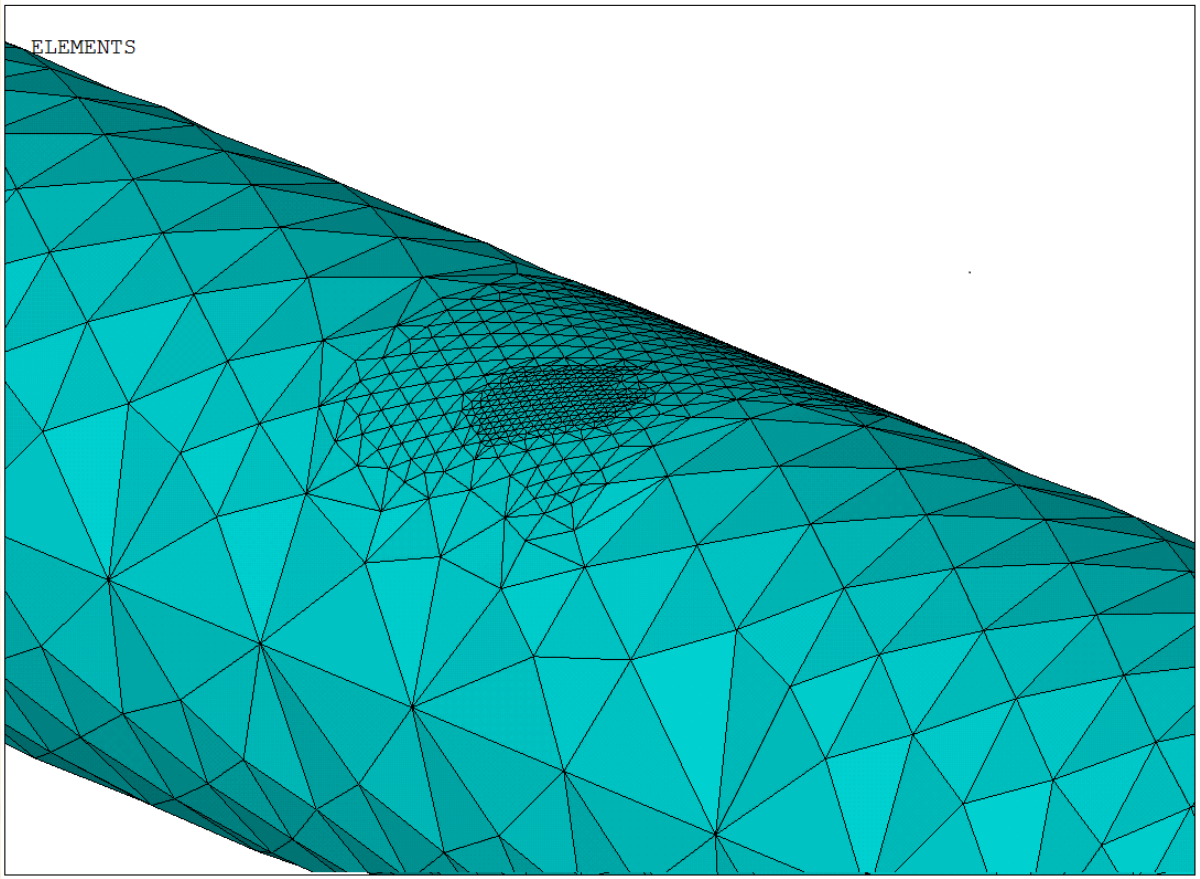
- Диаметр штанг: 19,1 мм  +0,2/–0,41 мм.
- Максимальная нагрузка:
  $P_{max}$ = 4579 кГс = 44920 Н.
- Минимальная нагрузка: $P_{min}$ = 0 кГс = 0 Н.
- Материал: сталь 15Х2ГМФ, нормализация + отпуск.

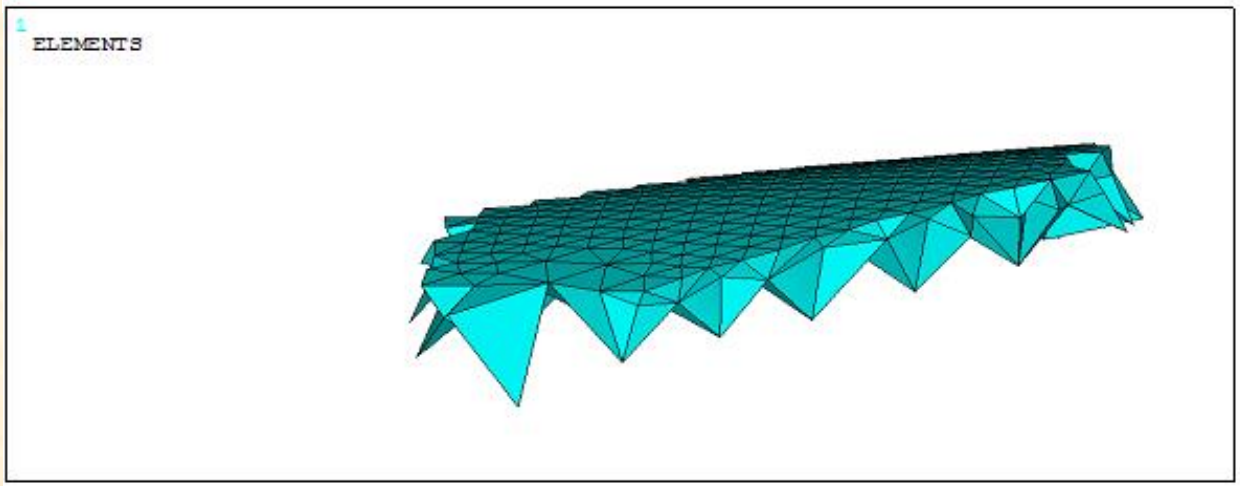
# Расчёт напряжённо-деформированного состояния штанг на основе конечно-элементного моделирования повреждения поверхности штанг коррозией




Распределение главных напряжений и деформаций в штанге при отсутствии коррозии

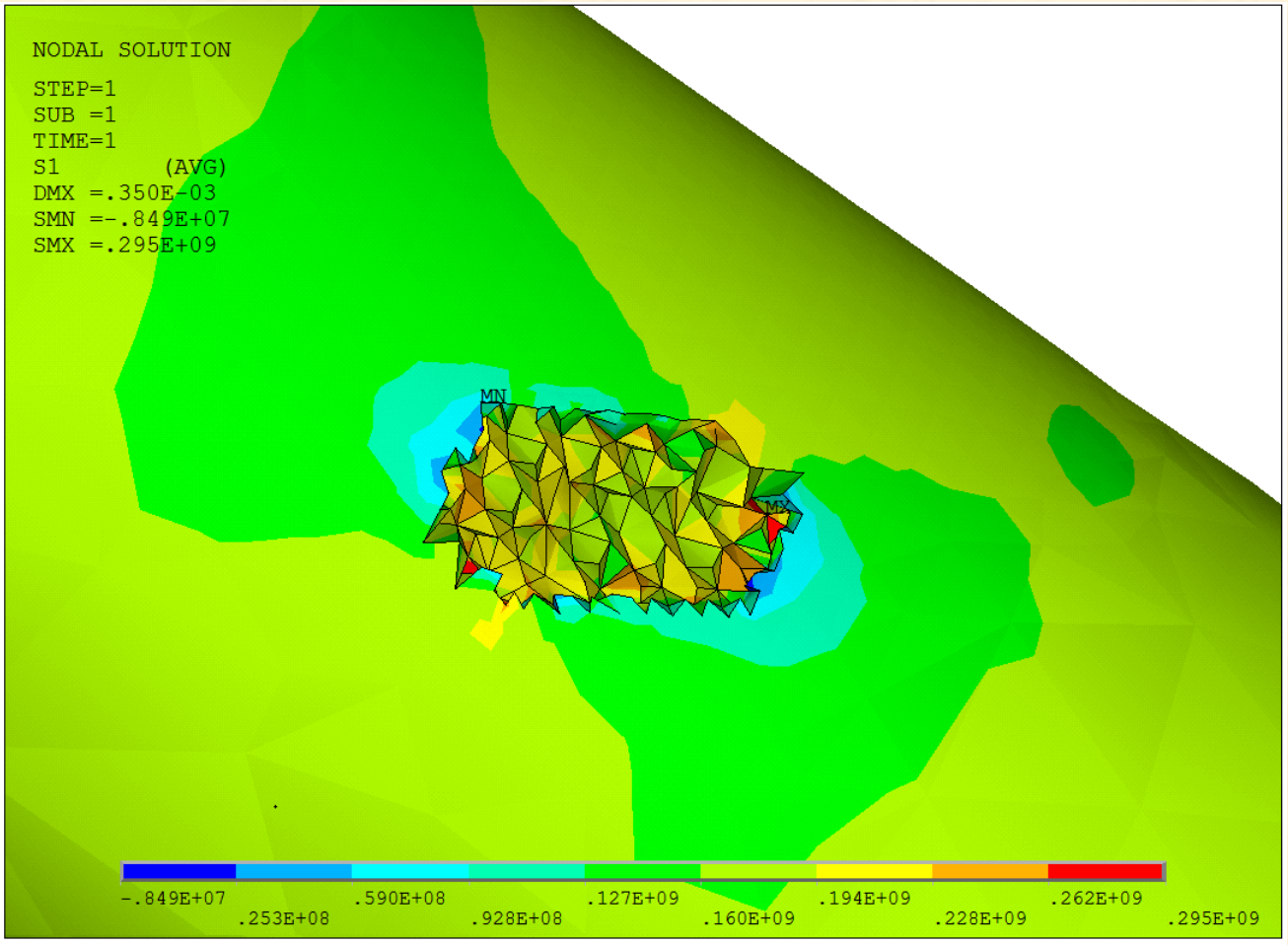
| Главные напряжения, МПа | | | Главные деформации | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_2$ | $\varepsilon_3$ |
| 170,13 | 0,90 | 0,54 | 0,00084849 | – 0,00025152 | – 0,00025382 |




примерные размеры очага разрушения и язвы: длина×ширина ×глубина ≈ 5,87 ×3,31×0,88 мм

# Распределение первых главных напряжений в коррозионном повреждении штанги




Распределение главных напряжений и деформаций в штанге с коррозией

| Главные напряжения, МПа | | | Главные деформации | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_2$ | $\varepsilon_3$ |
| 292,11 | 38,43 | 14,36 | 0,0013814 | – 0,00026755 | – 0,00042402 |

# Результаты расчётов долговечности штанг без учёта и с учётом коррозионного повреждения

коэффициент запаса по долговечности $n = 3$

длительность наработки штанг $T$ в сутках (при $N_{\text{базовой}}$ $5\times10^6$ циклов или 926 сут.)

частота $f = 4{,}5$ цикл/мин.

**Результаты расчёта малоцикловой долговечности штанг**

| Варианты расчёта | $N_{\text{расчётная}}$, циклы | $N_{\text{допускаемая}}$, циклы | $T$, сутки | |
|---|---|---|---|---|
| | | | расчётная | допускаемая |
| Без учёта коррозии | 128487200 | 42829067 | 19827 | 6609 |
| С учётом коррозии | 1368174 | 456058 | 210 | 70 |

# Результаты расчётов

• многоцикловая усталость штанг не обеспечивается, в т.ч. из материала класса Д

• наиболее важным фактором, влияющим на сопротивление усталости штанг, является коррозионная стойкость материала.

• определение долговечности штанг в этом случае следует вести методами расчёта малоцикловой усталости.

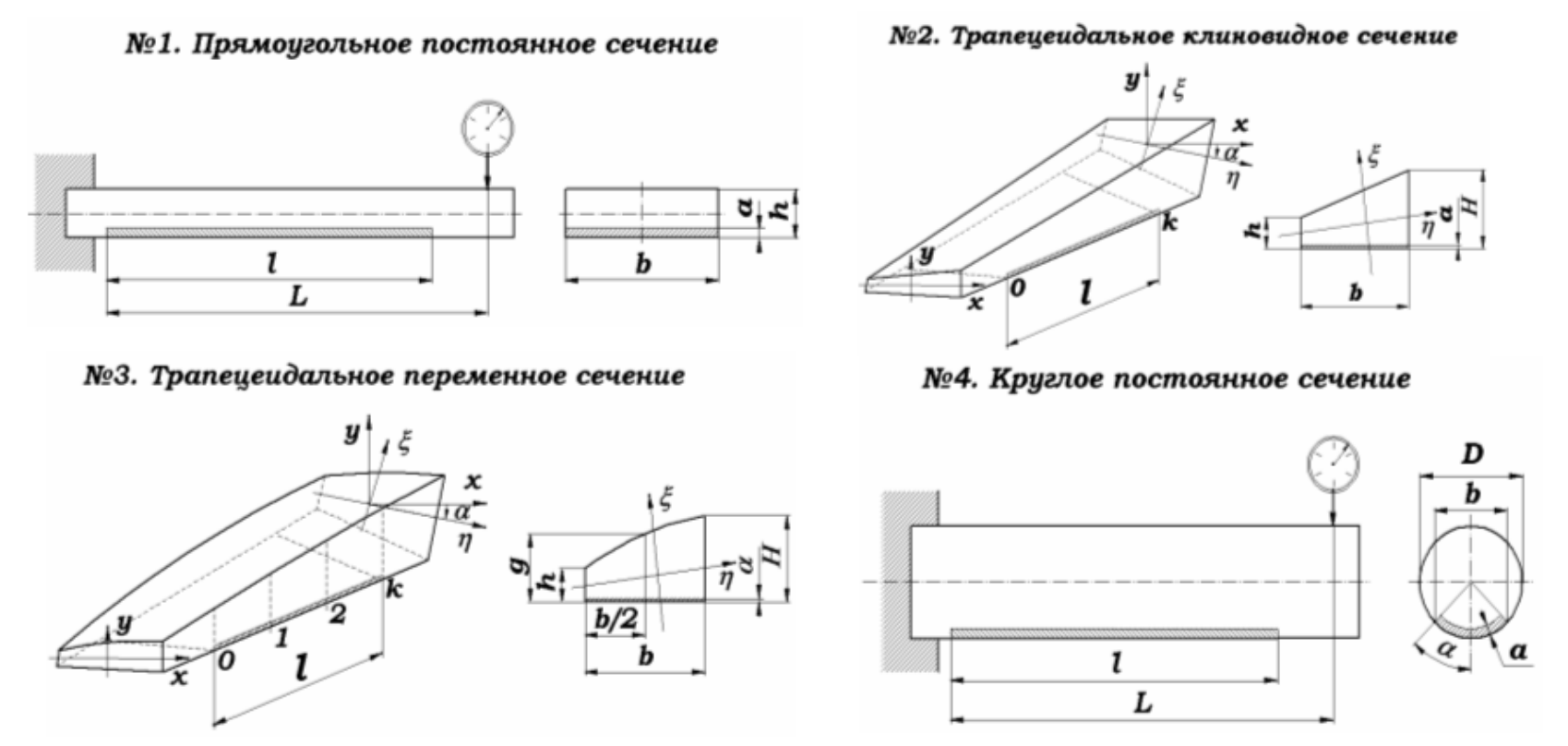
# Расчёты на прочность с учётом остаточных напряжений

**Цель работы:** учёт остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое труб, штанг и прочих деталей, в процессе их изготовления и эксплуатации.

# Автоматизированная система определения остаточных напряжений АСБ-1 (разработка ООО НКФ «СБК»)



# Типы образцов для определения остаточных напряжений



# Определение остаточных напряжений на установке АСБ-1

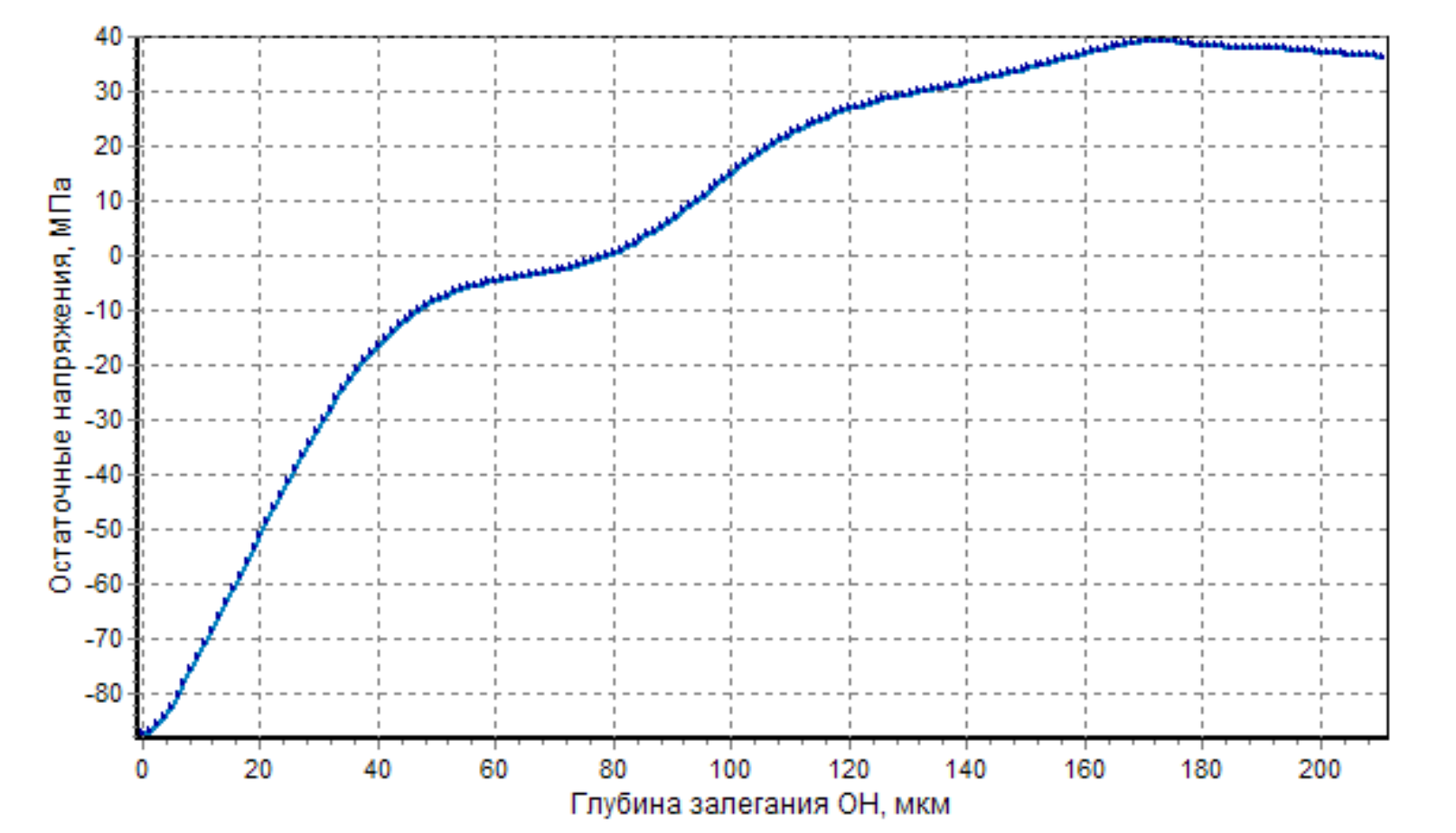





Образцы секторного сечения

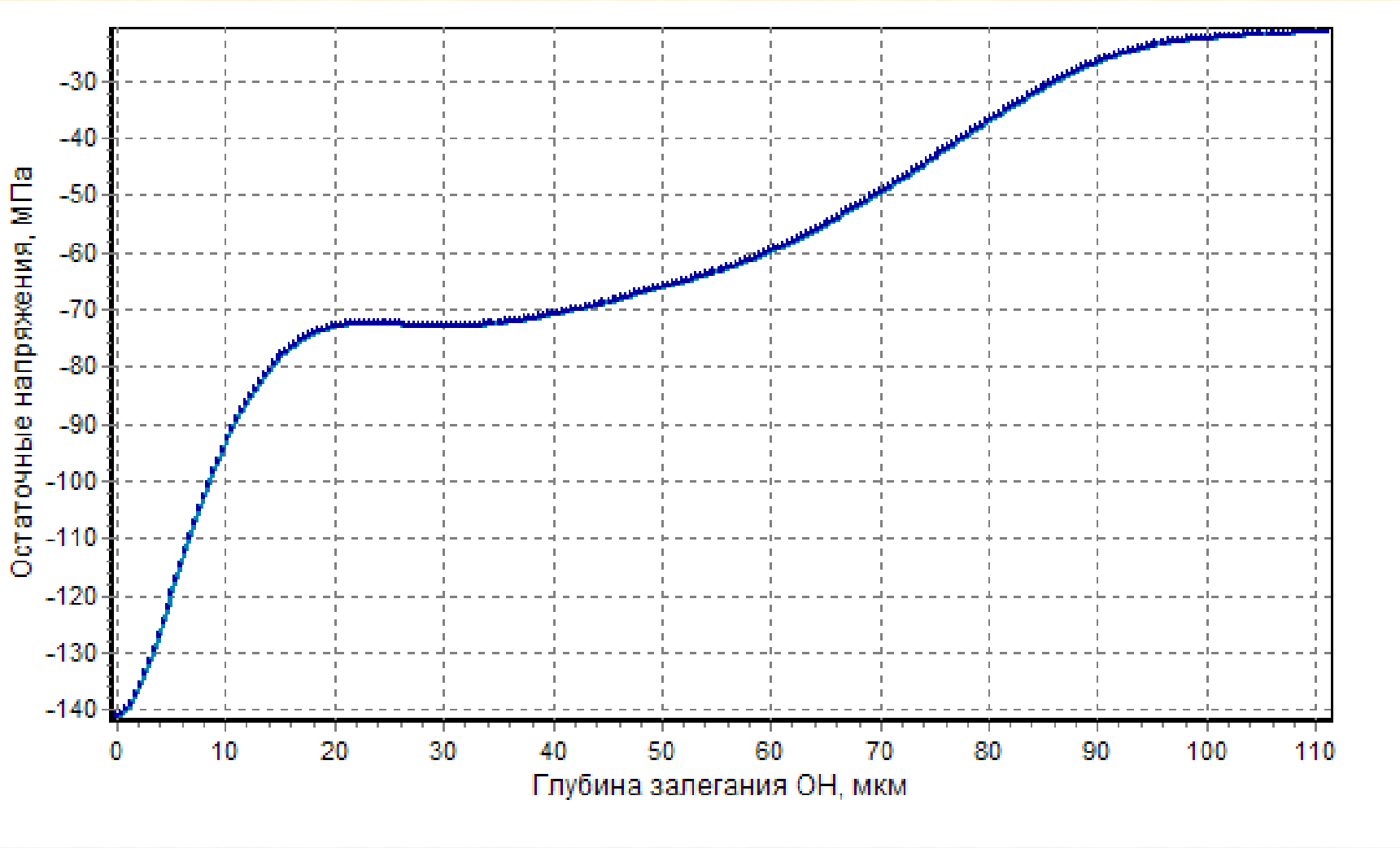
для определения остаточных напряжений

# Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое штанг без наработки

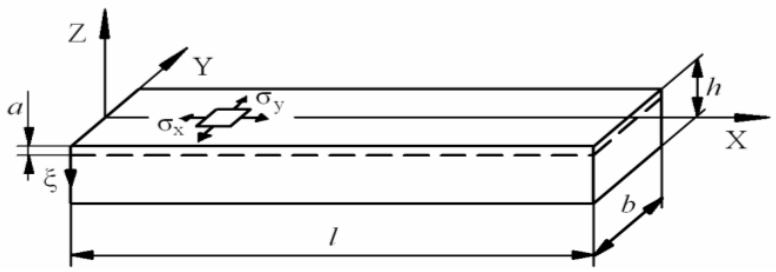


**Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое штанг с наработкой (с коррозионным повреждением поверхности штанги)**

Повышение сжимающих остаточных напряжений вследствие наводораживания поверхностного слоя, а также влияния коррозии составило ~ 60 МПа



# Энергетический метод моделирования технологических остаточных напряжений и деформаций в поверхностном слое деталей




Ориентация системы координат и направления остаточных напряжений

$$U_{д} = \Delta U_a = f(U_a)$$

$U_д$ – энергия упругой деформации деталей

$\Delta U_a$ – изменение энергии поверхностного слоя $a$

**В общем случае:**

$$u_0 = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)],$$

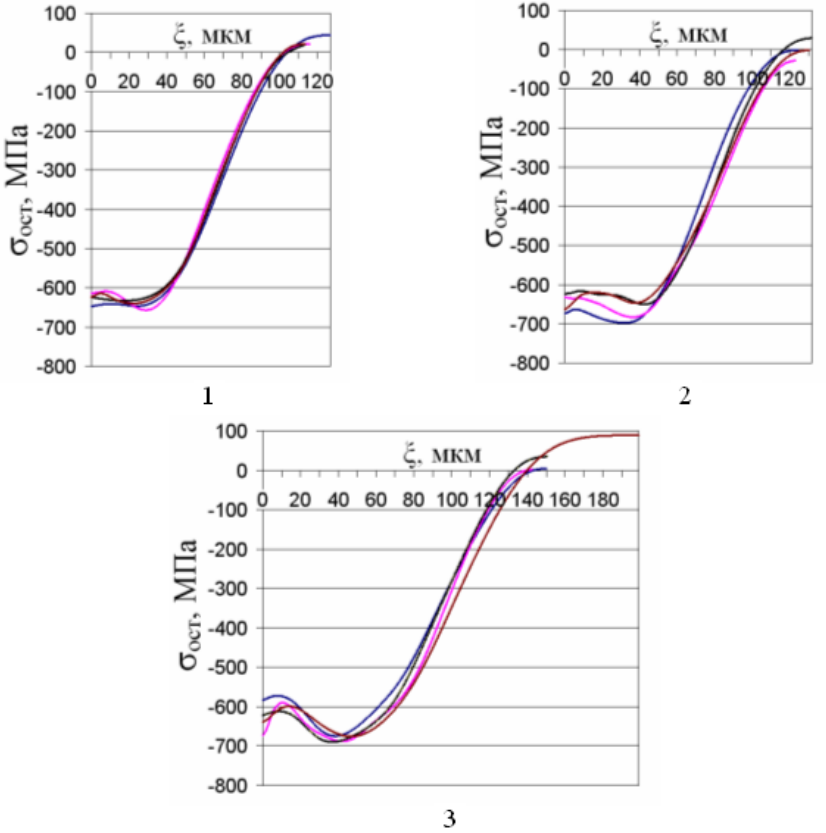
где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные начальные напряжения.

**В случае плоского напряженного состояния:**

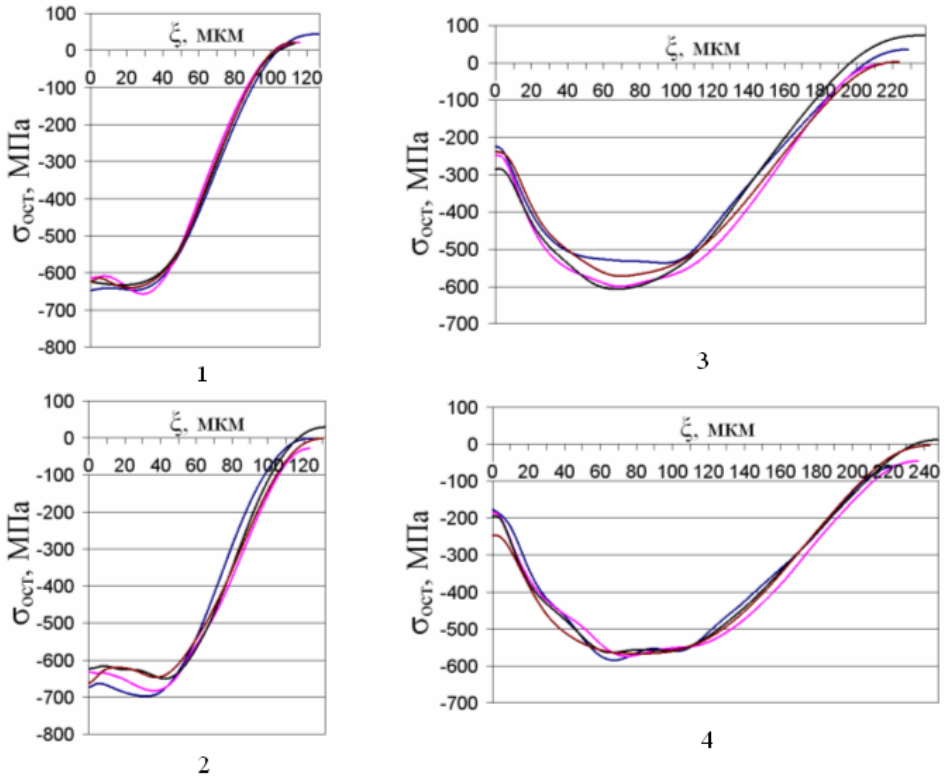
$$\sigma_1 = 0, \qquad \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\sigma_н}{1-\mu},$$

$$u_0 = \frac{\sigma_н^2}{(1-\mu)\cdot E}.$$

# Определение Остаточных Напряжений системой АСБ-1



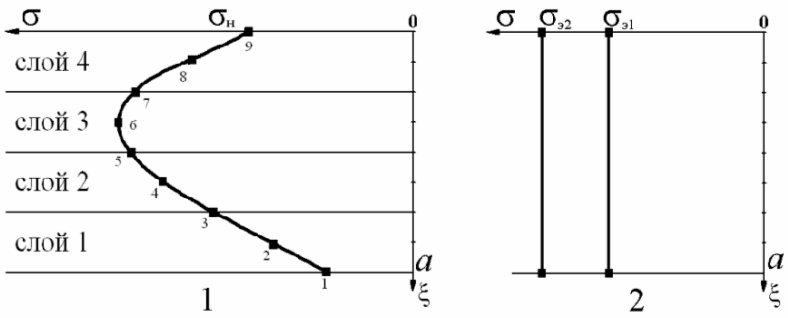

Эпюры ОН в плоских образцах из материала ЭИ-698 ВД
после упрочнения стеклянными микрошариками Ø250 мкм
(ОН определялись на приборе АСБ – 1)
1 – при давлении $p = 0.2$ МПа; 2 – при давлении $p = 0.3$ МПа;
3 – при давлении $p = 0.4$ МПа.




Эпюры ОН в плоских образцах из материала ЭИ-698 ВД
после упрочнения стальными микрошариками Ø315 мкм
(ОН определялись на приборе АСБ – 1)
1 – при давлении $p = 0.15$ МПа; 2 – при давлении $p = 0.30$ МПа;
3 – при давлении $p = 0.45$ МПа; 4 – при давлении $p = 0.60$ МПа.

# Моделирование технологических остаточных напряжений и деформаций на основе метода конечных элементов в системе ANSYS

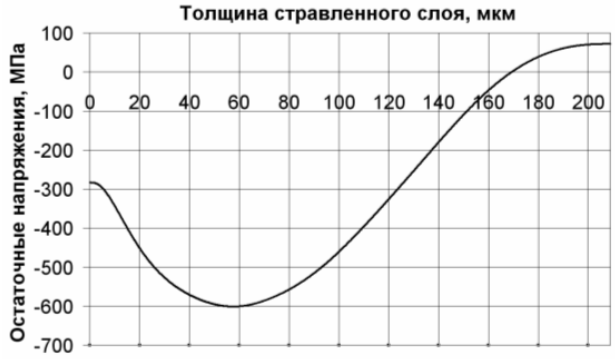
## Моделирование упрочненного поверхностного слоя



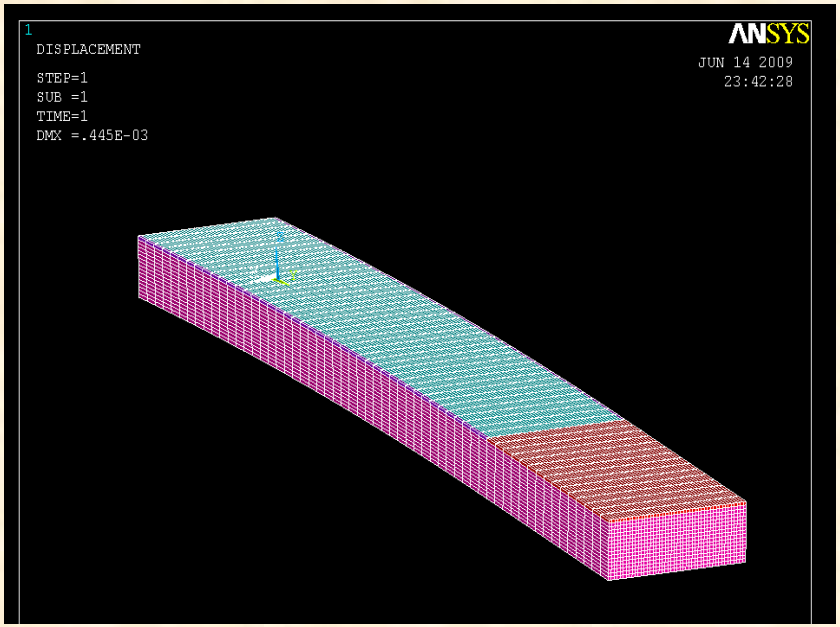

Структура упрочненного поверхностного слоя

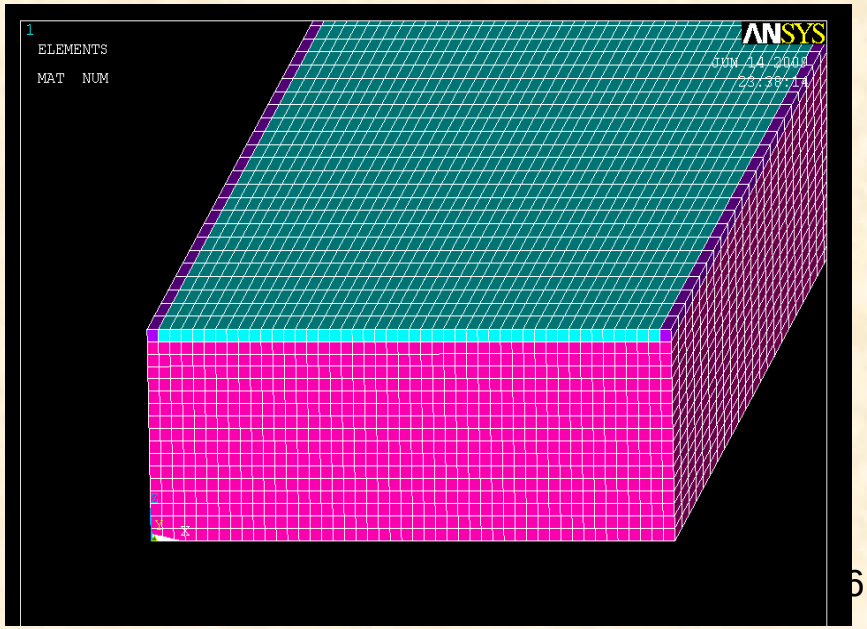
## Деформации деталей типа “Стержень”

***P*** **возд = 0,3 МПа, *d*ш = 315мкм,*V*с = 30 мм/мин.**

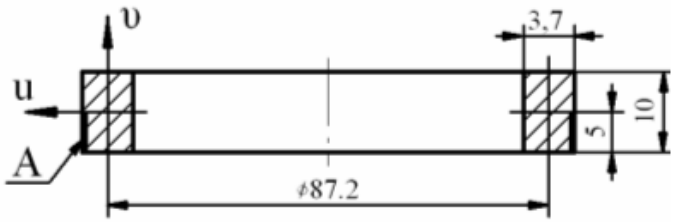



Распределение ОН после упрочнения на выбранном режиме

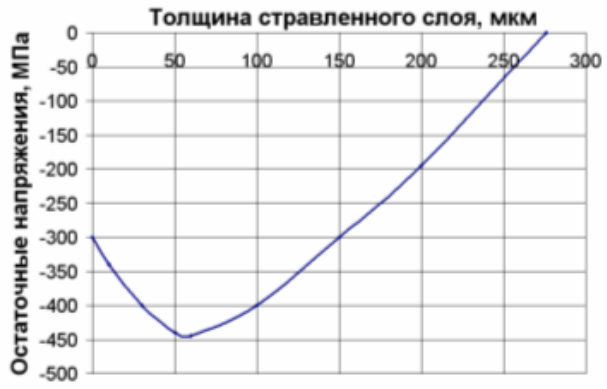


# Моделирование остаточных напряжений в деталях типа “Кольцо”

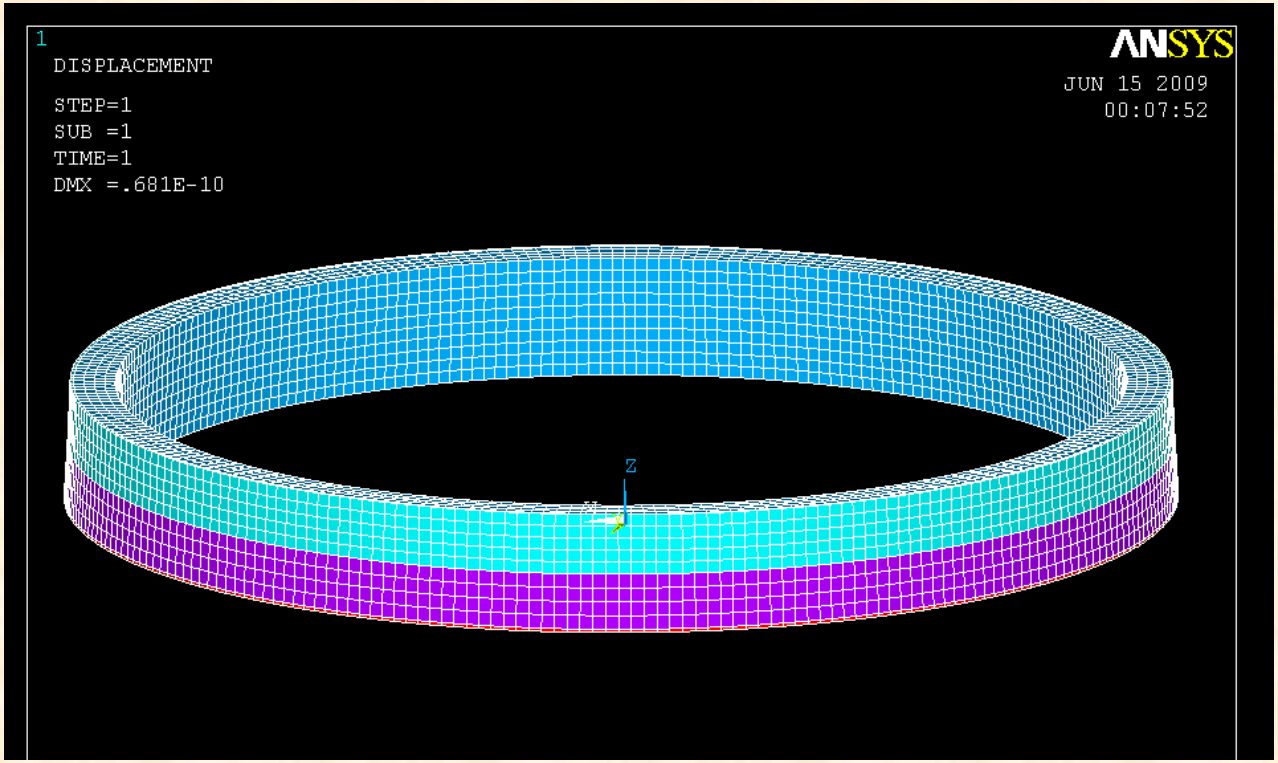



Кольцевой образец
А – обработанная поверхность

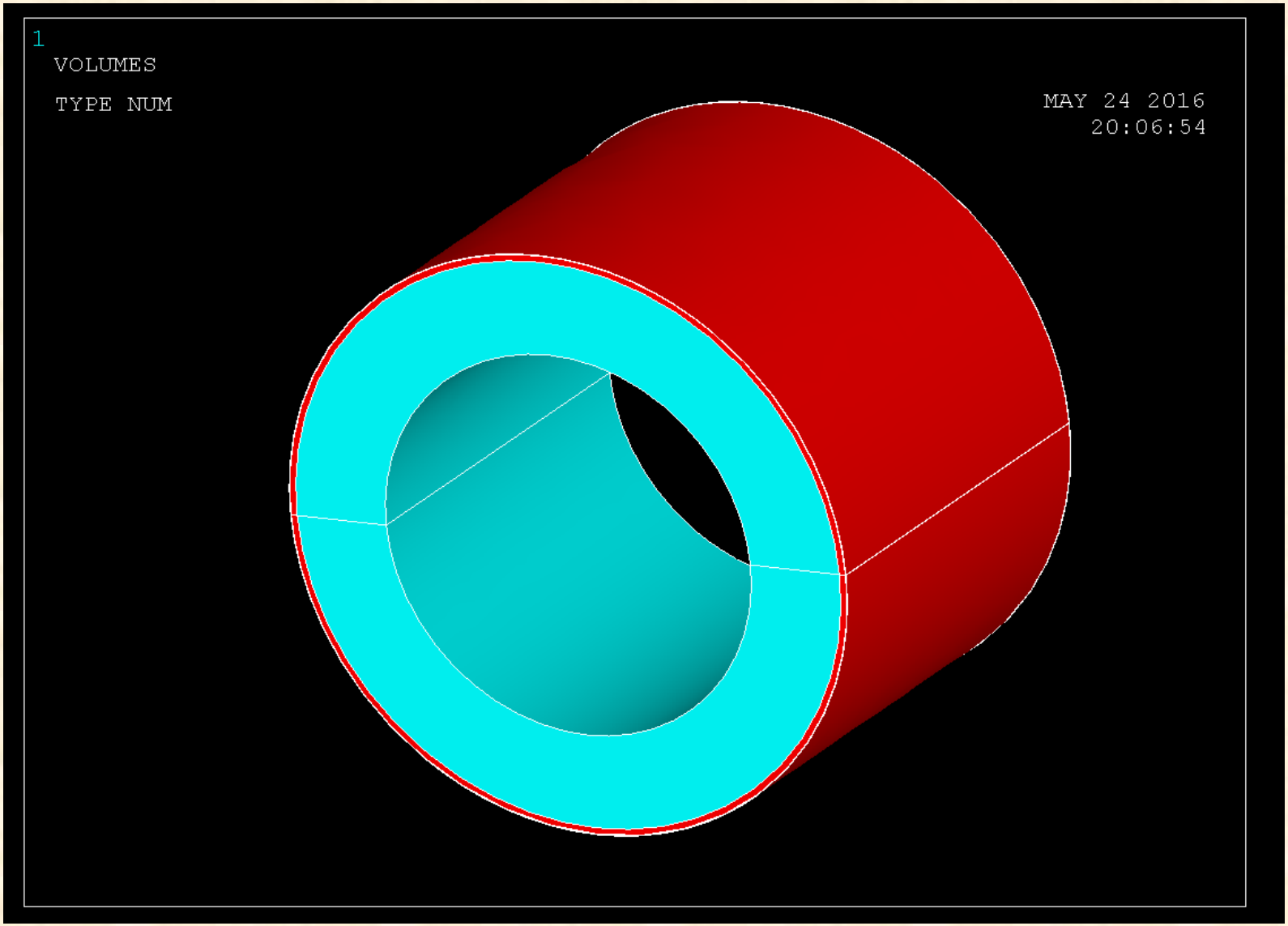


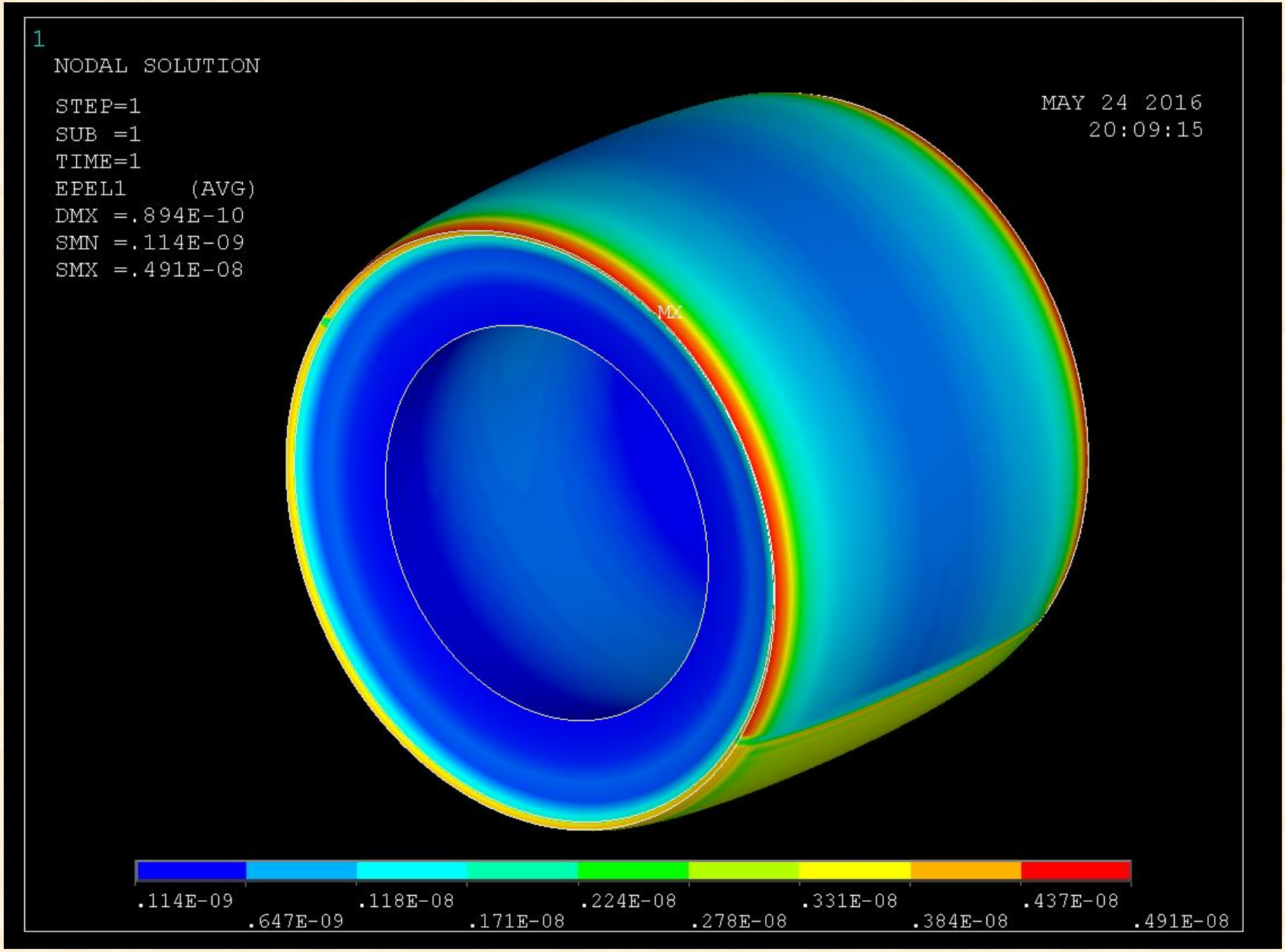

Распределение ОН после дробеструйной обработки

***p*возд = 0,35 МПа**
**Øш= 1,4 – 1,8 мм,**
***t* = 8 мин.**



# Расчёт на прочность трубопроводов с учётом остаточных напряжений в поверхностном слое




1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
EPEL1 (AVG)
DMX =.894E-10
SMN =.114E-09
SMX =.491E-08
MAY 24 2016
20:09:15
MX
.114E-09
.647E-09
.118E-08
.171E-08
.224E-08
.278E-08
.331E-08
.384E-08
.437E-08
.491E-08

# Заключение

- Разработка специализированного исследовательского оборудования;
- Разработка новых методов исследования и моделирования остаточных напряжений, явлений коррозии и прочих эффектов;
- Разработка совершенных методик проведения модельного эксперимента;

позволяют проводить исследования напряжённо-деформированного состояния объектов добычи нефти и газа, натурные испытания которых затруднены или не возможны.



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

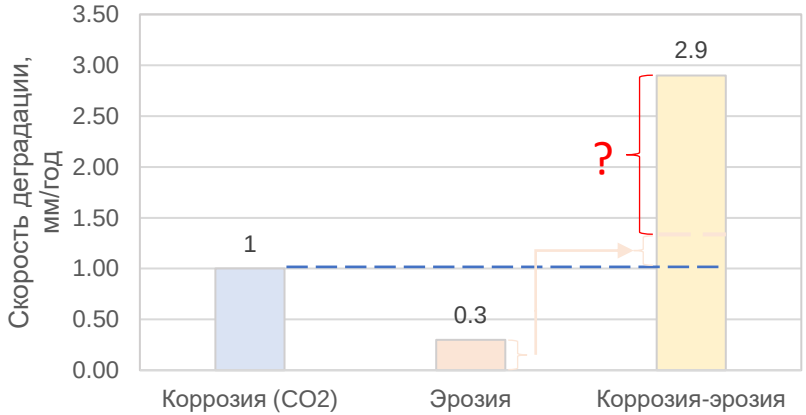
ПОЛИТЕХ
Научно технологический комплекс новые технологии и материалы

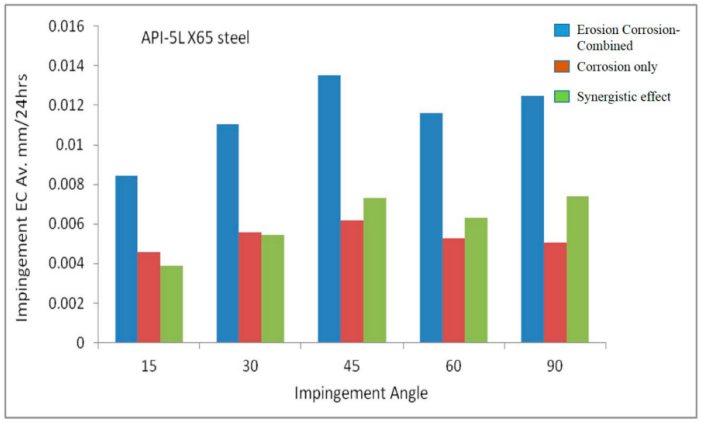
# Оценка взаимного влияния процессов эрозионного и коррозионного износа на деградацию трубных материалов трубопроводов и скважин

**Крук Павел Евгеньевич**
**Голубев Иван Андреевич**

Санкт – Петербург
Сентябрь 2024

**Примеры результатов различных коррозионных, эрозионных и коррозионно-эрозионных испытаний в одинаковых условиях**




Принцип расчета синергетического эффекта взаимного влияния коррозионных и эрозионных процессов друг на друга (по ASTM G119-09):

$$ER_CR = ER + CR + \text{Эффект влияния } ER \text{ на } CR + \text{Эффект влияния } CR \text{ на } ER \#(1),$$

где ER – скорость чистого эрозионного износа, CR – скорость чистого коррозионного износа, ER_CR – общая скорость коррозионно-эрозионного износа с учетом синергетического эффекта

В уравнении (1) эффект влияния ER на CR и эффект влияния CR на ER может оказаться как положительным, так и отрицательным.

$$ER + CR + \text{Эффект влияния } ER \text{ на } CR + \text{Эффект влияния } CR \text{ на } ER\#$$

Эрозионные испытания
Jet Impingement
Аналогично ASTM G76
(только в жидкости)

Коррозионные испытания
Jet Impingement
ASTM G170

Коррозионно-эрозионные испытания
Jet Impingement
ASTM G119

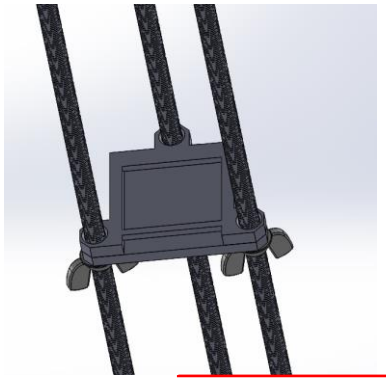
Контролируемые параметры:

- Температура
- Давление
- Расход
- Концентрация O2
- Концентрация CO2
- Гранулометрия песка
- Концентрация песка
- pH
- Минеральный состав раствора
- Шероховатость поверхности образцов
- Время проведения испытаний
- Скорость коррозии в процессе испытаний (LPR)
- Скорость коррозии результирующая (гравиметрия)

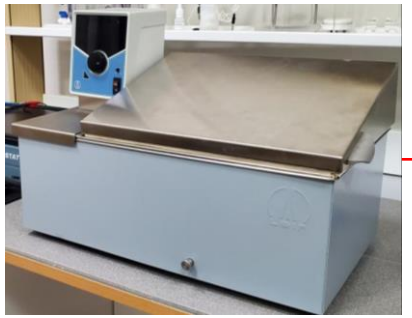
## Изначальный вариант установки



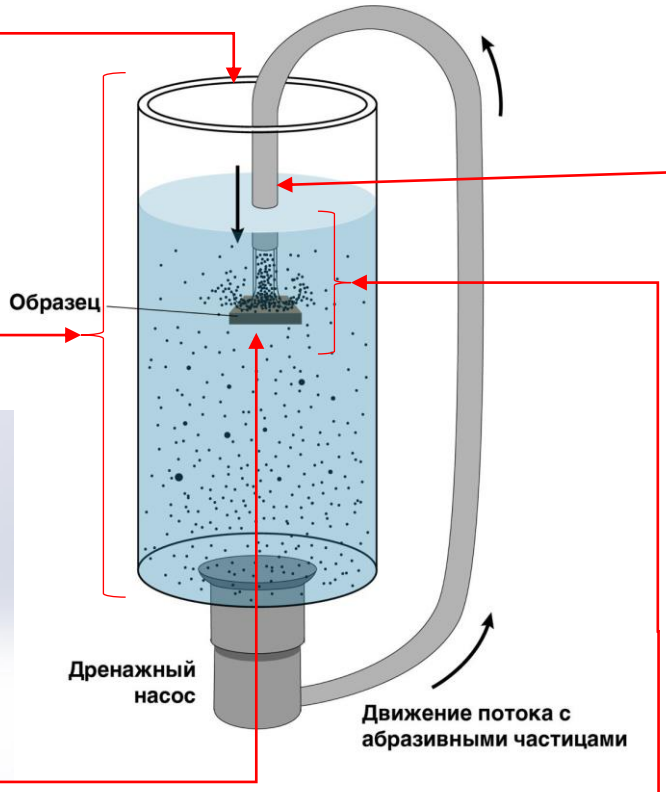
Крышка для герметизации



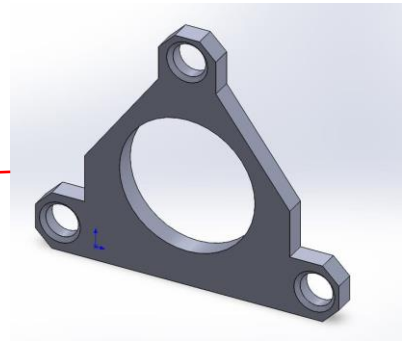
Держатель образца



Система поддержания температуры




LPR трехэлектродный датчик определения скорости коррозии



Держатель сопла

Характеристики установки после модернизации:

Расход – 8.5 м3/ч

Давление – до 3 бар

Температура – до 60 °C

Концентрация O2 – до 70 ppb

Концентрация песка –до 10 г/л

Все компоненты конструкции, взаимодействующие с растворами, выполнены из пластиковых компонентов.

## Параметры моделирования:

**Расход насоса 8.5 м3/ч**

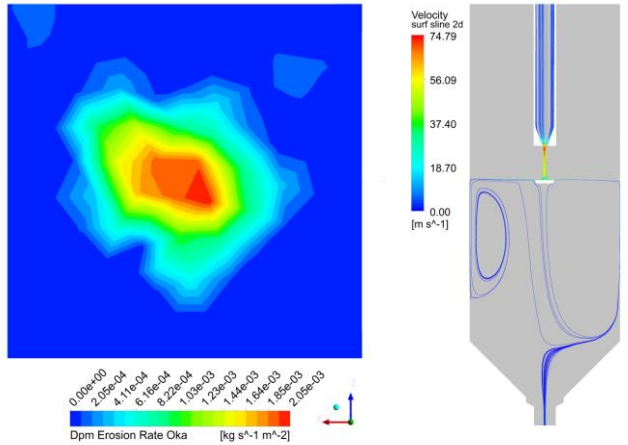
**Концентрация песка 4.2 г/л**

**Средний размер частиц 258 мкм**

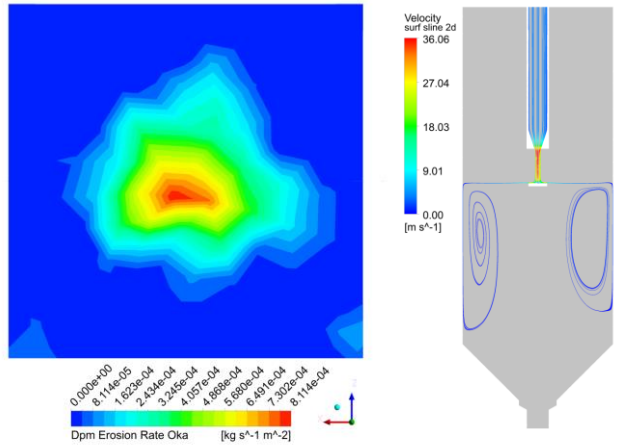
**Расстояние от сопла до образца 6 см**

## Подбор диаметра сопла

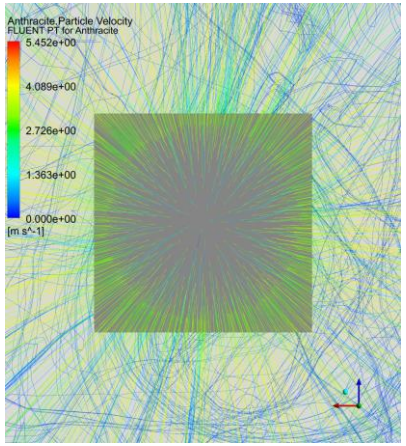
### Сопло 7 мм




### Сопло 10 мм

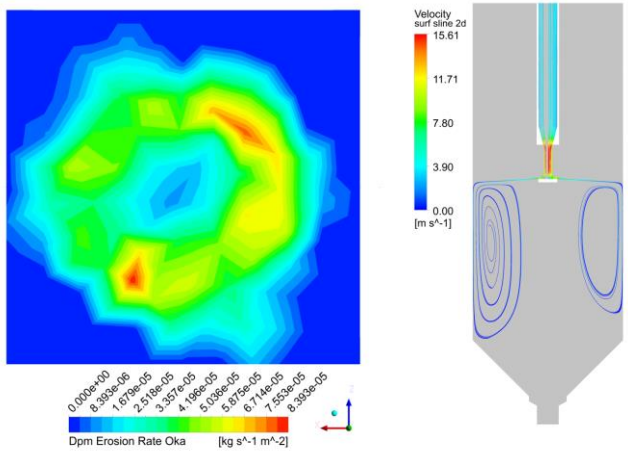



## Верификация модели

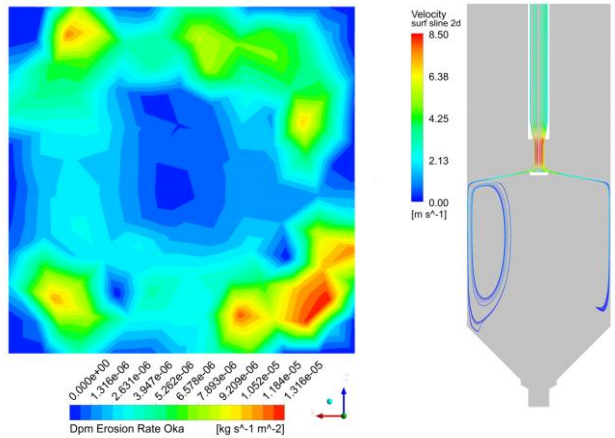





### Сопло 15 мм

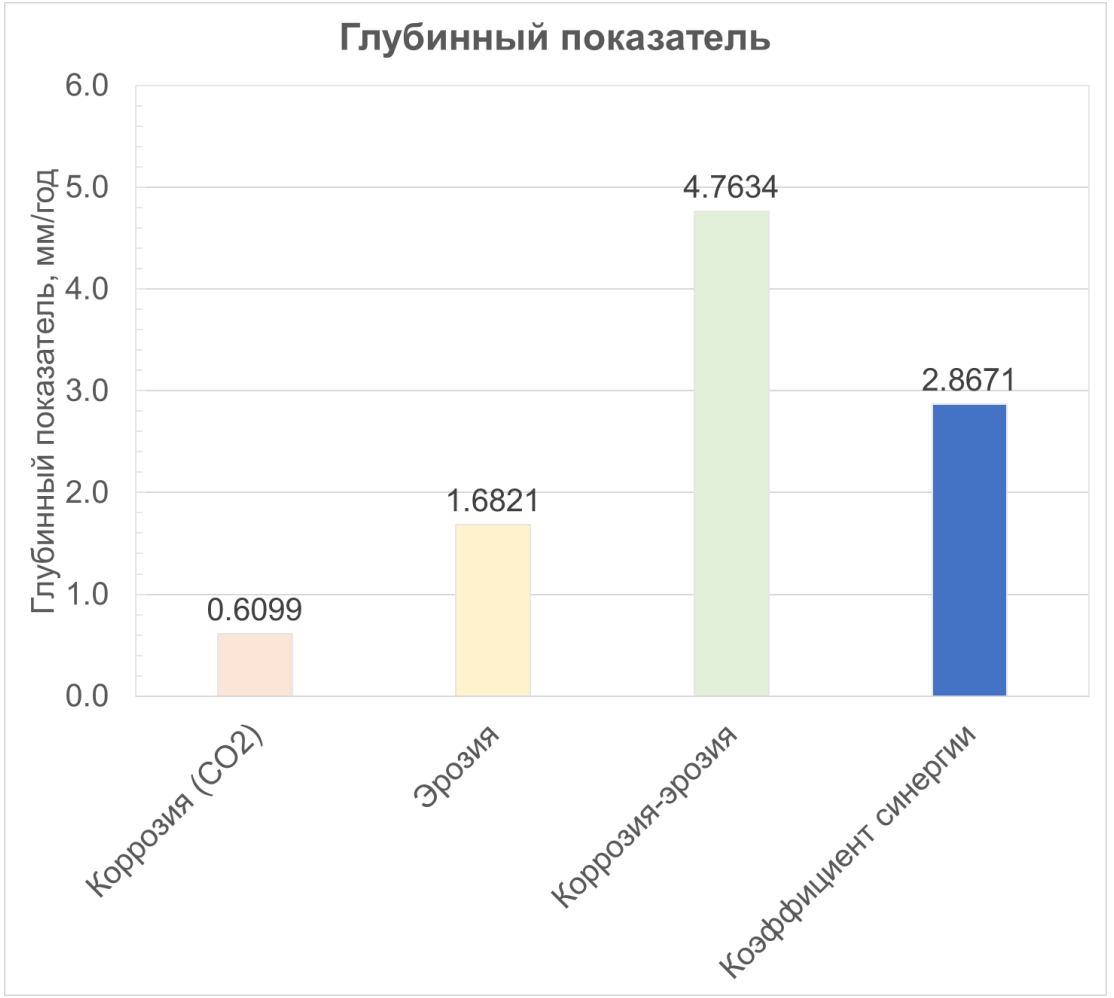



### Сопло 20 мм




**По результатам выбран вариант сопла 12 мм**

| **Результаты эксперимента** | Глубинный показатель, мм/год |
|---|---|
| Коррозия (CO2) | 0.6099 |
| Эрозия | 1.6821 |
| Коррозия-эрозия | 4.7634 |
| | |
| **Расчет синергии** | Глубинный показатель, мм/год |
| Чистая эрозия (**ER**), мм/год | 1.2865 |
| Чистая коррозия (**CR**), мм/год | 0.6099 |
| Общая потеря при коррозии-эрозии (**M**$^{(C-E)}$), мм/год | 4.7634 |
| Скорость коррозии при коррозии-эрозии (электрохимия) (**C**$^{(C-E)}$), мм/год | 0.9157 |
| Скорость эрозии при коррозии-эрозии (**E**$^{(C-E)}$), мм/год | 3.8477 |
| Приращение эрозии вследствие коррозии (**ΔE**), мм/год | 2.5613 |
| Приращение коррозии вследствие эрозии (**ΔC**), мм/год | 0.3058 |
| Коэффициент синергии (**S**), мм/год | 2.8671 |
| | |
| Общая деградация материала при коррозии-эрозии | 4.7634 |



Выводы:

- Синергетический эффект может иметь как достаточно высокое влияние, так и незначительное влияние на коррозионно-эрозионные процессы деградации материалов
- Проведение коррозионно-эрозионных испытаний для выявления синергетического эффекта требует как нескольких методов замеров скорости деградации (гравиметрический, электрохимический), так и определенного объема уточняющего компьютерного математического моделирования

Перспективы дальнейшей работы:

- Дальнейшее улучшение герметизации установки для снижения содержания O2
- Модернизация держателя образцов для более удобной смены образцов
- Подбор оптимального расстояния от сопла до образца и диаметра сопла при помощи компьютерного математического моделирования
- Установка приборов постоянной регистрации уровня pH раствора

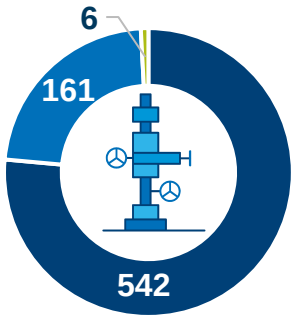
# Комплексный подход по защите погружного оборудования от агрессивной среды

ООО «Газпромнефть-Восток»
ООО «Газпромнефть НТЦ»
Набиев А.В.
25.08.2024 г.

# РЕГИОН ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-ВОСТОК»

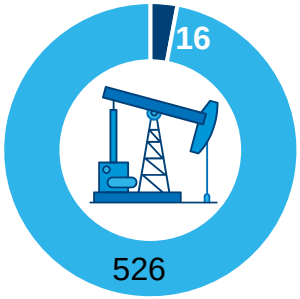



## Фонд скважин




- Нефтяные
- ППД
- водозаборные

## Способ эксплуатации




- Фонтан
- УЭЦН

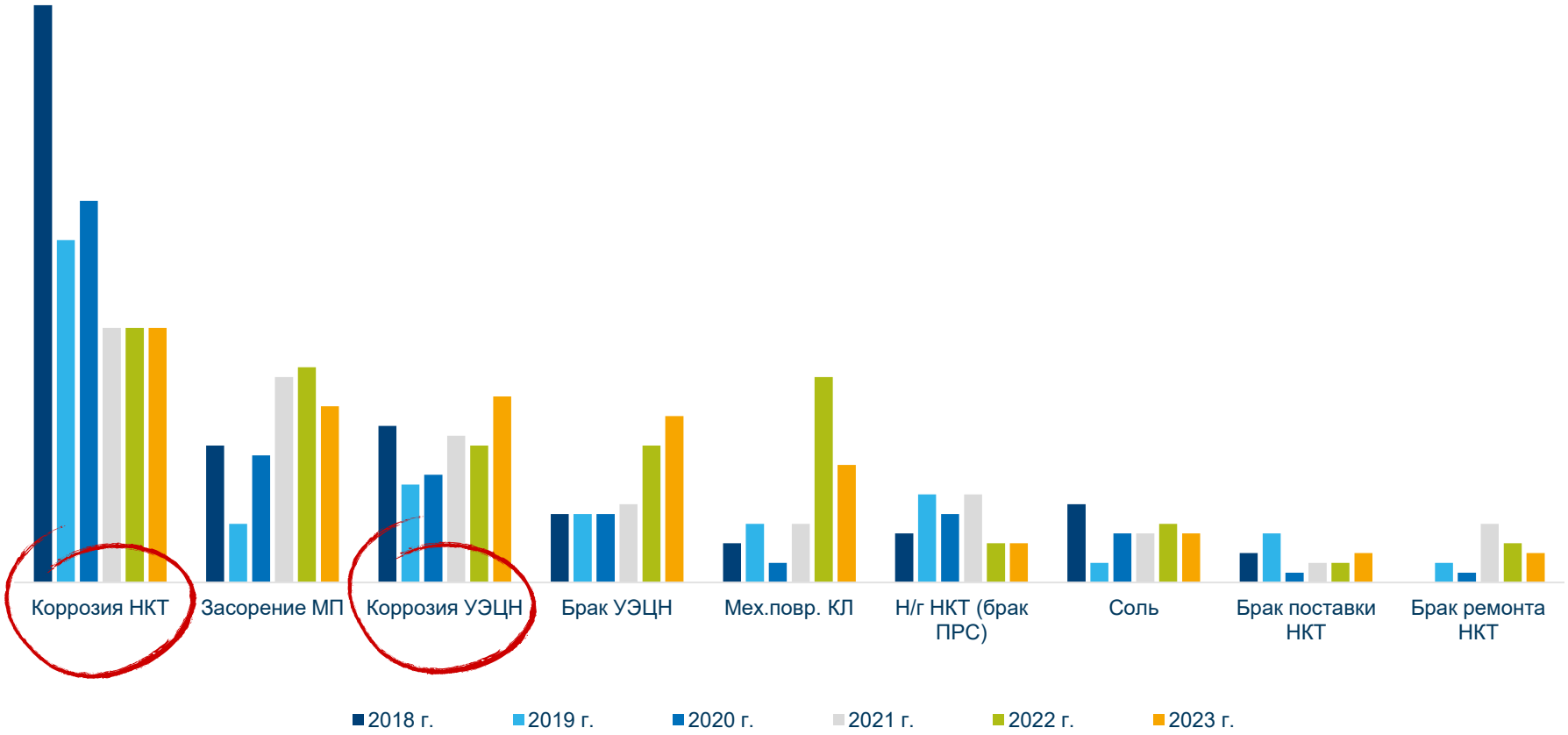
## Осложненный фонд



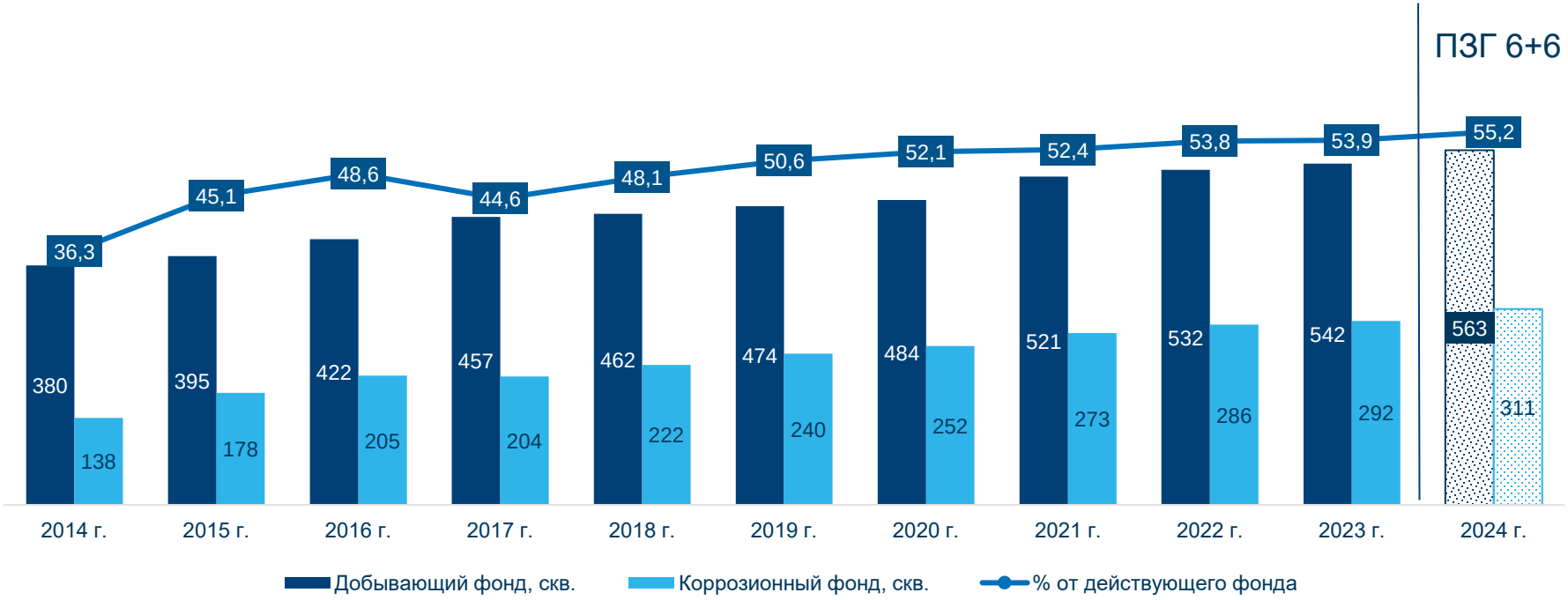

- Коррозия
- Соли
- Т(Более 90грС)
- ГФ (более 90м3/тн)
- АСПО

- Действующий фонд нефтяных скважин – 542 скважин;
- Механизированный способ добычи УЭЦН – 526 скважин;
- 54% фонда добывающих скважин осложнены коррозии и солеотложением.

# ДИНАМИКА ОТКАЗОВ ВНУТРИСКВАЖИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ (ВСО) ПО ПРИЧИНАМ И УЗЛАМ ЗА ПЕРИОД 2018-2023 гг.



# ДИНАМИКА КОРРОЗИОННОГО ФОНДА




| | |
|---|---|
| **По типу разрушения** | Язвенная, мейза-коррозия |
| **По характеру взаимодействия со средой** | Электро-химическая |
| **По условиям протекания** | Жидкостная |

| | |
|---|---|
| **Основные коррозионные факторы** | высокая минерализация (в среднем 50-70 г/дм$^3$) |
| | высокое содержание растворенного углекислого газа (до 350 мг/дм$^3$) |
| | рост обводнённости |

Водная среда объектов ГПН-Восток относится к сильноагрессивной (согласно РД 39-0147103-362-86)

# ХАРАКТЕРНЫЕ ПРИМЕРЫ МАСШТАБА КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОГРУЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ



Скв. №1609 Арчинского м/р.
Дата отказа 07.03.2019г.
Отсутствие части тела 79 НКТ НКТ 73'-Л «ЧТПЗ»
Наработка 184 сут.



Скв. №1307 Арчинского м/р.
Дата отказа 07.05.2018г.
Коррозионное отверстие (тело НКТ) с 94-96 НКТ 73'-К «ПНТЗ».
Наработка 93 сут.



Скв. 1013 Арчинского м/р.
Дата отказа 08.04.2018г.
Коррозионное отверстие (тело НКТ) с 47-54 НКТ 73'В-К «ПНТЗ».
Наработка 148 сут.



Скв. №1609 Арчинского м/р.
Дата отказа 07.03.2019г.
Коррозионное отверстие (тело НКТ) с 1-267 НКТ 73'-Л «ЧТПЗ»
Наработка 184 сут.



Скв. 1202 Арчинского м/р.
Дата отказа 08.04.2018г.
Коррозионное отверстие (тело НКТ) 84 НКТ 73'В-К «ПНТЗ».
Наработка 137 сут.



Скв. 1304 Арчинского м/р.
Дата отказа 29.05.2018г.
Коррозионное отверстие (тело НКТ) 63 НКТ 73'-Л «ПНТЗ».
Наработка 98 сут.

# ТЕХНОЛОГИИ ПО БОРЬБЕ С КОРРОЗИЕЙ НКТ (УСПЕШНЫЕ ОПИ)



| TC3000 | |
|---|---|
| Углекислый газ (CO2) | + |
| Сероводород (H2S) | + |
| Сульфатовосстанавливающие бактерии | + |
| Кислотная обработка | + |
| АСПО | + |
| Солеотложение | + |

**Достоинства**

- Значительное (в десятки раз) снижение скорости коррозии.
- Защищено межниппельное пространство.
- Возможно проведение СКО и ГКО.

**Недостатки**

- Для проведения СПО требуется доп. оборудование
- Дополнительные операции при ремонте (контроль диэлектрической сплошности).
- Необходимо восстановление покрытия на торцевой части после ремонта.



| MPLAG 96/C | |
|---|---|
| Углекислый газ (CO2) | + |
| Сероводород (H2S) | + |
| Сульфатовосстанавливающие бактерии | + |
| Кислотная обработка | + |
| АСПО | + |
| Солеотложение | + |

**Достоинства**

- Значительное (в десятки раз) снижение скорости коррозии.
- Защищено межниппельное пространство.
- Возможно проведение СКО и ГКО.

**Недостатки**

- В процессе эксплуатации на автономных месторождениях Урмано-Арчинской группы имели место отслоения покрытия в процессе эксплуатации. В связи с чем пришлось усилить требования к физико-механическим характеристикам полимерных покрытий.

# ТЕХНОЛОГИИ ПО БОРЬБЕ С КОРРОЗИЕЙ НКТ (УСПЕШНЫЕ ОПИ)



| Лейнеры: GH6S и DCS INOXINSIDE | |
|---|---|
| Углекислый газ (CO2) | + |
| Сероводород (H2S) | + |
| Сульфатовосстанавливающие бактерии | + |
| Кислотная обработка | - |
| АСПО | - |
| Солеотложение | - |

**Достоинства**

- Антикоррозионные свойства легированной трубы без ухудшения рабочих характеристик.
- Можно применять к бывшим в эксплуатации ремонтным трубам.

**Недостатки**

- Требуется особая технология ремонта;
- Высокая стоимость стали кожуха;



| «Дельта 5+» | |
|---|---|
| Углекислый газ (CO2) | + |
| Сероводород (H2S) | + |
| Сульфатовосстанавливающие бактерии | + |
| Кислотная обработка | - |
| АСПО | - |
| Солеотложение | - |

**Достоинства**

- Значительное снижение скорости коррозии;
- Покрытие устойчиво к соскабливанию;
- Труба защищена с обеих сторон;
- Высокая адгезия покрытия;
- Ремонтопригодность в условиях существующей технологии ремонта НКТ

**Недостатки**

- Муфты не имеют защиту от коррозии.
- Невозможно проведение СКО и ГКО.
- Высокая стоимость покрытия
- Относится к протекторной (катодной) защите НКТ.

# ТЕХНОЛОГИИ ПО БОРЬБЕ С КОРРОЗИЕЙ НКТ (НЕ УСПЕШНЫЕ ОПИ)

## НКТ с внутренним защитным покрытием ГИОТЭК 150М



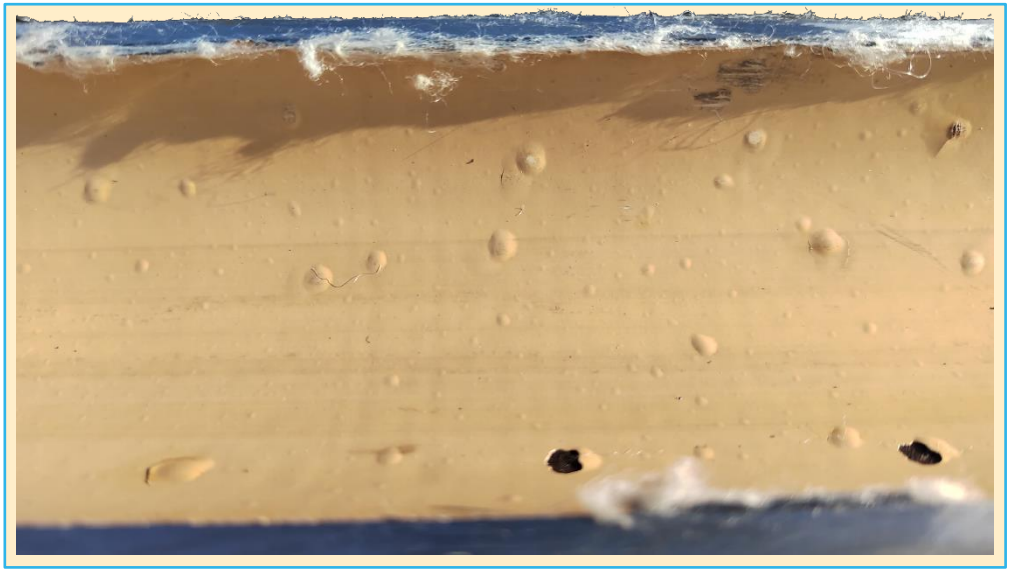




Технология защитного покрытия ГИОТЭК 150 М не эффективна на скважинах КФ ООО «Газпромнефть-Восток»:
- не обеспечивается сохранность покрытия на торцевой части и первых (заходных) витках НКТ в процессе проведения спуско-подъемных операций;
- с целью исключения дефектов покрытия (наплывы, раковины, поры), а также для обеспечения равномерности нанесения покрытия в установленных ТУ диапазонах толщины;
- в межниппельной части применяется покрытие, изготовленное по другим техническим условиям, не заявленным в ОПИ.

# ТЕХНОЛОГИИ ПО БОРЬБЕ С КОРРОЗИЕЙ НКТ (НЕ УСПЕШНЫЕ ОПИ)

НКТ с внутренним защитным полимерным покрытием MAJORPACK reziPLY87







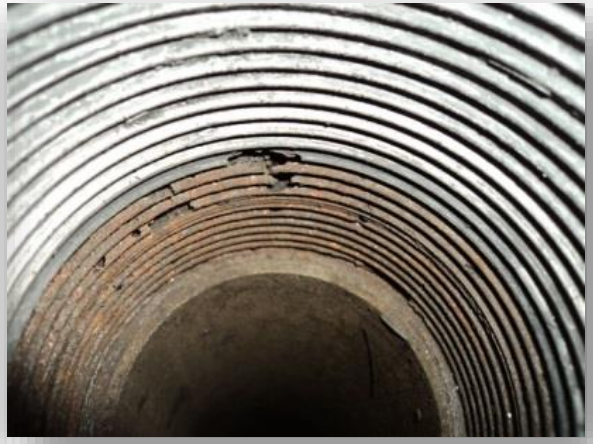
**Виды повреждений:**
- вздутие; отслоение и растрескивание покрытия;
- отслоение покрытия на торцевой части.

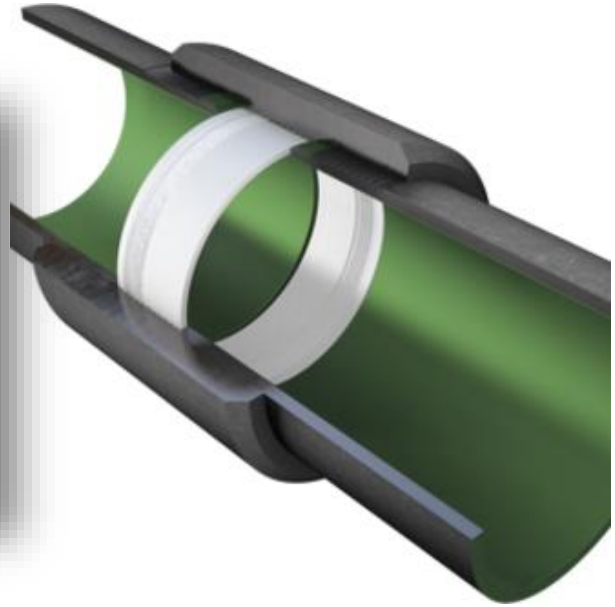
**Возможные причины:**
- нарушение температуры;
- газопроницаемость;
- некачественная подготовка поверхности перед нанесением покрытия.

# ВСТАВКА ДЛЯ ЗАЩИТЫ МЕЖНИППЕЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА НКТ

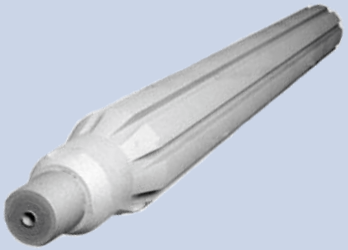
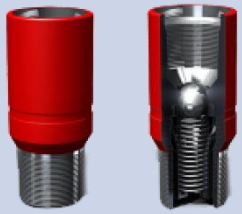
| Технология | | Описание | Внедрено |
|---|---|---|---|
|  | Межниппельная защита НКТ | • Предохранительная вставка, защищает торцевую часть ниппеля НКТ и предотвращает коррозию резьбового соединения «труба-муфта».<br>• Минимизирует и устраняет зазор соединения «труба-муфта», обеспечивает герметичность соединения, препятствуя абразивному и эрозионному износу, вследствие воздействия большой скорости добываемого флюида. | • Установлено на 100% скважин КФ;<br>• Внедряется установка на КОШ и СК |







# ТЕХНОЛОГИИ ПО БОРЬБЕ С КОРРОЗИЕЙ УЭЦН

| Технология | | Описание | Внедрено |
|---|---|---|---|
|  | Протекторная защита | к УЭЦН подсоединяется металл с более электроотрицательным потенциалом. При этом идет разрушение не конструкции, а протектора | Всего по механизированному фонду - 99 шт. |
| | Коррозионно-стойкий газосепаратор | Внедрение входных модулей и газосепараторов из коррозионно-стойкой стали | Всего по механизированному фонду - 278 шт. |
|  | Концевые детали из нержавейки | Внедрение концевых деталей к насосным секциям из коррозионно-стойкой сталей марки 40Х13 | Всего по механизированному фонду - 121 шт. |
| | Монельное напыление ПЭД | Монель - это коррозиестойкий медно-никелевый сплав. Наносится на корпус статора ПЭД с помощью электродуговой металлизации | Применяется адресно по причние высокой стоимости |
|  | КОШ и СК из коррозионно-стойкой стали | Внедрение сливных и обратных шаровых клапанов из коррозионно-стойкой стали 40Х13 | Всего по механизированному фонду - 30 шт. |

# Ингибитор коррозии



Практика применения противокоррозионной защиты внутрискважинного оборудования демонстрирует, что ингибиторная защита не обеспечивает значительного эффекта в защите внутренней поверхности НКТ из-за жестких коррозионно-агрессивных условий (высокая температура, большое содержание КВЧ, высокие скорости движения ГЖС). Однако данный метод является наиболее экономичным и может быть реализован в кратчайшие сроки. Поэтому, ингибиторная защита может применяться как экстренное мероприятие для достижения максимального охвата осложненного фонда скважин защитой до момента обеспечения скважины оборудованием в коррозионностойком исполнении.

Для фонда скважин ООО «Газпромнефть-Восток» успешно завершены ОПИ и разрешены к применению следующие ингибиторы коррозии:

| Тип ХР | Производитель | Наименование реагента |
|---|---|---|
| Ингибитор коррозии для ВСО | ООО ЭЗ "Нефтехим" | Ипроден К-1 марки Б |
| | АО "Опытный завод Нефтехим | Сонкор 9920 марка А |
| | ОАО "Котласский химический завод" | Азол 5045 марки В |
| Ингибитор комплексного действия | ООО НПО "Акватек" | Акватек 515 марка М |
| | ООО ЭЗ "Нефтехим" | Ипроден К-2 |
| | ООО "Котласский химический завод" | Азол 3020 марка А |

# КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПО БОРЬБЕ С КОРРОЗИЕЙ

- **100%** охват защиты КФ
- Адресный (интервальный) подход к защите КФ
- **90%** КФ зазащищено НКТ в КСИ
- **10%** НКТ цинковое покрытие
- **80%** НКТ полимерное покрытие
- Превентивные меры защиты НКТ
- Применение ингибитора коррозии на малодебитном фонде
- **100%** КФ установлены межниппельные вставки
- **100%** КФ защищены газосепараторами КСИ
- **100%** КФ защищены концевыми деталями из коррозионно-стойкой стали
- **19%** КФ защищены протекторами коррозии (55 шт.)
- Адресный подход по защите статора ПЭД монельным напылением
- ППР по скважинам с высокой наработкой
- Снижение отказов по коррозии на 40% по отношению к тренду 2014 - 2018 гг. и стабильно низкий уровень отказов за последние 5 лет





НКТ с внутренним полимерным покрытием



Межниппельные вставки для НКТ, КОШ и СК



Газосепаратор коррозионно-стойкого исполнения, монельное покрытие ПЭД

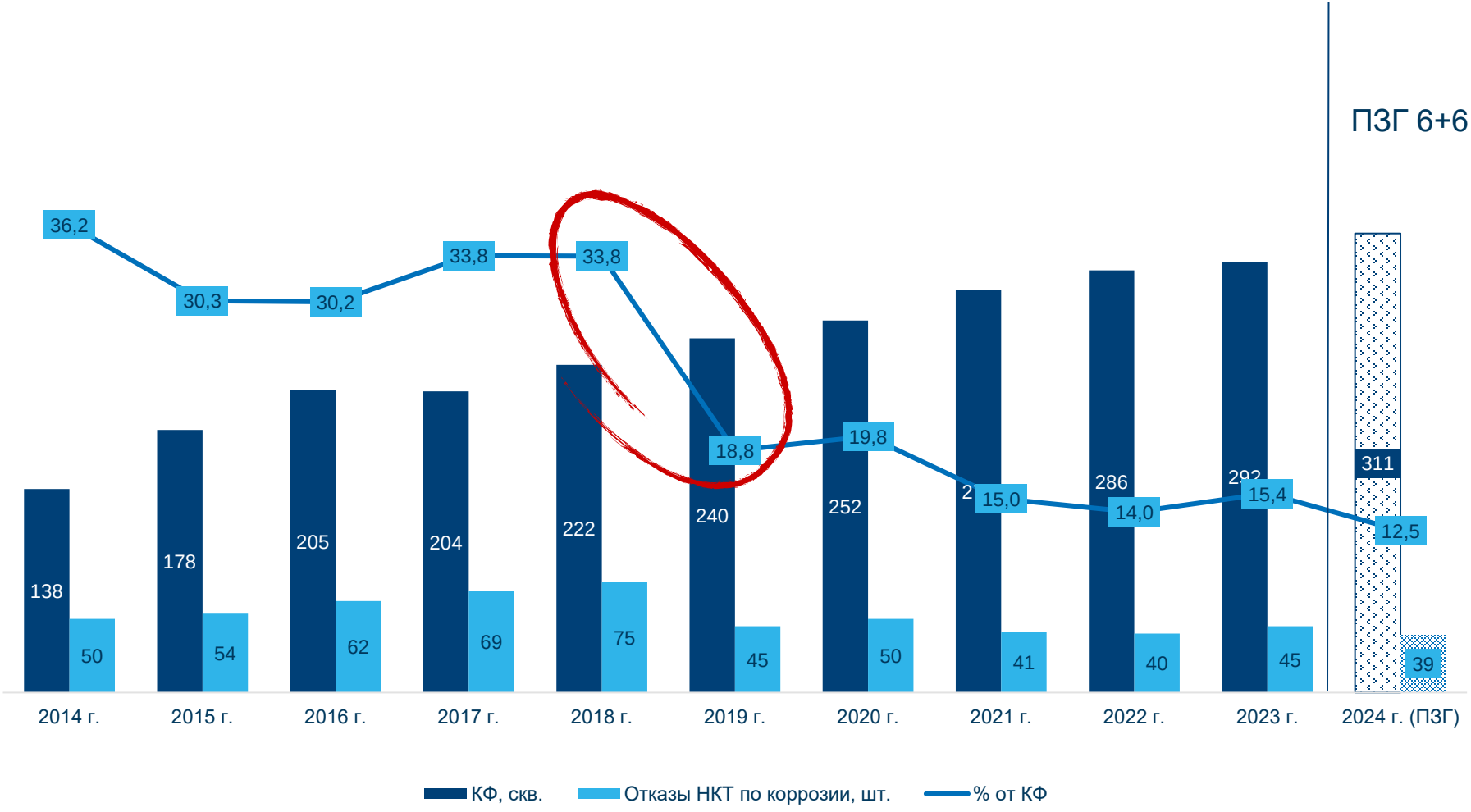


Концевые детали, КОШ и СК из нержавейки



Протектор коррозии

# РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПО БОРЬБЕ С КОРРОЗИЕЙ



# Контакты

**Набиев Алексей Валериевич**
Начальник управления техники и технологии добычи нефти и газа ООО «Газпромнефть-Восток»

тел: (+7 3822) 310-810 (доб. 1205)
факс: 310-805
Nabiev.AV@tomsk.gazprom-neft.ru

# ПОДВАЛ

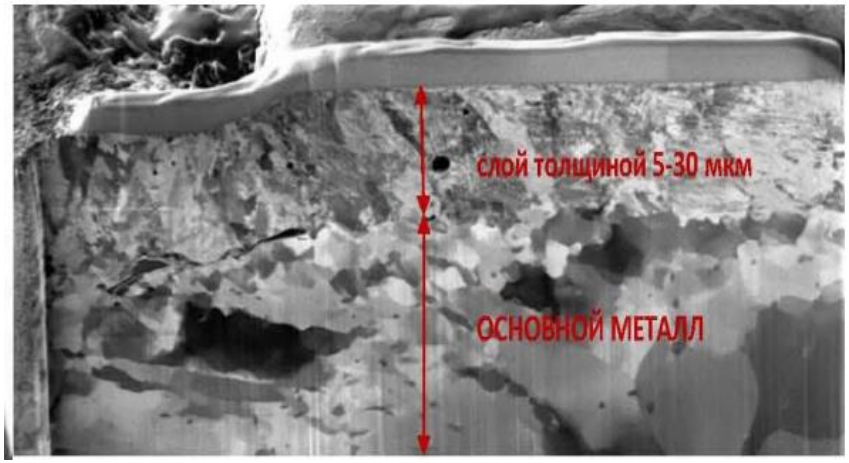
# Планы по проведению ОПИ



**Нефтепогружной кабель 3х16 4кВ без бронеленты**

Успешное внедрение позволит:
- Снизить отбраковку по коррозии;
- Снизить отбраковку по мех.повреждениям;
- Повысить % работоспособности ТМС;
- Увеличить НнО.

**Текущий статус:** спущено 3 кабельные линии




**Нанесение минерального покрытия на устьевое оборудование**

Минеральное покрытие штуцеров и деталей устьевого обратного клапана позволит увеличить их эксплуатационные характеристики и сопротивление коррозии.

Использование минеральных покрытий позволяет заменить ряд трудоемких операций и технологических процессов: шлифование, поверхностную закалку, азотирование, хромирование и т.п. и добиться значительного упрочнения поверхности металла.

**Текущий статус:** проведение ОПИ

# ПРИРОДА КОРРОЗИОННОГО ПРОЦЕССА

**Коррозия** – это физико-химическое или химическое взаимодействие между металлом (сплавом) и средой, приводящее к ухудшению функциональных свойств металла (сплава), среды или включающей их технической системы.

**Коррозия** - переход металла в более энергетически выгодное состояние с меньшим запасом энергии (оксид железа – естественное состояние для металла).

На месторождениях ООО «Газпромнефть-Восток» превалирует **коррозия углекислотного типа**:

$CO_{2\ раств.} \rightarrow CO_{2\ адс.}$

$CO_{2\ адс} \overset{+H_2O}{} H_2CO_{3\ адс.}$

$H_2CO_{3\ адс.} + \bar{e} \rightarrow H^+_{адс} + HCO_3^-{}_{адс}$;

$H^+_{адс} + H^+_{адс} \leftrightarrow H_2\uparrow$.

$H^+ + H_2O + \bar{e} \leftrightarrow H_2O + {}^1/_2\ H_2$.

$Fe + nH_2O \leftrightarrow Fe^{2+} \cdot nH_2O + 2\bar{e}$.

Свободная углекислота оказывает большое влияние на интенсивность и скорость коррозии

| **Парциальное давление** | |
|---|---|
| Менее 0,02 МПа | ▪ Коррозионно-неопасная среда |
| Более 0,02 МПа | ▪ Возможны средние скорости коррозии |
| Много более 0,02 МПа | ▪ Высококоррозионная среда |

# ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ ПОГРУЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

| № п/п | причины отказов | 12 месяцев 2022 | | 500 | 12 месяцев 2023 | | 526 | + / - | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Кол-во отказов | % от общего | % к СДФ | Кол-во отказов | % от общего | % к СДФ | Кол-во отказов | % от общего | % к СДФ |
| 1 | Негерметичность НКТ, в т.ч. | **46** | 22,8% | 9,2% | **43** | 19,7% | 8,4% | **-3** | -1,4% | -0,6% |
| 1.1. | по коррозии | **26** | 12,9% | 5,2% | **26** | 11,9% | 5,1% | **0** | 0,0% | 0,0% |
| 1.2. | нарушение СПО при КРС | **4** | 2,0% | 0,8% | **4** | 2,3% | 1,0% | **1** | 0,5% | 0,2% |
| 1.3. | брак ремонта НКТ | **4** | 2,0% | 0,8% | **3** | 1,4% | 0,6% | **-1** | -0,5% | -0,2% |
| 1.4. | брак завода | **2** | 1,0% | 0,4% | **3** | 1,4% | 0,6% | **1** | 0,5% | 0,2% |
| 1.5. | высокая наработка | **9** | 4,5% | 1,8% | **4** | 1,4% | 0,6% | **-6** | -2,8% | -1,2% |
| 1.6. | Прочие (Окалина, негермет ЭК, НКТ-КОШ) | **1** | 0,5% | 0,2% | **3** | 1,4% | 0,6% | **2** | 0,9% | 0,4% |
| 2 | нарушение СПО при КРС(КЛ) | **21** | 10,4% | 4,2% | **12** | 5,5% | 2,4% | **-9** | -4,1% | -1,8% |
| 3 | Авария(НКТ, КОШ) | **0** | 0,0% | 0,0% | **0** | 0,0% | 0,0% | **0** | 0,0% | 0,0% |
| 4 | Отложение твердого осадка | **6** | 3,0% | 1,2% | **5** | 2,3% | 1,0% | **-1** | -0,5% | -0,2% |
| 5 | Парафиноотложения | **0** | 0,0% | 0,0% | **0** | 0,0% | 0,0% | **0** | 0,0% | 0,0% |
| 6 | Засорение мехпримесями | **22** | 10,9% | 4,4% | **18** | 8,3% | 3,5% | **-4** | -1,8% | -0,8% |
| 7 | Снижение притока | **0** | 0,0% | 0,0% | **2** | 0,9% | 0,4% | **2** | 0,9% | 0,4% |
| 8 | Влияние газа | **2** | 1,0% | 0,4% | **5** | 2,3% | 1,0% | **3** | 1,4% | 0,6% |
| 9 | Износ рабочих органов | **73** | 36,1% | 14,6% | **81** | 37,2% | 15,9% | **8** | 3,7% | 1,6% |
| 10 | Коррозия ПЭД, ЭЦН, ГЗ, ГС, СК, ОК | **14** | 6,9% | 2,8% | **19** | 8,7% | 3,7% | **5** | 2,3% | 1,0% |
| 11 | Некачественный монтаж | **0** | 0,0% | 0,0% | **0** | 0,0% | 0,0% | **0** | 0,0% | 0,0% |
| 12 | Брак ремонта УЭЦН, ГЗ, ПЭД(СЦ ЭПУ) | **14** | 6,9% | 2,8% | **17** | 7,8% | 3,3% | **3** | 1,4% | 0,6% |
| 13 | Брак в эксплуатации УЭЦН | **1** | 0,5% | 0,2% | **0** | 0,0% | 0,0% | **-1** | -0,5% | -0,2% |
| 14 | Брак кабеля | **0** | 0,0% | 0,0% | **0** | 0,0% | 0,0% | **0** | 0,0% | 0,0% |
| 15 | Не подготовленность скважины | **0** | 0,0% | 0,0% | **0** | 0,0% | 0,0% | **0** | 0,0% | 0,0% |
| 16 | Негерметичность ЭК | **1** | 0,5% | 0,2% | **0** | 0,0% | 0,0% | **-1** | -0,5% | -0,2% |
| 17 | В ожидании разбора (подъема) | **1** | 0,5% | 0,2% | **16** | 7,3% | 3,1% | **15** | 6,9% | 2,9% |
| 18 | Организационные причины ЦДНГ | **1** | 0,5% | 0,2% | **0** | 0,0% | 0,0% | **-1** | -0,5% | -0,2% |
| | итого (без ГТМ) | **202** | 99,5% | 40,4% | **218** | 100,0% | 42,7% | **16** | | |

# ЗАЩИТА НКТ
# ВСТАВКА ДЛЯ ЗАЩИТЫ МЕЖНИППЕЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА






В результате действия турбулентного потока агрессивной среды, особенно с повышенным содержанием твердых взвешенных частиц, возникает щелевая коррозия в муфтовых соединениях НКТ. Данный вид коррозии приводит к «полетам» подвески НКТ по резьбовой части.

**MP Streamer (Стример)** – предохранительная вставка, созданная для защиты торцевой части ниппеля НКТ и предотвращения коррозии резьбового соединения «труба-муфта» в результате воздействия потока на незащищенную резьбовую часть соединения.
Минимизирует и устраняет зазор соединения «труба-муфта», Стример обеспечивает герметичность соединения, препятствуя абразивному и эрозионному износу, вследствие воздействия большой скорости добываемого флюида.

**Основные преимущества:**
- Защищает от потока флюида ниппель НКТ трубы, а также уязвимую внутреннюю поверхность муфты;
- Ширина стримера адаптируется под конкретное соединение (телескопически);
- Температура эксплуатации 200°-220°С;
- Легкость установки не требует специальной подготовки и может выполняться в полевых условиях, без использования специального оборудования;
- Можно использовать вне зависимости от состояния трубы – как в новой, так и б/у НКТ;
- Время установки 1 шт. – 15-30 секунд.

В настоящий момент в ООО «Газпромнефть-Восток» применяются межниппельные вставки производства ООО «Энергогарант».
Являются аналогом стримеров Majorpack, но имеют стоимость в 2 раза меньше.

# ЗАЩИТА УЭЦН
# ПРОТЕКТОРНАЯ (КАТОДНАЯ) ЗАЩИТА



При использовании протекторной защиты к УЭЦН подсоединяется металл с более электроотрицательным потенциалом. При этом идет разрушение не конструкции, а протектора.

На месторождениях Общества применяются протекторы из алюминиево-магниевого сплава.

- Критерием применения протекторной защиты является сквозная коррозия узлов УЭЦН;
- На 31.12.2019г. внедрено 92 протекторов коррозии;
- По скважинам укомплектованным протекторной защитой УЭЦН отказов по причине коррозии узлов УЭЦН нет.

Минусы

Со временем протектор корродирует и требуется замена новый.

Время защиты проректора зависит от интенсивности коррозии

Протекторная защита обеспечивает только локальную защиту поверхности, расположенной на небольшом удалении от протектора. Метод пригоден для защиты ПЭД, УЭЦН. Рекомендуется для обводненности более 60%.

# ЗАЩИТА УЭЦН



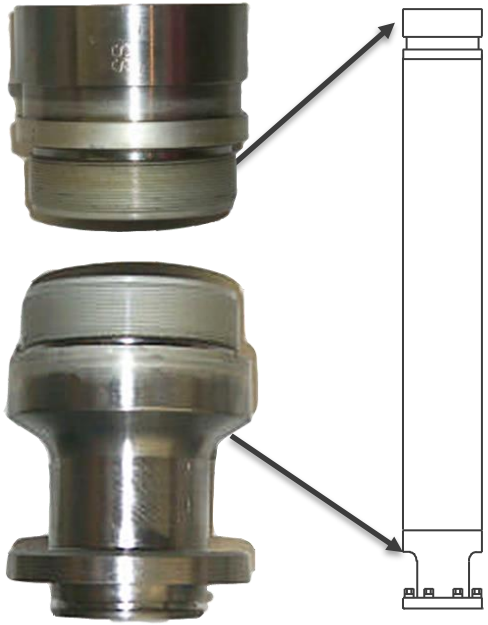
Для снижения отказов по входному устройству:

Внедрение модернизированных ГС;

Замена ГС на ВМ(54 в 2018г.);

Проведение ППР по скважинам с высокой НнО, в т.ч. с KGSM2(в 2018г. проведено ППР на 57 скважинах со средним МРП 841 сут., и максимальным МРП 1471 сут., в 2017г. проведено 43 ППР).

Концевые детали из нержавеющей стали



- Применеие концевых деталей насоса, обратных и сливных клапанов из стали 40Х13;
- Внедрение концевых деталей насоса из нержавеющей стали позволяет предотвратить отказ связанный с коррозией концевых узлов УЭЦН;
- Внедрение клапанов из нержавеющей стали позволяет предотвратить отказы связанные с коррозией.

# НКТ
# НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ





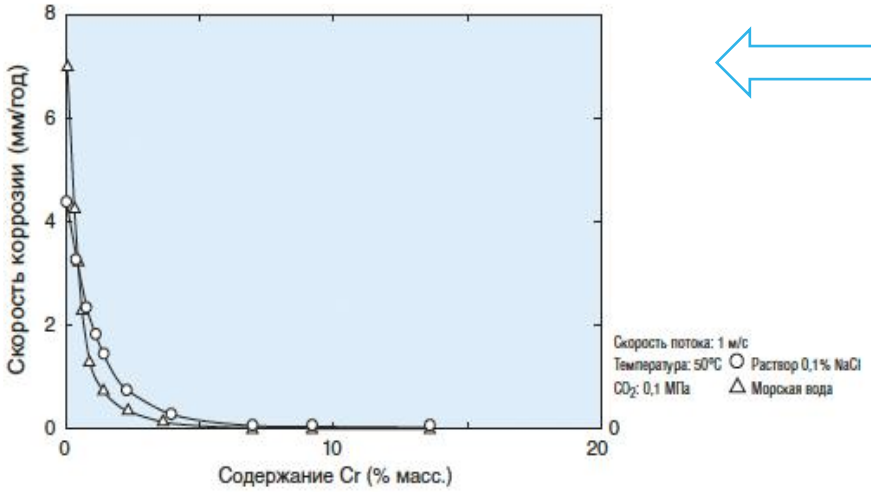
Среди группы неметаллических покрытий выделяют:

- полимерные покрытия;
- силикатно-эмалевые покрытия.

Для создания полимерного покрытия применяется два типа пластмасс: термопластичные (поливинилхлорид, полиэтилен, полипропилен, фторопласт и т. д.) и термореактивные (фенопласты, эпоксидные, полиэфирные). Такие покрытия имеют высокую коррозионную стойкость и длительный срок службы.

| Название проводимых ОПИ | Достоинства | Недостатки | Эффектив-ность |
|---|---|---|---|
| Покрытие Majorpack | Высокая наработка, высокая адгезия покрытия и стойкость к абразивному износу. | Большие риски утраты покрытия при ремонте НКТ, межниппельное пространство муфт необходимо защищать вставками. | Наработка выше на 207% Стоимость выше на 100% |
| Покрытие ТС 3000 | Высокая наработка, высокая адгезия покрытия и стойкость к абразивному износу, возможность проведения СКО. | Большие риски утраты покрытия при ремонте НКТ. | Наработка выше на 270% Стоимость выше на 100% |

# ЗАЩИТА НКТ
# КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ СТАЛИ




Зависимость скорости коррозии стали от содержания Cr в условиях $CO_2$ коррозии.

Из рисунка видно, что добавка хрома способствует существенному снижению скорости углекислотной коррозии. Добавка 1,0 % хрома способна снизить скорость коррозии в 1,5 -2 раза, добавка 5 % хрома - в 3 – 5 раз. Добавка 12-14 % хрома переводит сталь в состояние «нержавеющей», повышая коррозионную стойкость в десятки раз.

| Название проводимых ОПИ | Достоинства | Недостатки | Эффектив-ность |
|---|---|---|---|
| Сталь 26 ХМФА2 | Установлена стойкость материала труб к коррозионным повреждениям, возможность продолжительной работы металла в коррозионной среде | Пропуски жидкости по резьбовым соединениям, разрушение ниппельной части резьбы. Случаи «слизывания» ниппельной резьбы. | Наработка выше на 70% Стоимость выше на 48% |
| Сталь Cr13 | Высокая средняя и прогнозная наработка, возможность проведения СКО | Сравнительно высокая себестоимость трубы, возможность охрупчивания металла с увеличением наработки. | Наработка выше на 228% Стоимость выше на 275% |

# ЗАЩИТА НКТ
# ТРУБЫ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМ ПОКРЫТИЕМ



Внутреннее диффузионное цинковое покрытие (ДЦП) имеет высокую адгезию к железу и низкую к парафинам. Слоистая конструкция, образованная в результате взаимной диффузии атомов цинка и железа, показала высокую коррозионную и эрозионную стойкость, улучшенную герметичность резьбовых соединений и увеличенный в 3-5 раз срок их службы.

Металлизационное термодиффузионное цинковое покрытие (ТДЦП) «Дельта+» на основе цинка по технологии «НПО Неоцинк» за счет образования интерметаллидного соединения при внедрении атомов цинка в сталь обладает высокими антикоррозионными свойствами и повышенной твердостью. Покрытие позволяет увеличить срок эксплуатации НКТ минимум в 2 раза. Покрытие недостаточно стойко в кислых и щелочных средах.

| Название проводимых ОПИ | Достоинства | Недостатки | Эффектив-ность |
|---|---|---|---|
| НКТ с ТДЦП Дельта 5+ | Значительное снижение скорости коррозии. Покрытие устойчиво к соскабливающему напряжению. Высокая адгезия защитного покрытия | Запрещается применять покрытие в скважинах, на которых возможно проведение кислотных обработок. Относится к **протекторной** (катодной) защите НКТ. | Наработка выше на 98% Стоимость выше на 120% |

# ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЗАЩИТЫ НКТ



**Лейнер**
Суть технологии заключается в установки во внутренней полости НКТ кожуха (лейнера) из коррозионно-стойкой стали

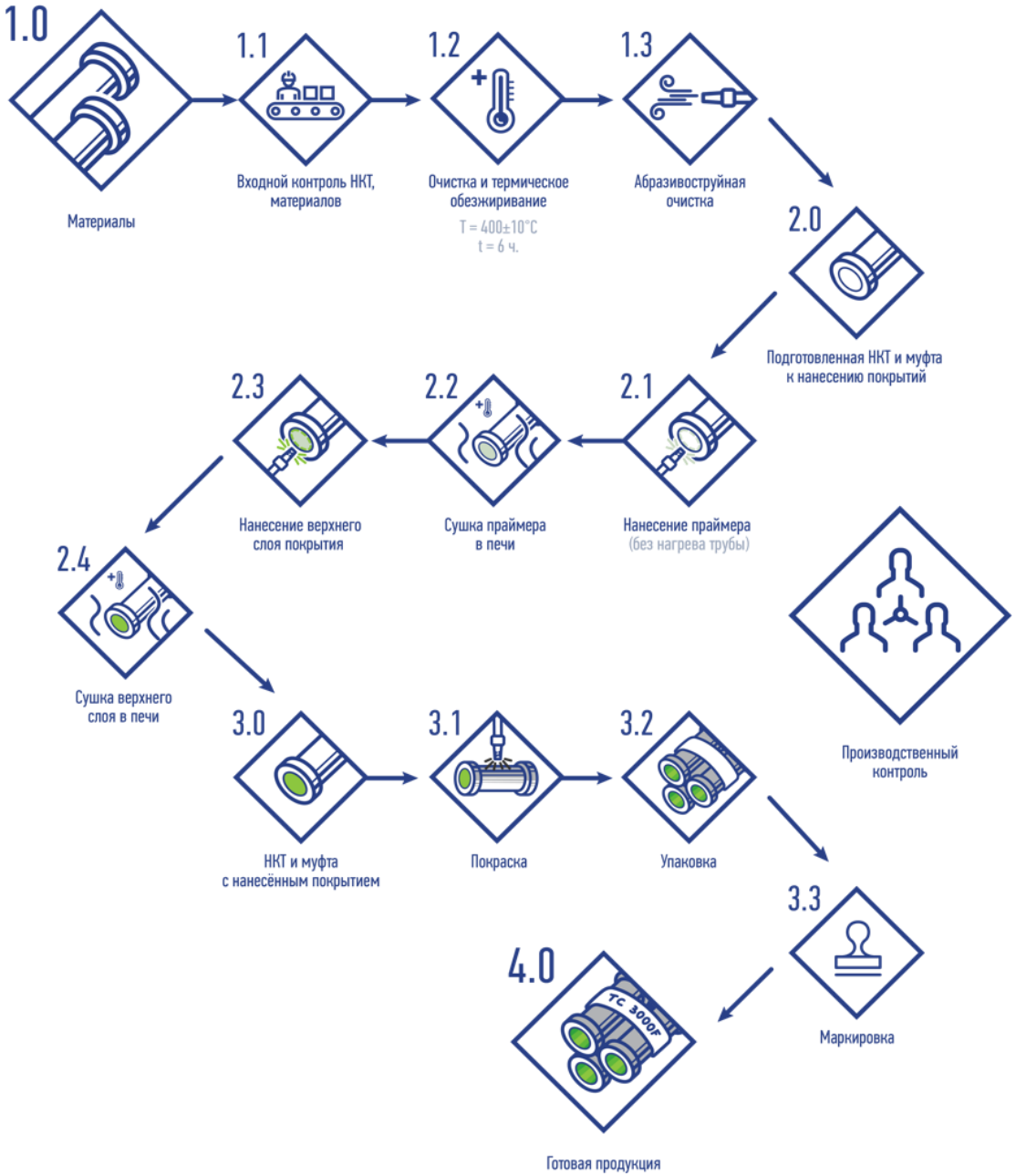
**Достоинства технологии**
НКТ с установленным лейнером приобретает антикоррозионные свойства легированной трубы без ухудшения рабочих характеристик.
Данный тип покрытия можно применять бывшим в эксплуатации ремонтным трубам.

**Недостатки технологии**
Лейнер изготовлен из аустенитной стали. Это делает его производство весьма затратным.

**Мероприятия по оптимизации технологии**
Подобрать оптимальный хим. состав кожуха.
Разработать технологию ремонта.

| Название проводимых ОПИ | Достоинства | Недостатки | Эффектив-ность |
|---|---|---|---|
| НКТ с Лейнером | антикоррозионные свойства легированной трубы НКТ. Данный тип покрытия можно применять к бывшим в эксплуатации ремонтным трубам. | На данный момент не разработан технологический процесс ремонта данного покрытия. Высокая стоимость кожуха (лейнера). | Наработка выше на 200% Стоимость выше на 120% |

# НАНЕСЕНИЕ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА РЕМОНТНЫЕ НКТ




В 2019 году в ООО «Газпромнефть-Восток» успешно завершились опытно промышленные испытания технологии нанесения полимерного покрытия на бывшие в эксплуатации ремонтные НКТ.

Внедрение данной технологии поможет в значительной мере сократить капитальные затраты по закупу насосно-компрессорных труб в коррозионно-стойком исполнении.

У данной технологии есть свои недостатки:

1. Требуется большее количество полимера, чем на новую НКТ;

2. Требуется подготовка поверхности (обезжиривание и абразивоструйная очистка).

Доход достигается за счет экономии на закупе трубы НКТ.

**ООО НАУЧНО-КОММЕРЧЕСКАЯ ФИРМА « СБК »**
**РФ, 152912, г. Рыбинск, Ярославской обл., ул. Зои Космодемьянской, 33-33**
**тел./факс: (4855) 216-504, +7 9108137542, E-mail: bukaty_sa@mail.ru**

# Выбор группы прочности насосных штанг на основе конечно-элементного моделирования коррозионных воздействий

Научный руководитель
д-р техн. наук, профессор Букатый С.А.

# Цель работы

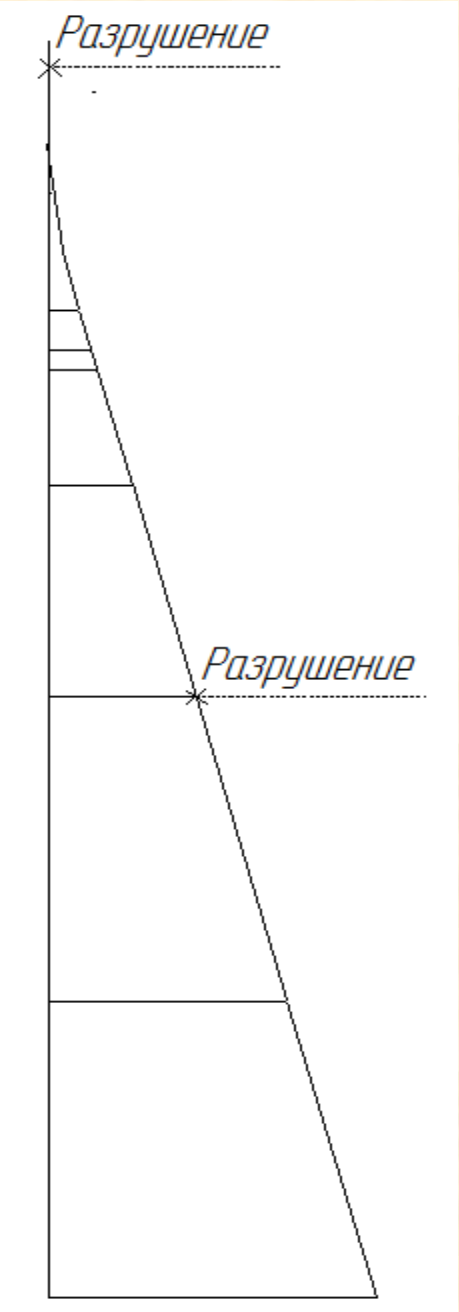
Повышение выносливости штанг насосных ШН19 на основе исследования их напряжённо-деформированного состояния

# Задачи

1) Выявление причин преждевременного разрушения штанг ШН19 на основе анализа их напряжённо-деформированного состояния
2) Исследование остаточных напряжений в поверхностном слое штанг без наработки и с наработкой
3) Составление рекомендаций по повышению выносливости штанг насосных

# Граничные условия

- Диаметр штанг: 19,1 мм  +0,2/–0,41 мм.
- Максимальная нагрузка:
  $P_{max}$ = 4579 кГс = 44920 Н.
- Минимальная нагрузка: $P_{min}$ = 0 кГс = 0 Н.
- Материал: сталь 15Х2ГМФ, нормализация + отпуск.




# Расположение разрушений насосных штанг в скважине

Анализ мест разрушений показал, что кривизна геометрии скважин не влияет на разрушение штанг.

# Расчёт коэффициента запаса прочности по текучести $n_т$

$$n_т = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{max}}.$$

Для штанги диаметром 18,8 мм

$\sigma_{max} = 161{,}8\,МПа$

$n_т = 3{,}81.$

# Расчёт коэффициента запаса прочности по многоцикловой усталости *n* без учёта влияния коррозии поверхности штанг

$$n = \frac{\sigma_{-1p}}{K^{\sigma}\sigma_a + \psi_{\sigma}\sigma_m}$$

$\sigma_{-1p}$ – предел выносливости материала при растяжении,

$\sigma_{-1}$ – предел выносливости материала при изгибе по симметричному циклу нагружения

$\sigma_a$ – амплитуда напряжений цикла

$\sigma_m$ – среднее напряжение цикла

$\psi_{\sigma}$ – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений.

$K^{\sigma}$ – коэффициент снижения предела выносливости

$$K^{\sigma} = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_d} + \frac{1}{K_F} - 1\right)\frac{1}{K_v}$$

$K_{\sigma}$ – эффективный коэффициент концентрации напряжений. Для гладких штанг $K_{\sigma} = 1$.

$K_d$ – коэффициент влияния размеров детали. Для легированной стали при $d$ = 18,8 мм $K_d \approx 0{,}84$.

$K_F$ – коэффициент влияния шероховатости поверхности. В соответствии с ГОСТ 13877-96 поверхность штанг была образована без удаления поверхностного слоя материала, после термообработки возможно наличие окалины. $K_F \approx 0{,}6$.

$K_v$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения. При отсутствии упрочнения $K_v = 1$.

$$K^{\sigma} = 1{,}857 \qquad n \approx 1{,}71$$

# Расчёт коэффициента запаса прочности по многоцикловой усталости *n* с учётом влияния коррозии поверхности штанг

**до образования очага разрушения и язвы**

$K_{F\text{кор}} = K_F \cdot \beta_{\text{кор}}$ $K^{\sigma} = 4{,}952$ $n \approx 0{,}65$

**после образования язвы**

на основе МКЭ определены максимальные напряжения, обусловленные образованием в очаге разрушения язвы:

$\sigma_{\max_к} = 292{,}1\,\text{МПа}$

Теоретический коэффициент концентрации напряжений $K_{\alpha} = \dfrac{\sigma_{\max_к}}{\sigma_{\max}} = 1{,}805$

Эффективный коэффициент концентрации $K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma}\left(K_{\alpha} - 1\right)$

где $q_{\sigma}$ – коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений

$K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma}\left(K_{\alpha} - 1\right) = 1{,}564$ $K^{\sigma} = 5{,}624$ $n \approx 0{,}57$

# Расчёт на прочность насосных штанг из материалов класса Д

**Расчёт коэффициента запаса прочности по текучести $n_т$**

$$n_т = 3{,}62.$$

**Расчёт коэффициента запаса прочности по многоцикловой усталости *n* без учёта влияния коррозии поверхности штанг**

$n \approx 2{,}11$ (для классов К, С n = 0,71)

**Расчёт коэффициента запаса прочности по многоцикловой усталости *n* с учётом влияния коррозии поверхности штанг**

**до образования очага разрушения и язвы**

$n \approx 0{,}80$ (для классов К, С n = 0,65)

**после образования коррозионной язвы**

$n \approx 0{,}71$ (для классов К, С n = 0,57)

**Результаты расчётов**

• многоцикловая усталость штанг не обеспечивается,

в т.ч. из материала класса Д

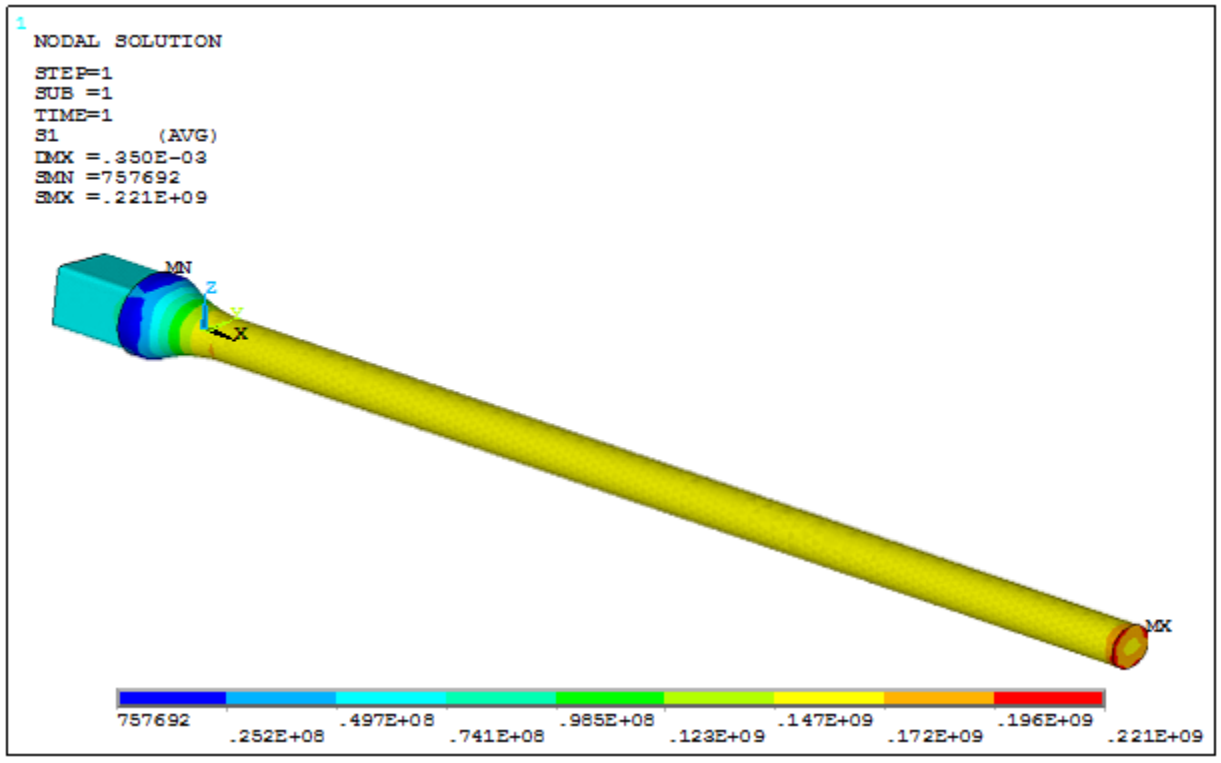
• наиболее важным фактором, влияющим на сопротивление

усталости штанг, является коррозионная стойкость материала.

• определение долговечности штанг в этом случае следует

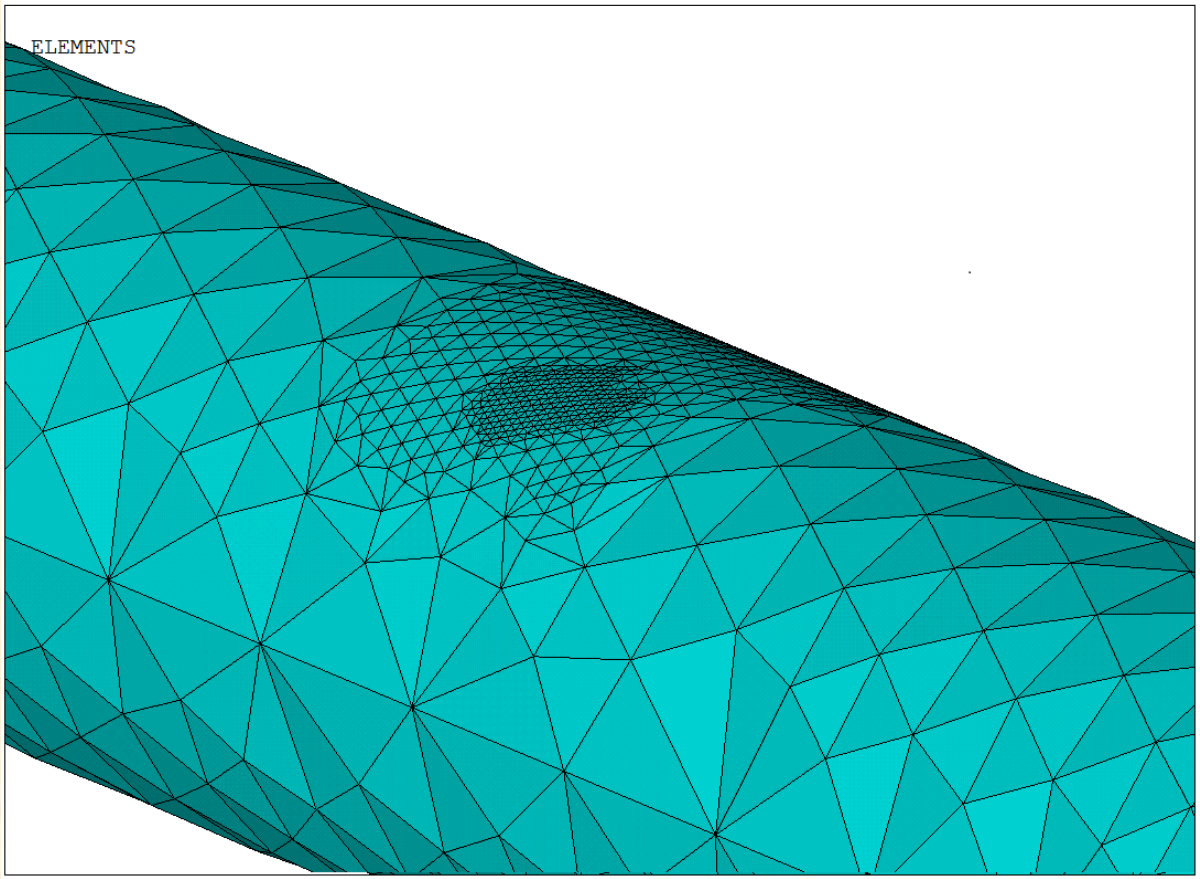
вести методами расчёта малоцикловой усталости.

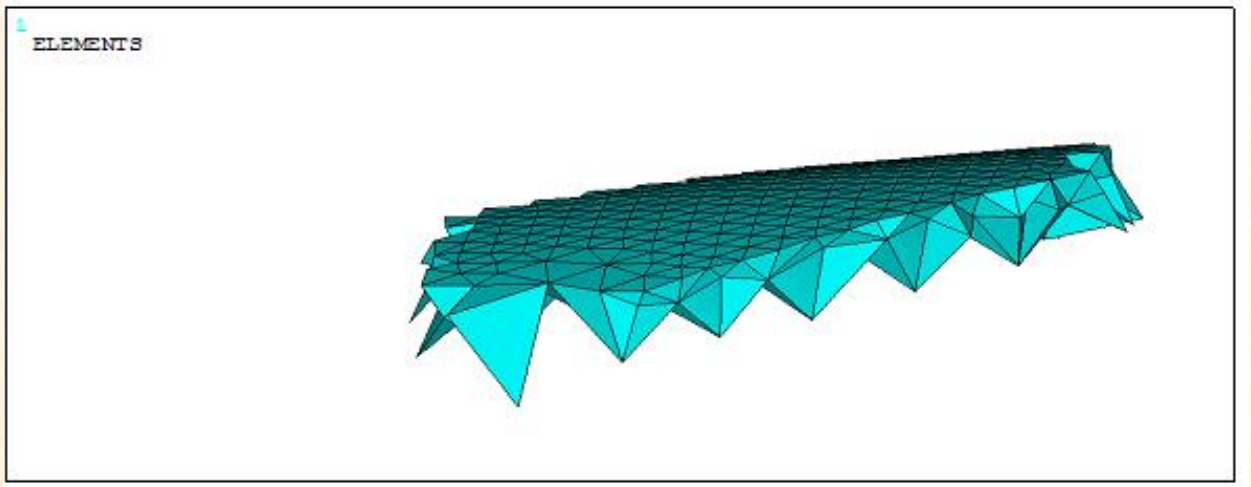
# Расчёт напряжённо-деформированного состояния штанг на основе конечно-элементного моделирования повреждения поверхности штанг коррозией




Распределение главных напряжений и деформаций в штанге при отсутствии коррозии

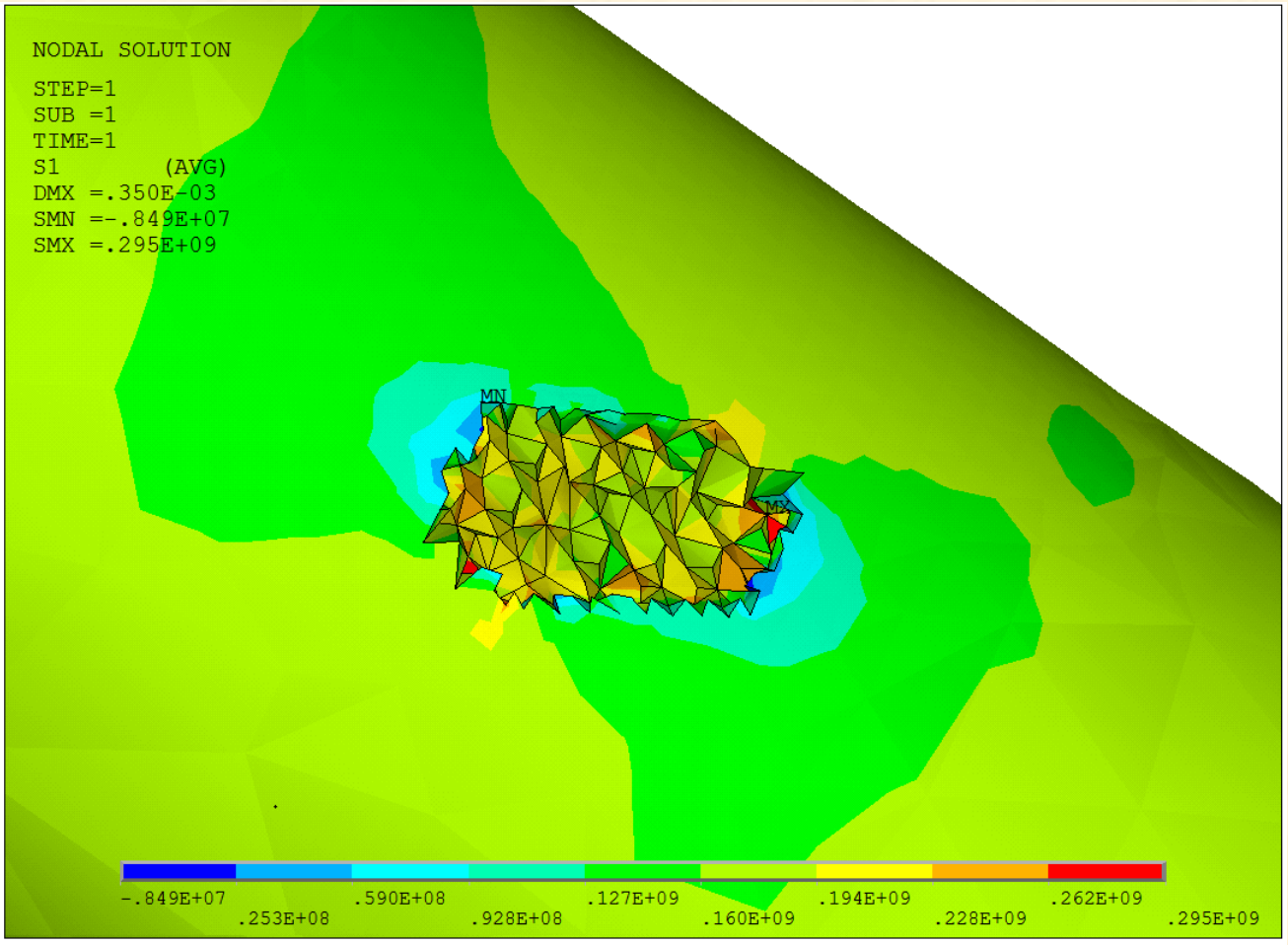
| Главные напряжения, МПа | | | Главные деформации | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_2$ | $\varepsilon_3$ |
| 170,13 | 0,90 | 0,54 | 0,00084849 | – 0,00025152 | – 0,00025382 |




примерные размеры очага разрушения и язвы: длина×ширина ×глубина ≈ 5,87 ×3,31×0,88 мм

# Распределение первых главных напряжений в коррозионном повреждении штанги




Распределение главных напряжений и деформаций в штанге с коррозией

| Главные напряжения, МПа | | | Главные деформации | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_2$ | $\varepsilon_3$ |
| 292,11 | 38,43 | 14,36 | 0,0013814 | – 0,00026755 | – 0,00042402 |

# Расчёт малоцикловой долговечности штанг

При отсутствии для данного материала диаграмм малоцикловой усталости применялся расчётный метод определения малоцикловой долговечности деталей – метод универсальных наклонов, основанный на приближённом уравнении С.С. Мэнсона

$$\Delta\varepsilon = \frac{3.5\left(\sigma_{т} - \sigma_{im}\right)}{E} \cdot N^{-0.12} + \left(\ln\frac{1}{1-\Psi}\right)^{0.6} \cdot N^{-0.6}$$

где $\Delta\varepsilon$ – интенсивность размахов деформаций $\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_{i_нагр} - \varepsilon_{i_разгр}$, (i = 1, 2, 3) за цикл нагружения, определяемая по формуле

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3}\left[(\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2)^2 + (\Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_3)^2 + (\Delta\varepsilon_3 - \Delta\varepsilon_1)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$\sigma_{im}$ – характеристика цикла нагружения, определяемая как разность интенсивностей напряжений $\sigma_i$ при нагружении и разгрузке:

$$\sigma_{im} = \sigma_{iн} - \sigma_{ip},$$

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right]^{\frac{1}{2}}.$$

# Результаты расчётов долговечности штанг без учёта и с учётом коррозионного повреждения

коэффициент запаса по долговечности $n = 3$

длительность наработки штанг $T$ в сутках (при $N_{\text{базовой}}$ $5\times10^6$ циклов или 926 сут.)

частота $f = 4{,}5$ цикл/мин.

**Результаты расчёта малоцикловой долговечности штанг**

| Варианты расчёта | $N_{\text{расчётная}}$, циклы | $N_{\text{допускаемая}}$, циклы | $T$, сутки | |
|---|---|---|---|---|
| | | | расчётная | допускаемая |
| Без учёта коррозии | 128487200 | 42829067 | 19827 | 6609 |
| С учётом коррозии | 1368174 | 456058 | 210 | 70 |

# Определение остаточных напряжений на установке АСБ-1

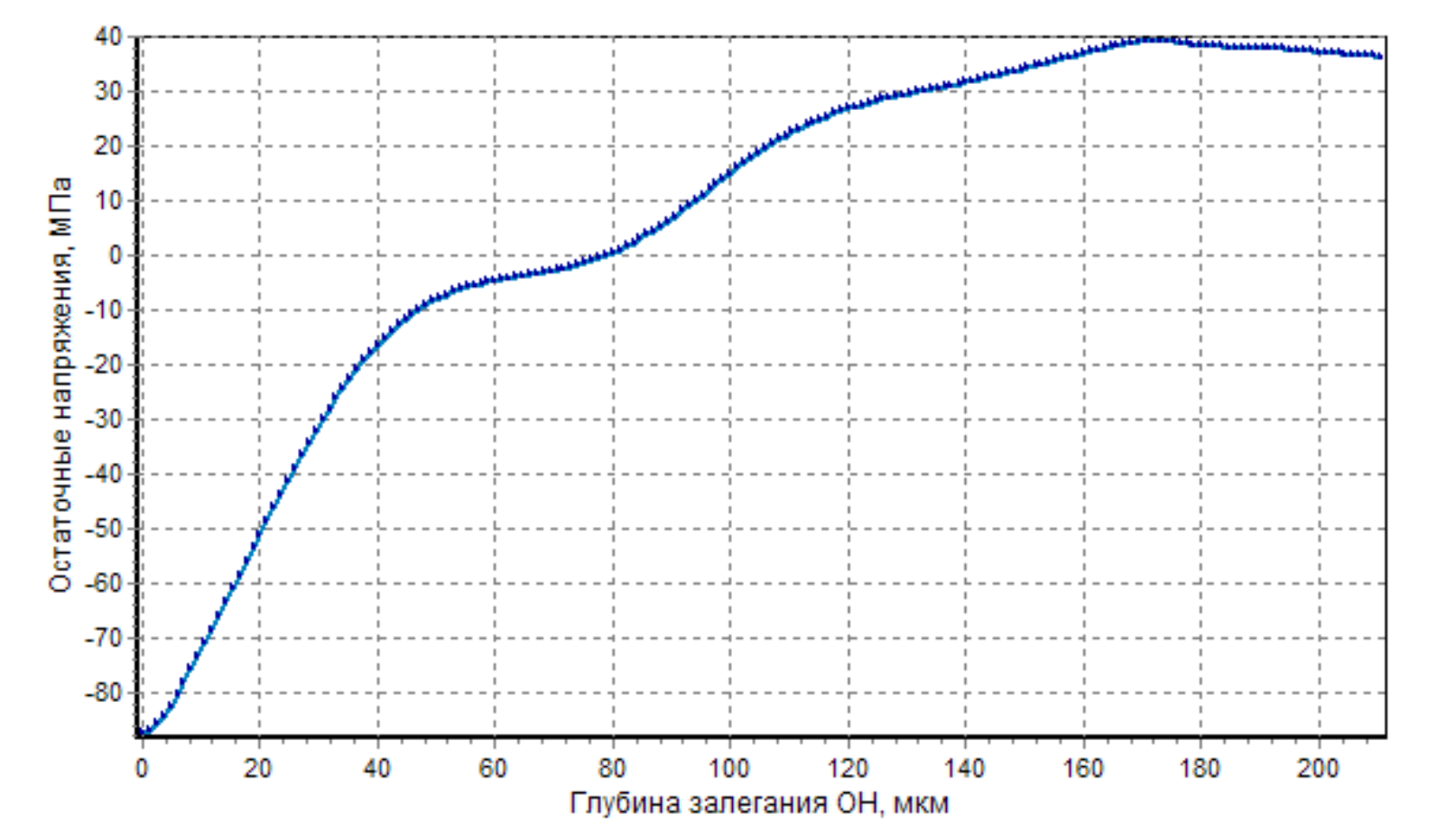





Образцы секторного сечения

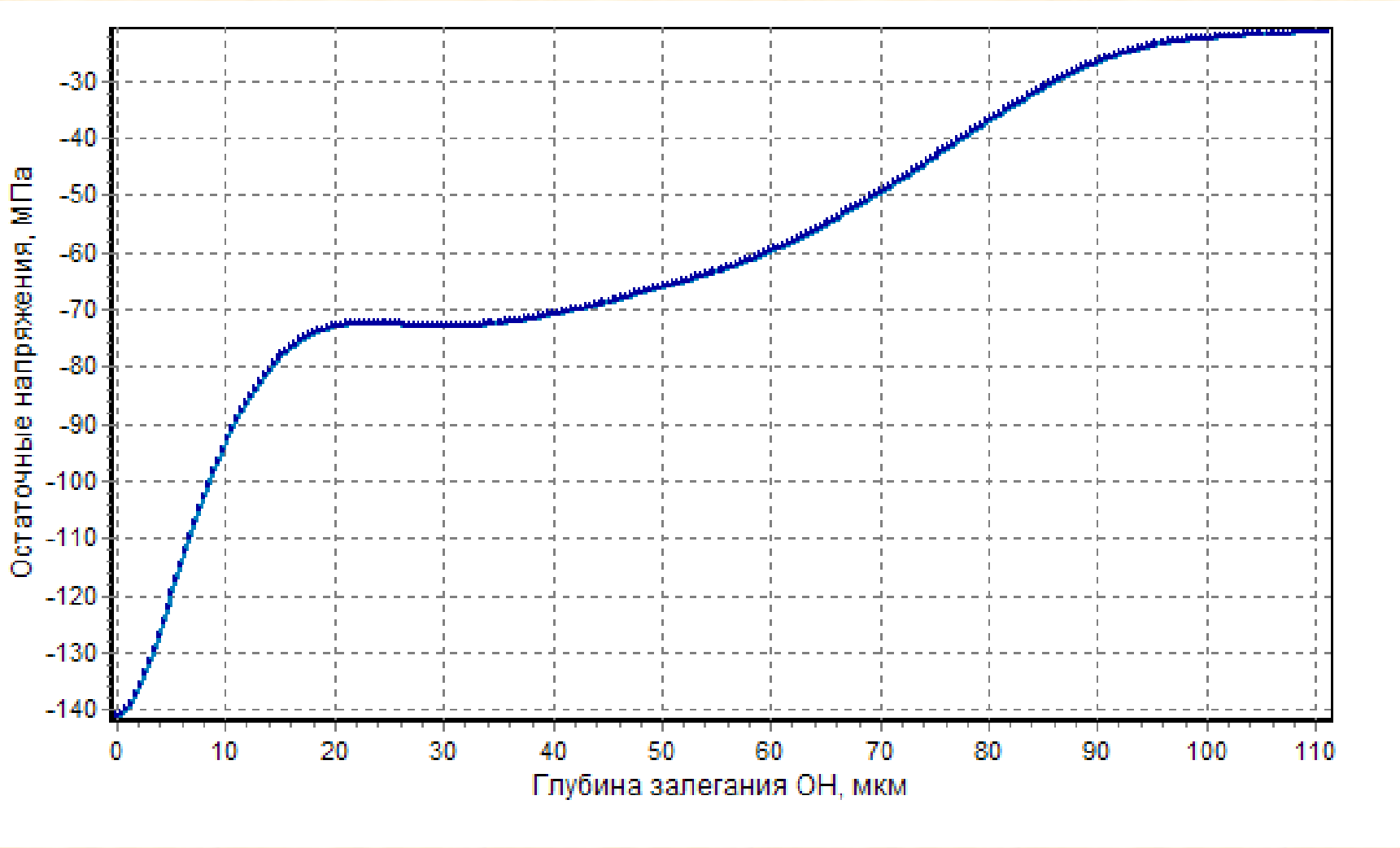
для определения остаточных напряжений

# Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое штанг без наработки



Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое штанг с наработкой (с коррозионным повреждением поверхности штанги)

Повышение сжимающих остаточных напряжений вследствие наводораживания поверхностного слоя, а также влияния коррозии составило ~ 60 МПа



# Выводы

- Основной причиной преждевременного разрушения штанг является коррозионное повреждение поверхности.
- Механические свойства материалов в меньшей степени влияют на долговечность штанг. Без учёта коррозии штанги класса прочности К и С обеспечивают запас по прочности 1,71, при этом штанги класса Д могут обеспечить запас по прочности 2,11. С учётом коррозии коэффициент запаса прочности штанг класса К и С составляет 0,57, коэффициент запаса прочности штанг класса Д составляет 0,71.
- В условиях возможного коррозийного разрушения материала применение штанг класса прочности Д не целесообразно.
- Для изготовления штанг предлагается использовать коррозионно стойкие стали, например 12Х18Н10Т с пределом выносливости $\sigma_{-1p}$ = 224 МПа будет иметь коэффициент запаса прочности $n \approx 1{,}45$. При незначительном уменьшении коэффициента запаса по выносливости эта сталь и её аналоги обладают значительно большей коррозионной стойкостью и в сочетании с поверхностным упрочнением (способы поверхностного пластического деформирования – ППД) гарантированно обеспечат повышение сопротивления усталости штанг в многоцикловой области.
- Повысить сопротивление усталости стали 15Х2ГМФ в коррозионной среде можно: на ~ 5–10 % поверхностным упрочнением ППД, но более эффективно повышение коррозионной стойкости применением защитных технологий или замена материала на более коррозионностойкую сталь.

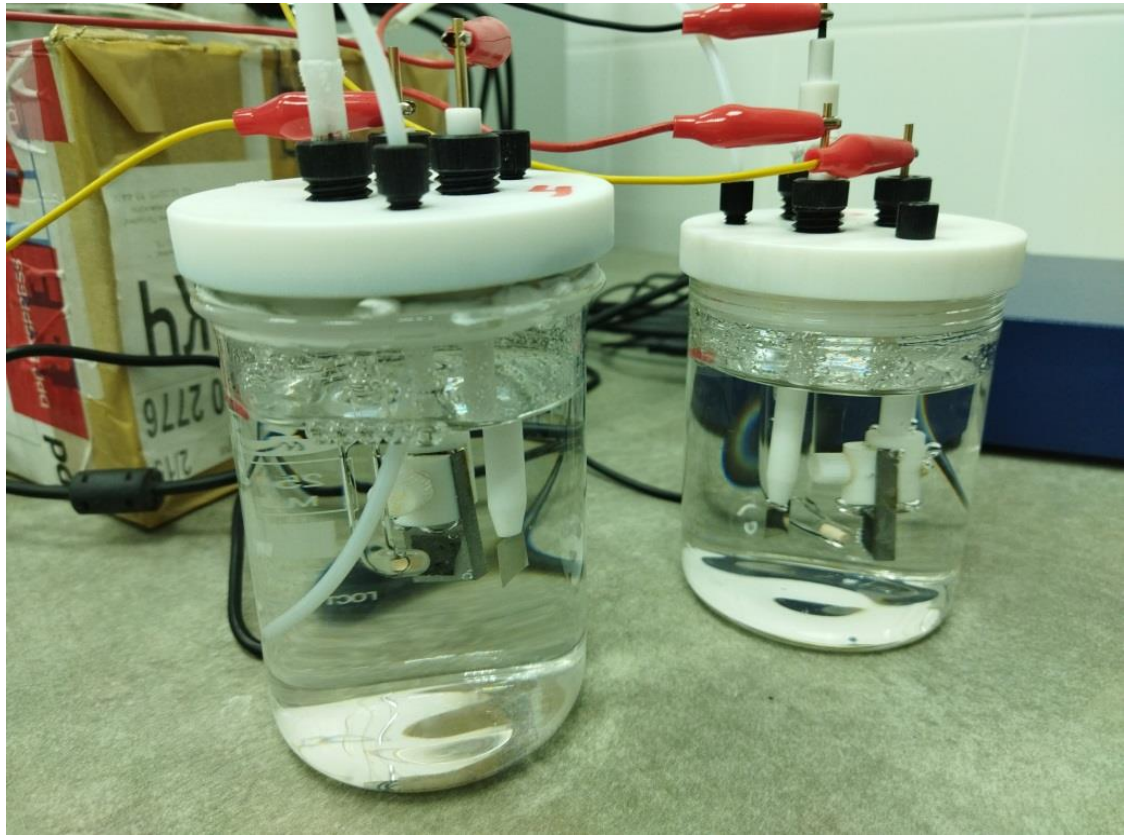
ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

# Изучение кинетики процесса углекислотной коррозии в лабораторных условиях

ООО «ИТ-Сервис», Самарский Университет

Пирожков Павел Александрович

# Электрохимическая ячейка



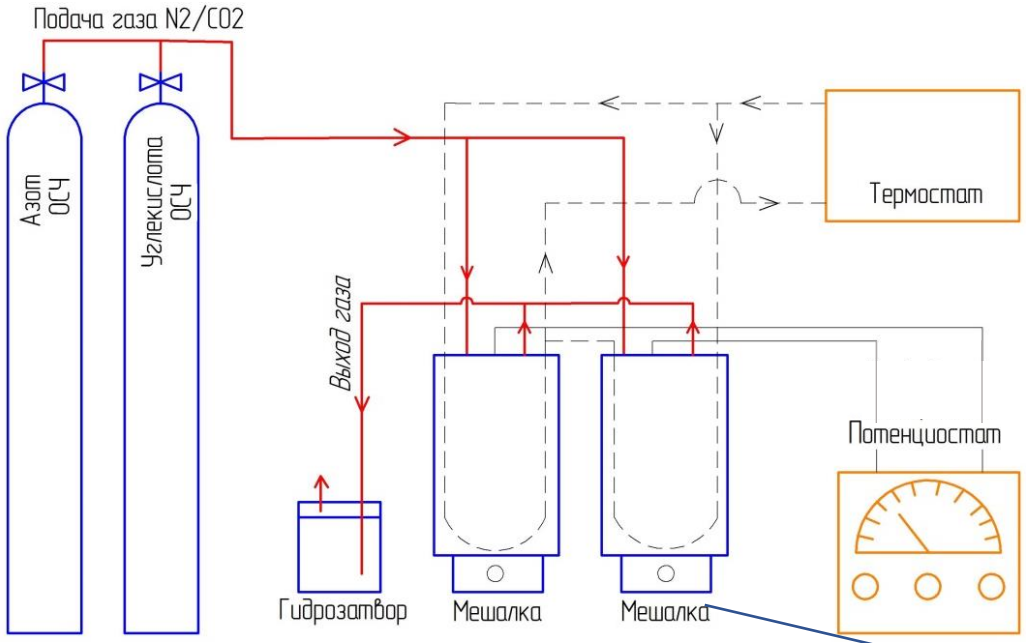
Старая установка



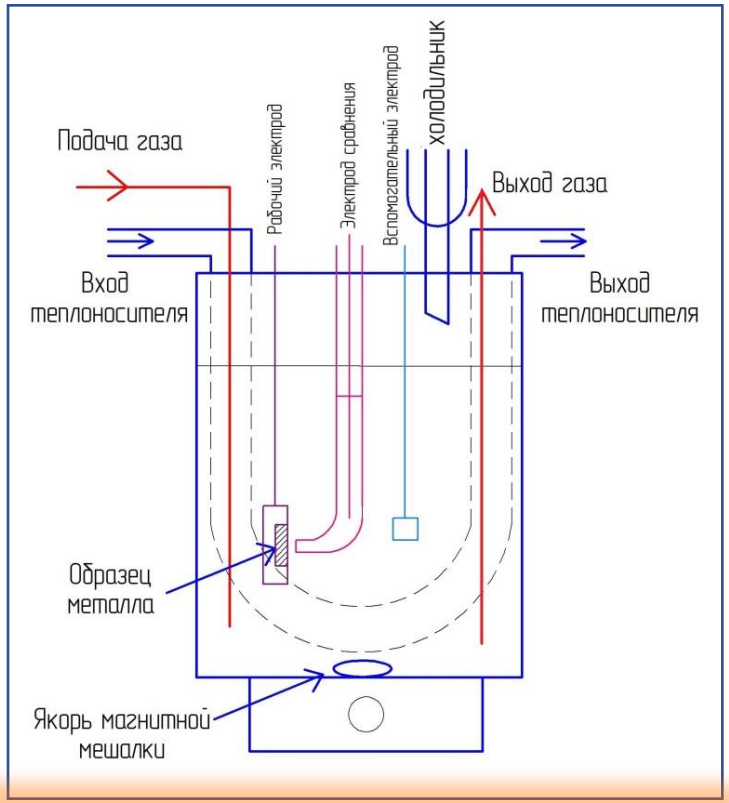
Новая установка

# Установка ООО «ИТ-Сервис»

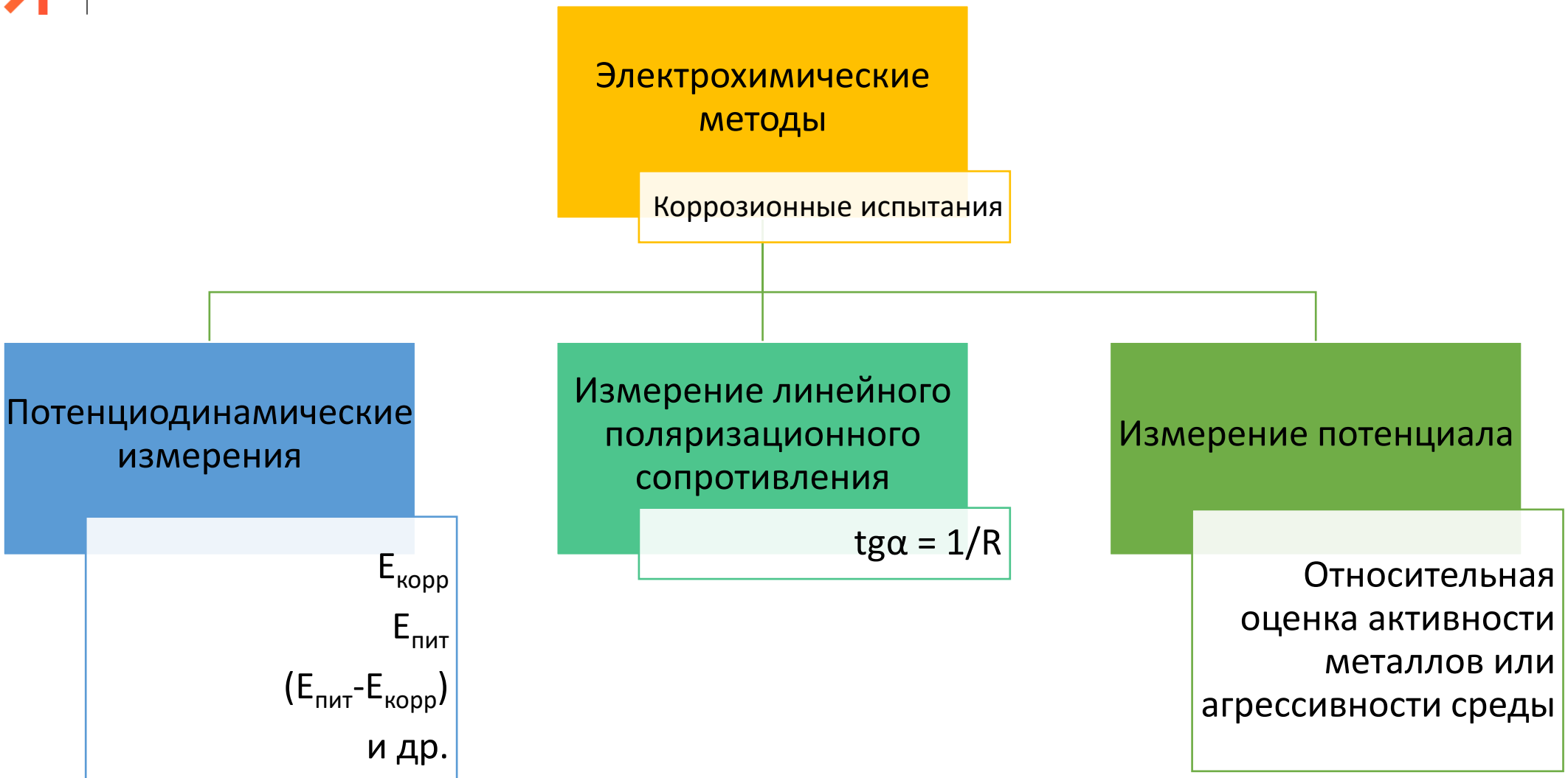
## Лабораторная установка




## Электрохимическая ячейка

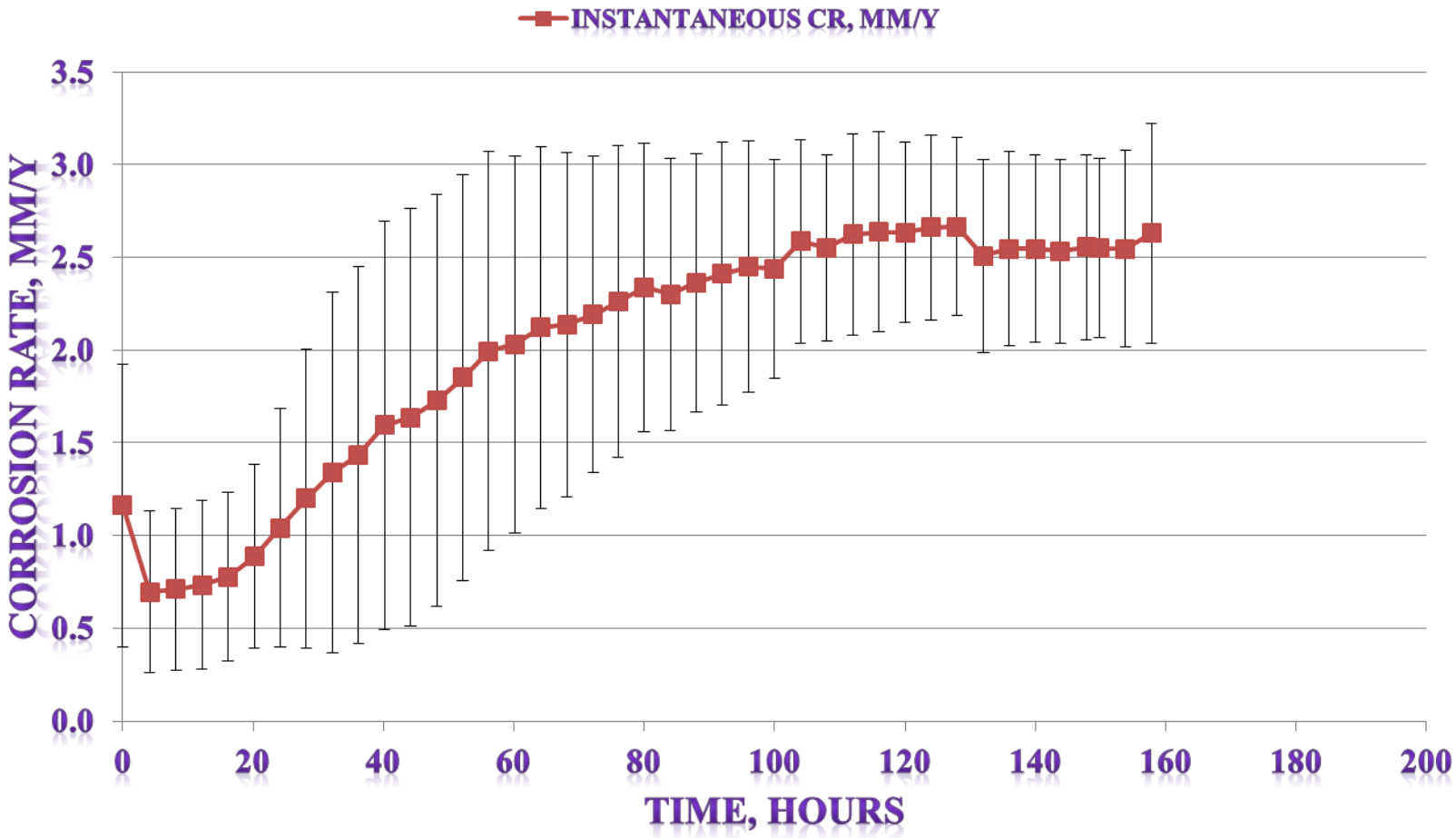



Перед погружением исследуемых образцов в испытательную среду раствор продувается азотом в течение 3 часов, а затем насыщается углекислым газом в течение 1.5 часов. Для испытаний используются газы квалификации ОСЧ. Выход газа в атмосферу осуществляется через гидрозатвор.


Электрохимические методы
Коррозионные испытания
Потенциодинамические измерения
$E_{корр}$
$E_{пит}$
$(E_{пит}-E_{корр})$
и др.
Измерение линейного поляризационного сопротивления
$tg\alpha = 1/R$
Измерение потенциала
Относительная оценка активности металлов или агрессивности среды

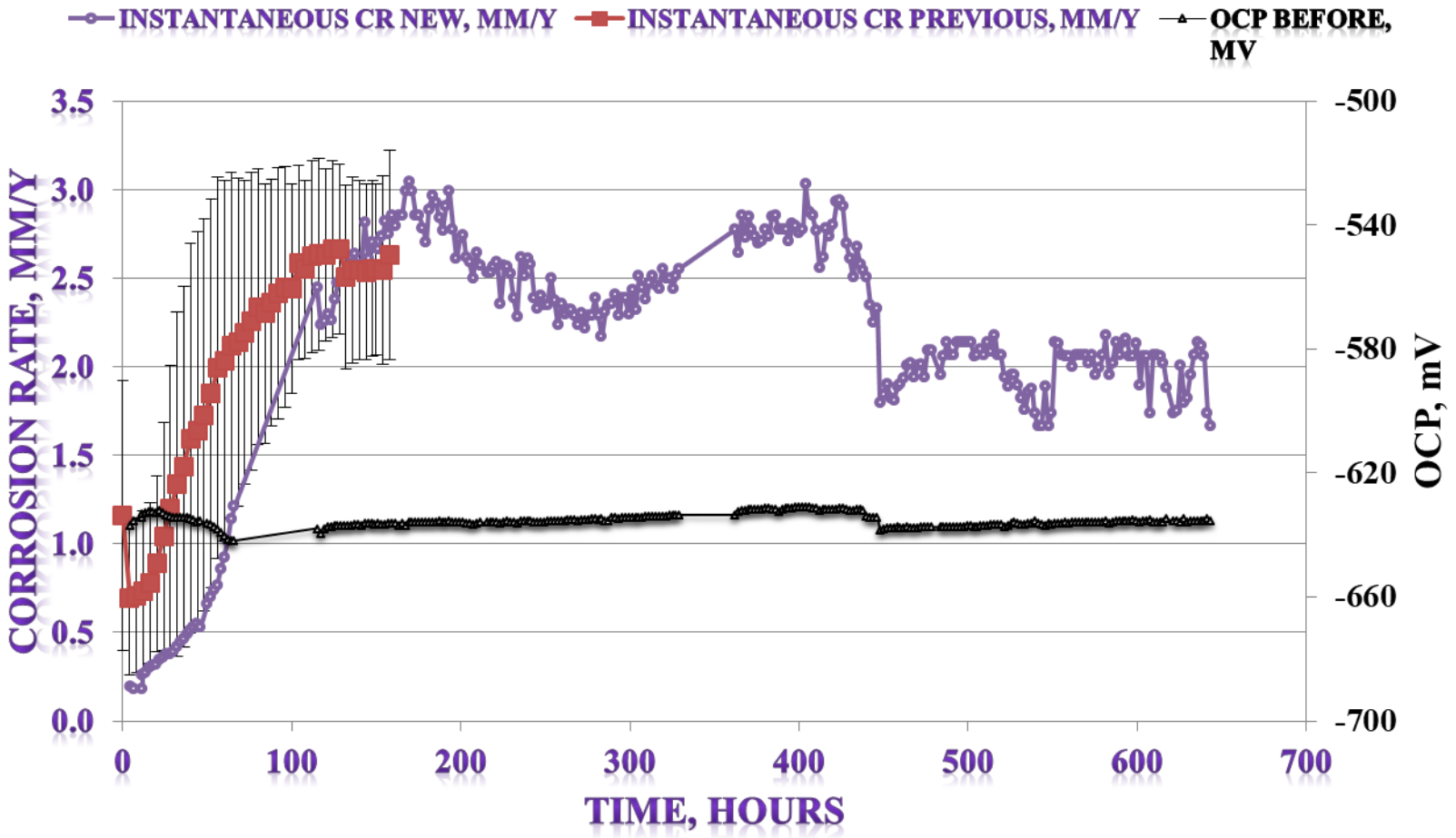
# Зависимость скорости коррозии от времени в процессе углекислотной коррозии. Предыдущие результаты

***09Г2С***
***4.5% KCl***
***65°C***

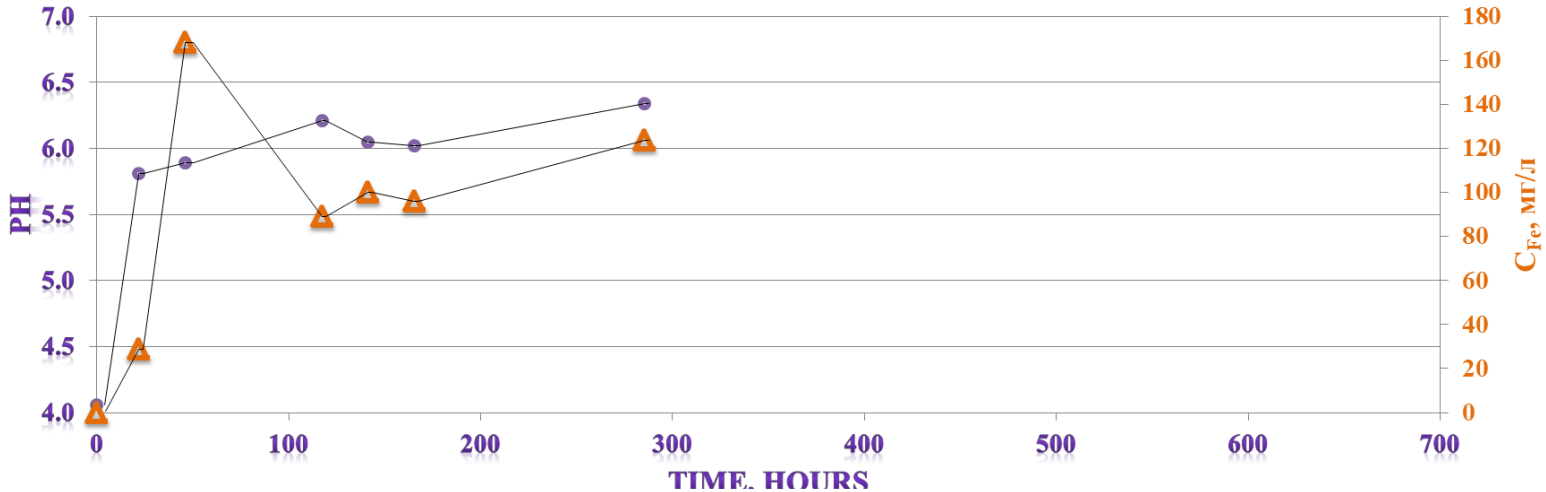


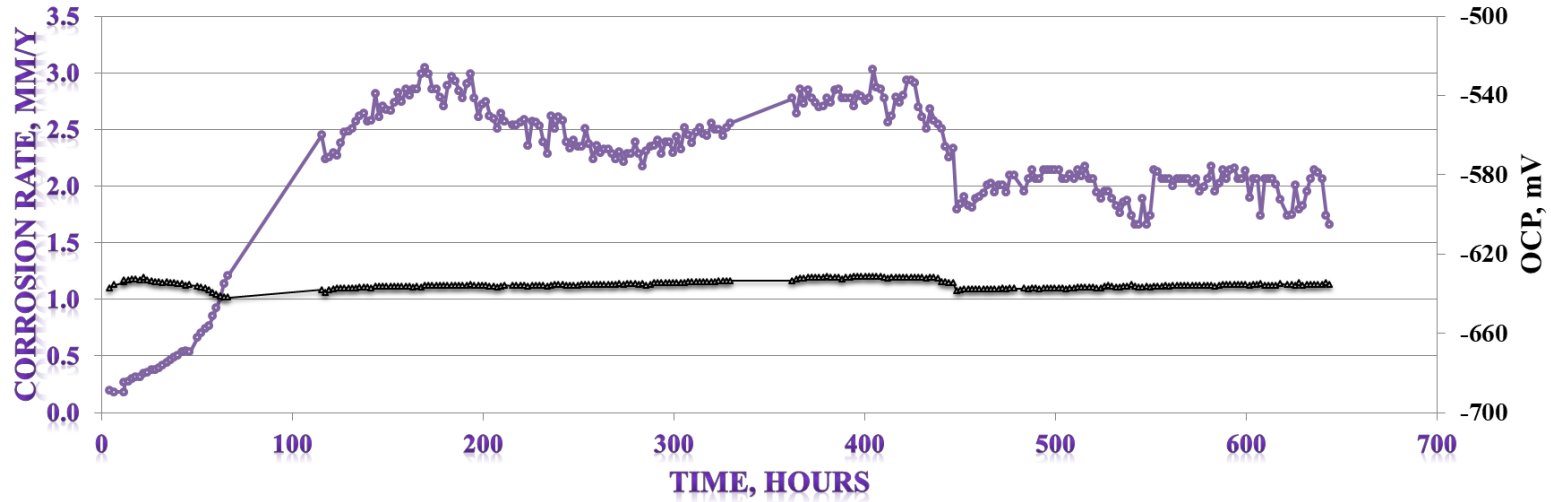
# Зависимость скорости коррозии от времени в процессе углекислотной коррозии. Новые результаты

*09Г2С*
*3.5% NaCl*
*65°C*

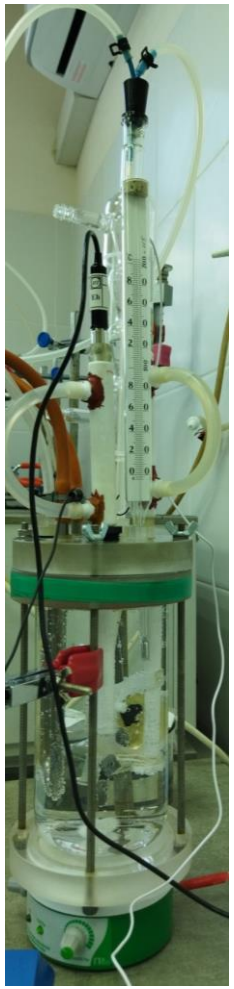


# Зависимости скорости коррозии, потенциала, pH и концентрации железа от времени

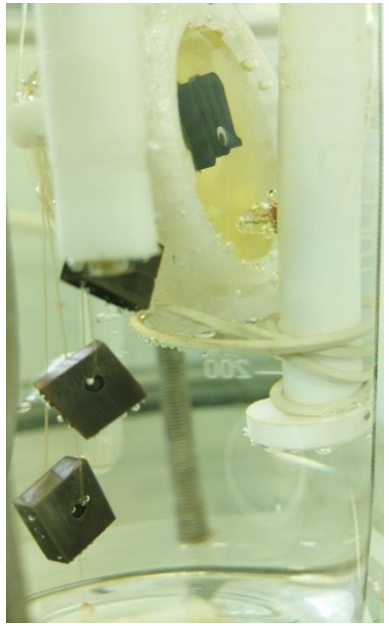


# Динамика изменения внешнего вида испытательной ёмкости



0 ч



24 ч



48 ч

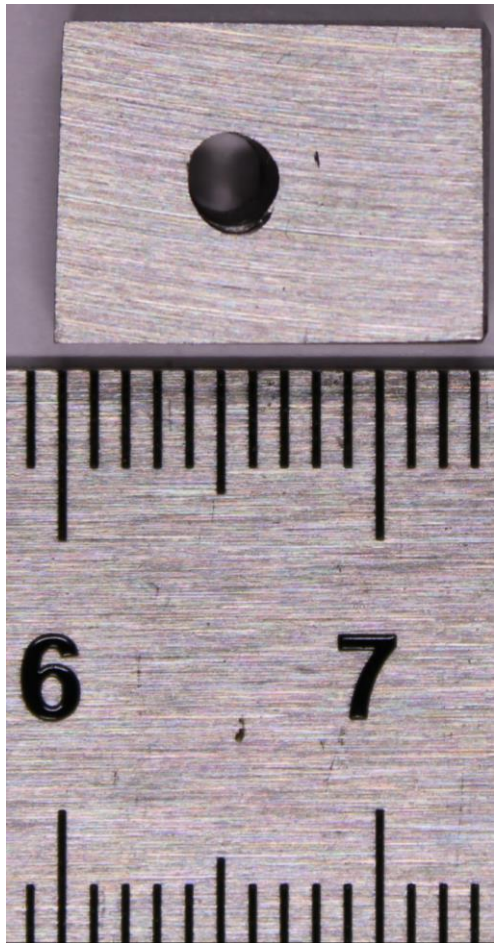


120 ч



168 ч

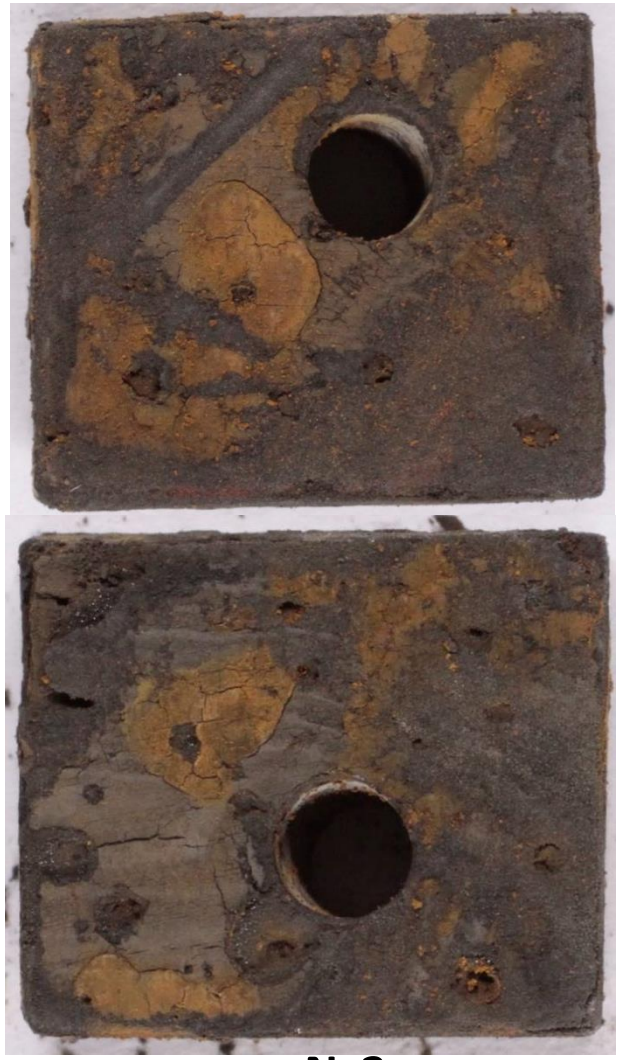
# Внешний вид образцов




До испытания



№1



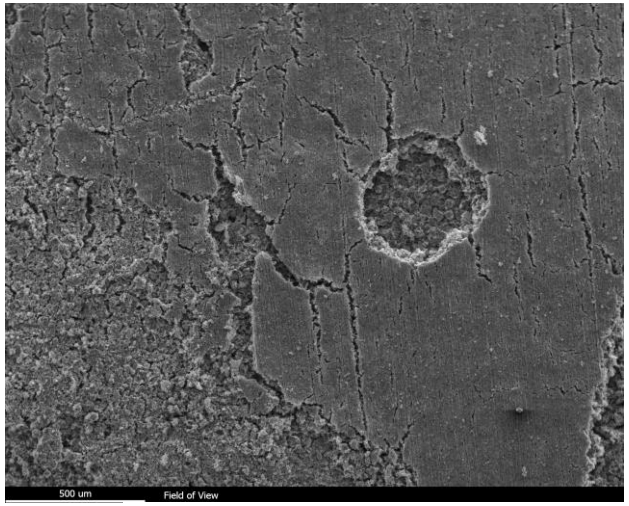
№2

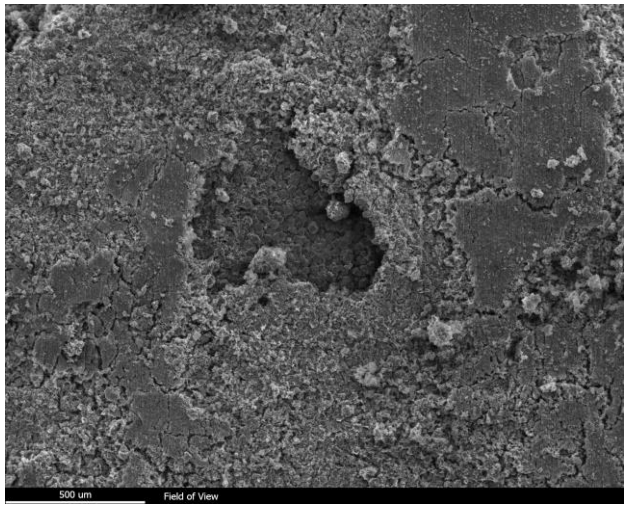


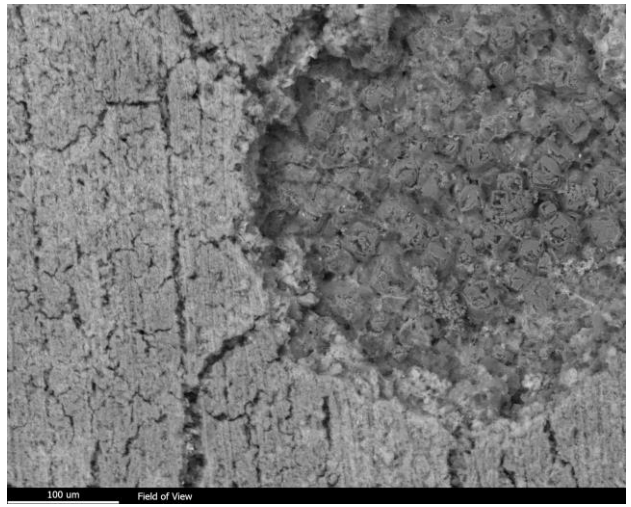
№3

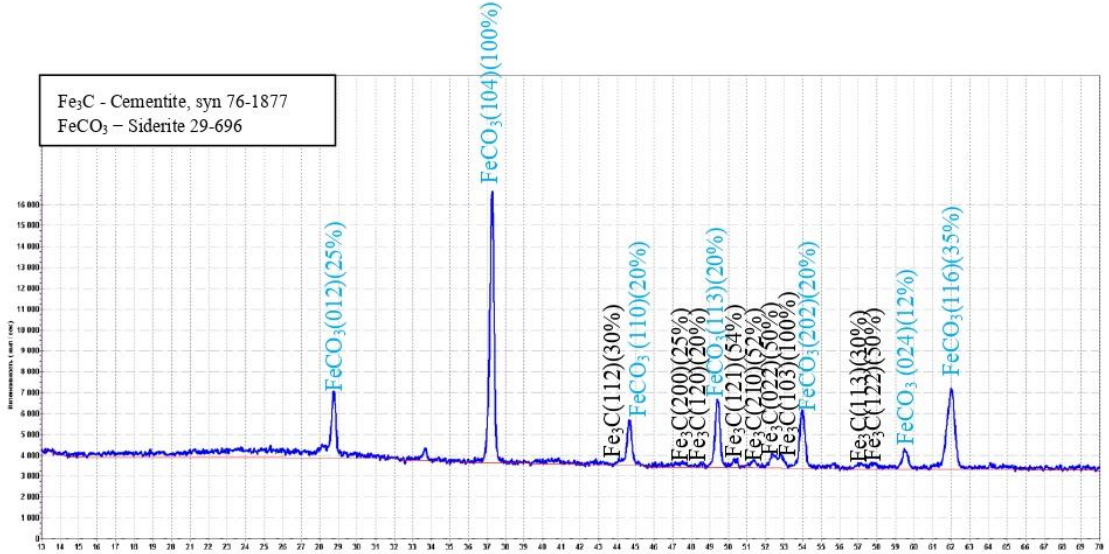
С обеих сторон

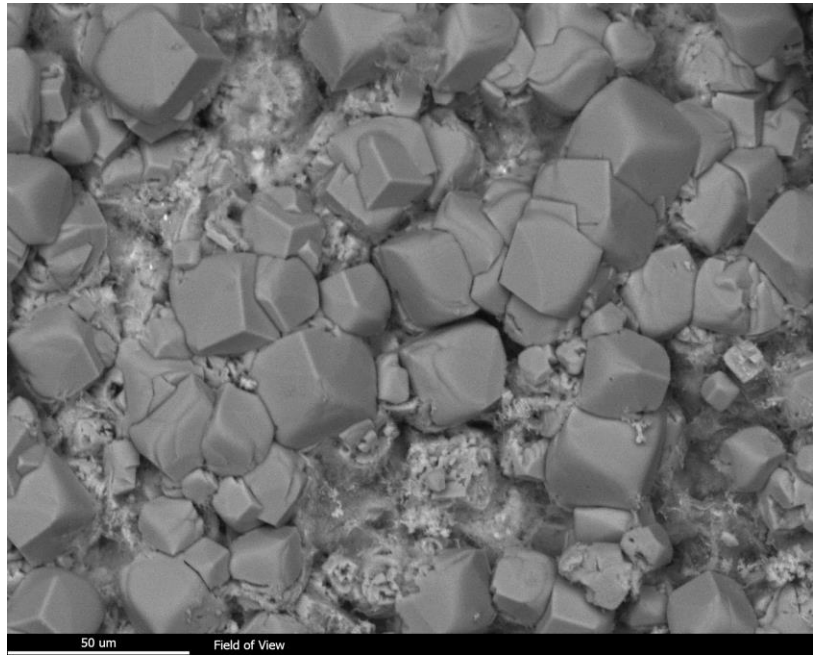
# Продукты коррозии




Угол Вульфа-Брэгга,2θ



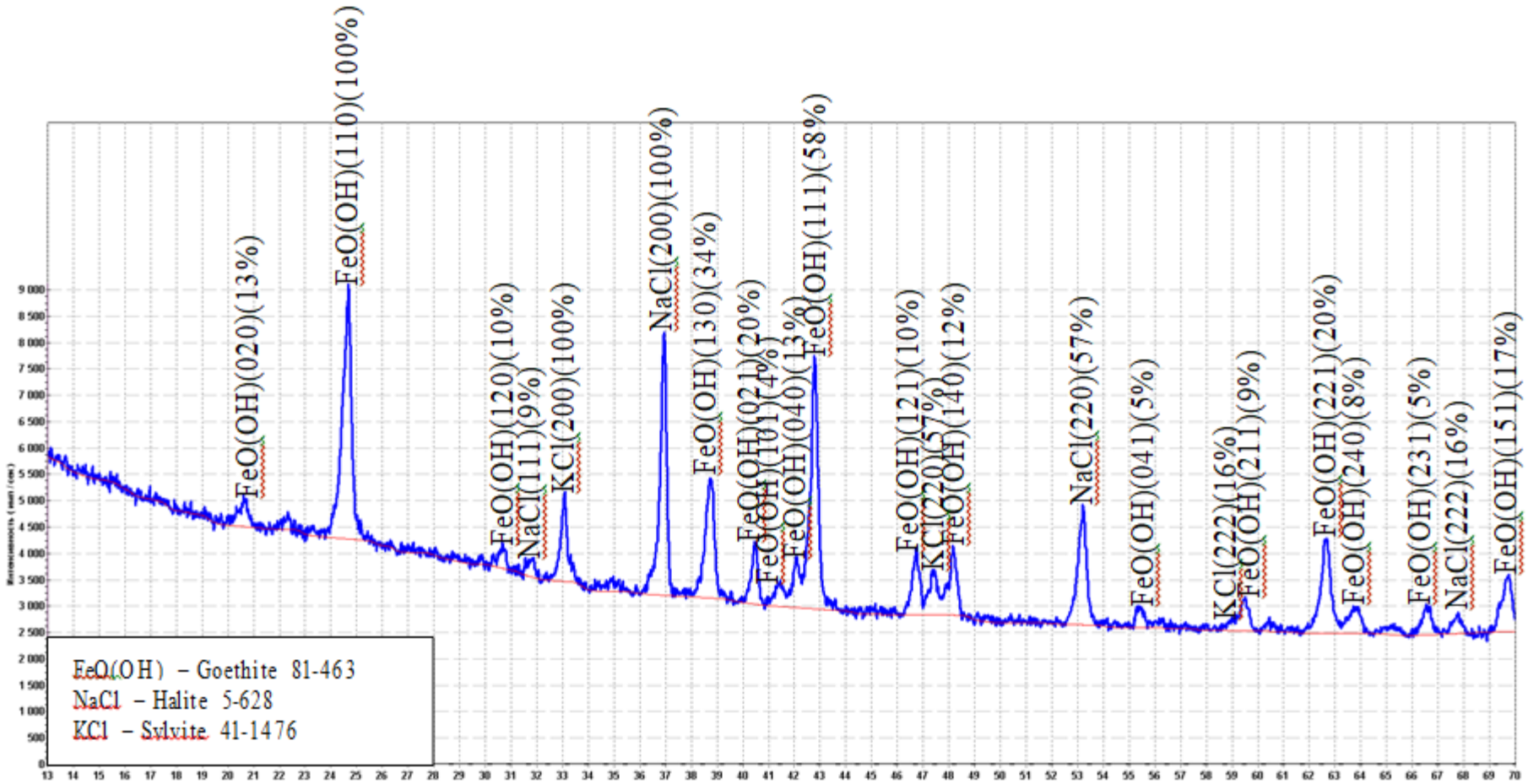
# ВЫВОДЫ

1. Проведённый эксперимент позволил показать, что в процессе углекислотной коррозии поражение металла носит локальный характер.
2. В растворе 3.5% NaCl при 65°C образующиеся кристаллы карбоната железа не защищают металл от дальнейшего разрушения. Об этом, в частности, свидетельствует постоянство потенциала в течение эксперимента.
3. Точки максимума на графиках зависимости скорости коррозии и концентрации Fe(II) от времени не совпадают. Отсюда следует необходимость исследования параметров раствора вблизи поверхности металла.

# Благодарю за внимание

**Пирожков Павел Александрович**

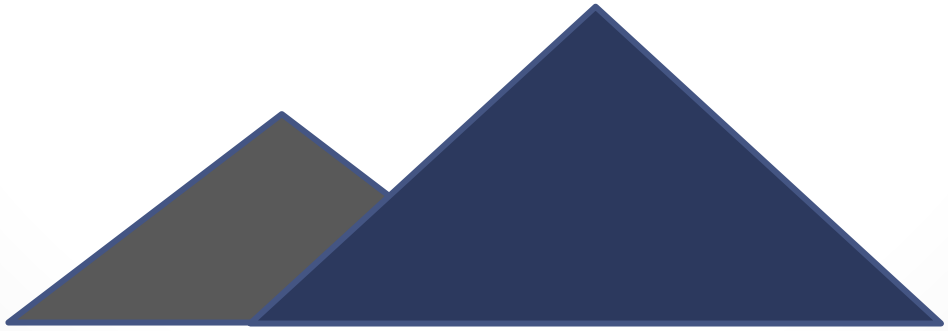
**+7 902 237 78 60**
**pirozhkov@its-samara.com**




Угол Вульфа-Брэгга,2ϑ

# «ВАЛЬМА»

**Научно-исследовательское производственное предприятие**



# Установление зависимости коэффициента KISSC металла НКТ, определяемого методом D по стандарту NACE TM 0177, от геометрических размеров ДКБ-образцов

Докладчик: Блажнов Н.М.

**ООО НИПП «Вальма»**

## Цель эксперимента

исследование посвящено анализу методов лабораторного контроля стойкости к сульфидному растрескиванию под напряжением (SSC) металла насосно-компрессорных труб (НКТ). Особое внимание уделено методу D – стандартному испытанию двухконсольной балки (DCB), которое позволяет оценить сопротивление металла к распространению трещин SSC.

## Задачи

- Оценка эквивалентности результатов испытаний методом D в зависимости от толщины испытуемого образца.

# Анализ проблемы коррозионного разрушения металла труб и трубопроводной арматуры по механизму СКРН

В настоящее время проблема коррозионного разрушения металла труб и трубопроводной арматуры по механизму сульфидного коррозионного растрескивания под напряжением (далее СКРН) является серьезным сдерживающим фактором для ведущих нефтегазодобывающих компаний при эксплуатации нефтяных месторождений. Отказ оборудования, используемого при добыче и транспортировке нефти и газа, наносит серьезный экономический и экологический ущерб, влечет за собой дополнительные расходы, связанные с необходимостью проведения ремонтных работ.

В процессе эксплуатации нефтегазодобывающего оборудования материал, из которого оно изготовлено, нередко находится под воздействием H2S-содержащей среды. Под ее воздействием механические свойства материалов ухудшаются, что, в свою очередь, приводит к их разрушению.

Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением (SSC – Stress Corrosion Cracking) металла труб контролируется на стадии производства путем лабораторных испытаний методами, которые позволяют создать условия возникновения трещин SSC за относительно короткий период воздействия сероводородсодержащей среды и определенного уровня нагрузки. Данные методы (A – стандартное испытание на растяжение по NACE; B – стандартное испытание балки на изгиб по NACE; C – стандартный метод испытания C-образного кольца по NACE; D – испытание двухконсольной балки по NACE) описаны в стандарте ANSI/NACE TM0177-2016 и широко используются в практике испытательной лаборатории ООО НИПП «Вальма» [1]. Как любые методы испытаний, они имеют ограничения по применению, достоинства и недостатки.

# Проведение испытаний образцов металла труб по NACE TM 0177, метод D

В настоящее время ведущие трубные заводы производят для предприятий нефтедобывающей отрасли насосно-компрессорные трубы с размерами 73,02×5,51 мм, стойкие к сероводородной агрессии, по ТУ.

Согласно ТУ стойкость к СКРН (SSC) подтверждается лабораторными испытаниями ДКБ-образцов наряду с другими методами, например методом А по NACE TM0177-2016. Из-за тонкой стенки НКТ изготовление стандартного ДКБ-образца невозможно. В связи с этим является актуальным выбор оптимального размера образца, не влияющего на результаты испытаний.

Метод D – стандартное испытание двухконсольной балки (DCB) – представляет собой испытание на остановку трещины по механике разрушения, заключающейся в измерении сопротивления металла распространению растрескивания под воздействием окружающей среды. Стойкость к распространению трещины выражается в виде критического коэффициента интенсивности напряжений KISSC для SSC. Для испытания на стойкость к SSC углеродистых и низколегированных сталей данный метод требует небольших затрат времени (336 часов). Метод D непосредственно дает численное выражение сопротивления распространению трещины и не зависит от результатов оценки состояния образцов (разрушен или не разрушен)

Стандарт ANSI/NACE TM 0177-2016 регламентирует использование для испытаний стандартного образца ДКБ, толщина которого должна составлять 9,53 мм (0,375 дюйма) (параметр B). Если толщина испытываемого материала недостаточна для выполнения этого требования, можно рассмотреть использование образцов уменьшенного размера (B = 4,76 мм). Однако образцы ДКБ уменьшенного размера из некоторых углеродистых и низколегированных сталей могут давать в результате испытаний меньшие значения KISSC, чем образцы стандартного размера; разница в отдельных случаях, по данным литературных источников, может достигать 37 %. Дальнейшее уменьшение величины B ДКБ-образца стандартом не предусмотрено.

Физический смысл коэффициента интенсивности напряжений KISSC базируется на следующих понятиях: значение KIC соответствует нагрузке, при которой начинается нестабильное развитие трещины, и представляет собой величину KIC, определяемую при испытаниях. Эффективная вязкость материала не может быть меньше, чем величина KIC, благодаря чему последнюю нужно рассматривать как основной показатель вязкости, присущей данному материалу. Величина KIC должна определяться экспериментально, так как реальные материалы деформируются не точно по типу упруго-хрупких тел, составляющих основу линейной механики разрушения. Тем не менее, когда испытанию подвергается достаточно большой образец с трещиной, его поведение близко к упруго-хрупкому, поскольку зона пластической деформации остается небольшой по сравнению с размерами образца.

Разрушение трубопроводных сталей по механизму SSC не является разновидностью медленного хрупкого разрушения, поскольку данный механизм не меняет вязкость разрушения. В связи с этим критерием оценки сопротивляемости стали хрупкому разрушению и выбран параметр $K_{ISSC}$.

# Материалы и испытания

Для проведения испытаний были отобраны образцы насосно-компрессорных труб, изготовленных из конструкционных легированных сталей марок 18ХМФБ/С90 (тип 1) и 30ХГМА-1/С90, выполненных по различным ТУ ведущих трубных заводов.

## Пробы для испытания металла труб, отобранные для исследования

| № п.п. | Марка стали/Группа прочности | Размер труб, мм | Кол-во патрубков | Условная маркировка |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 18ХМФБ/ С90 тип 1 | 93,17×12,5 | 3 | П371 |
| 2 | | 93,17×12,5 | 2 | П372 |
| 3 | | 93,17×11,8 | 3 | П373 |
| 4 | 18ХМФБ/ Е | 107,95×14 | 3 | П410 |
| 5 | 18ХМФБ-2 /С90-1 | 93,17×11,8 | 2 | П414 |
| 6 | | 93,17x11,8 | 2 | П415 |
| 7 | 30ХГМА-1 / С90 тип 1 | 93,17×11,8 | 2 | П416 |
| 8 | 30ХГМА-1/С90 | 194,5×14,5 | 1 | П420 |
| 9 | 30ХГМА-1/С90 | 194,46×22 | 1 | П424 |
| 10 | 18ХМФБ/ С90 тип 1 | 127×12,5 | 1 | П446 |

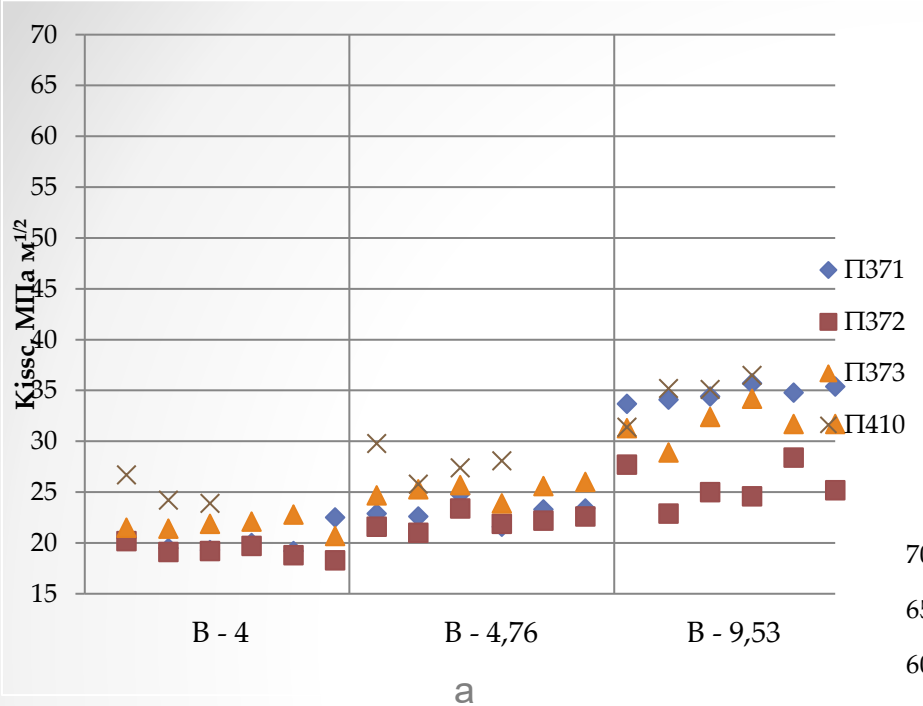
# Условия проведения испытаний

| Условная маркировка ИЛ | Температура (средняя), °С | Продолжительность испытания t, ч | pH среды | | Концентрация $H_2S$ (мг/л) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | в начале | в конце | в начале | в конце |
| П371 | 23,5 | 336 | 2,77 | 3,81 | 2352 | 2377 |
| П372 | | | | | | |
| П373 | | | | | | |
| П410 | 23,5 | | 2,90 | 3,94 | 2582 | 2539 |
| П414 | 23,4 | | 2,89 | 3,62 | 2812 | 2437 |
| П415 | | | | | | |
| П416 | | | | | | |
| П420 | | | | | | |
| П424 | | | | | | |
| П446 | | | | | | |

- Расчет коэффициента интенсивности напряжений $K_{ISSC}$ выполнен по формуле

- $$K_{ISSC} = \frac{Pa(2\sqrt{3}+2.38{}^{h}/_{a})({}^{B}/_{B_n})^{1/\sqrt{3}}}{Bh^{3/2}},$$

- где $K_{ISSC}$ – коэффициент интенсивности напряжений;
- *P* – измеренная нагрузка отрыва;
- *a* – длина трещины;
- *h* – высота каждой консоли;
- *B* – толщина образца в виде двухконсольной балки (DCB);
- $B_n$ – толщина перемычки.

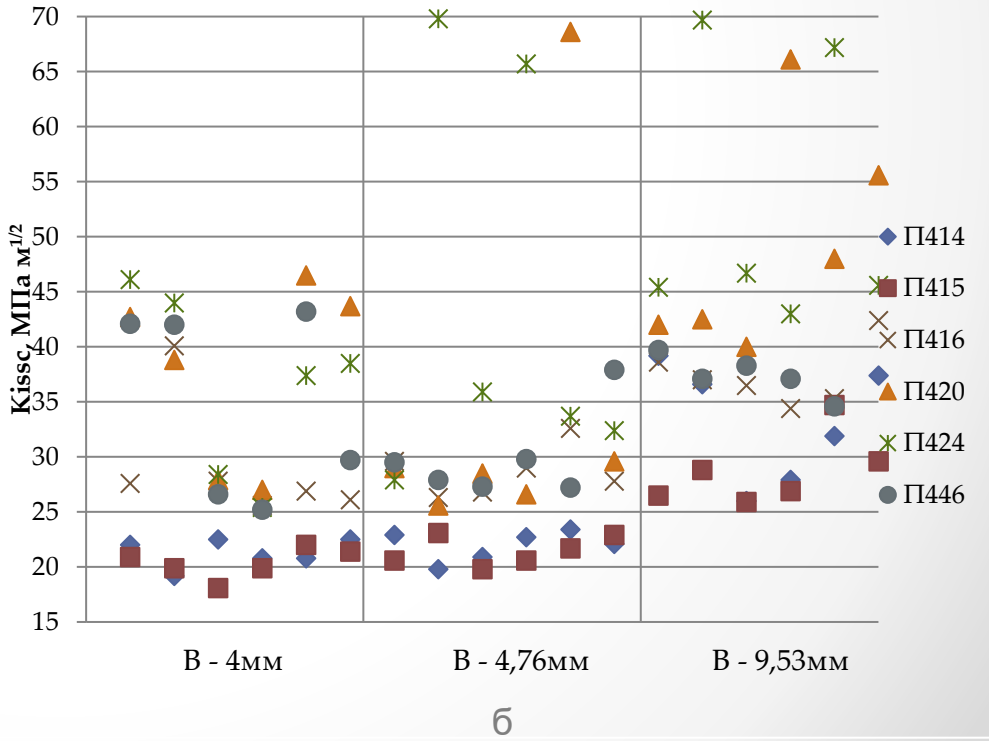



а

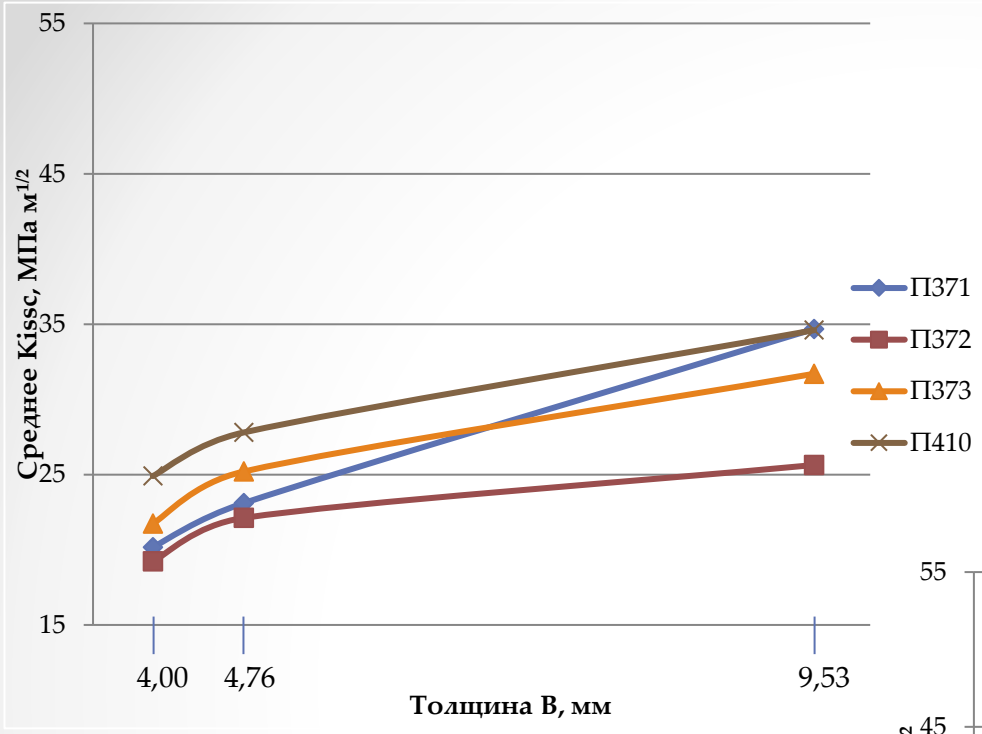
Величина KISSC исследуемых образцов под маркировками:

а – П371…П373, П410;

б – П414…П416, П420, П420, П424, П426.




б

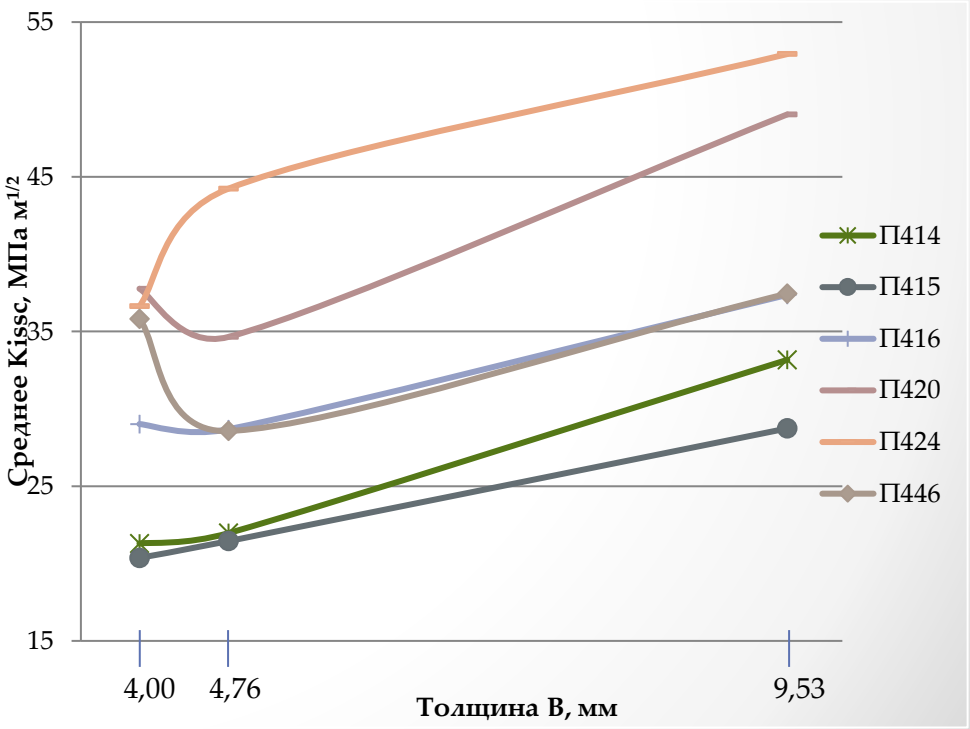



а

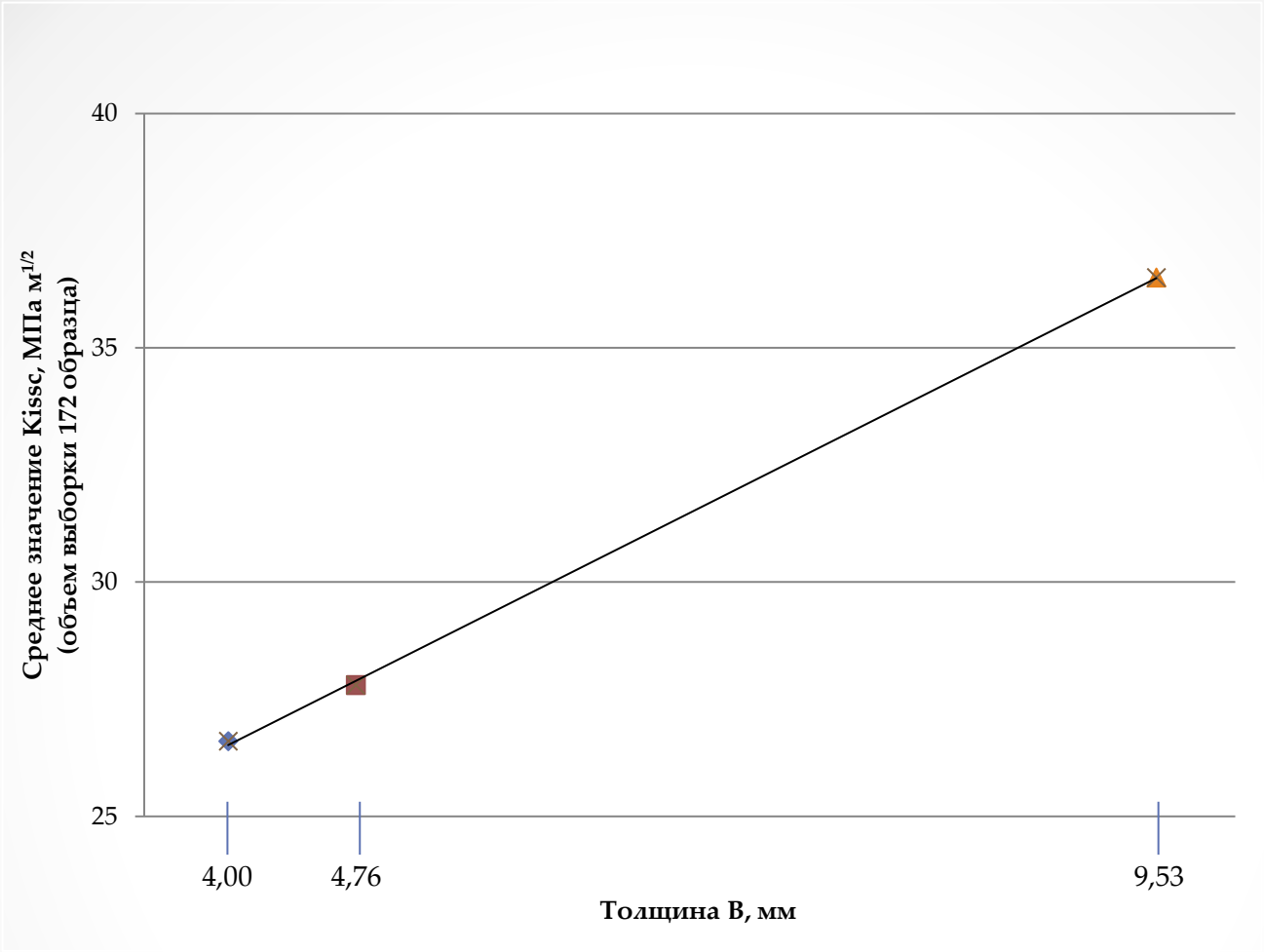
Зависимость средней величины KISSC исследуемых образцов от толщины В:

а – образцы под маркировками П371…П373, П410;

б – образцы под маркировками П414…П416, П420, П420, П424, П426.




б




Зависимость средней величины KISSC исследуемых образцов от толщины B (объем выборки – 172 образца).

# Результаты испытаний

| Условная маркировка ИЛ | № обр. | Смещение консоли (факт.) δ, мм | Толщина B, мм | Толщина Bn, мм | Высота h, мм | Нагрузка P, Н | Длина трещины a, мм | $K_{ISSC}$, МПА√м | Станд. отклонение | $K_{ISSC}$ среднее, МПА√м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| П371 | 1 | 0,74 | 4,03 | 2,61 | 10,0 | 295 | 55,1 | 20,2 | 1,1 | 20,2 |
| | 2 | 0,74 | 4,68 | 2,96 | 12,3 | 469 | 60,8 | 22,7 | 1 | 23,1 |
| | 3 | 0,74 | 8,24 | 5,06 | 12,3 | 1517 | 48,7 | 31,4 | 0,7 | 34,7 |
| П372 | 1 | 0,74 | 4,57 | 2,86 | 10,5 | 431 | 56,4 | 21,1 | 0,6 | 19,2 |
| | 2 | 0,74 | 4,78 | 3,01 | 12,7 | 448 | 66,0 | 22,1 | 0,8 | 22,1 |
| | 3 | 0,75 | 9,52 | 5,87 | 12,7 | 1192 | 55,5 | 25,6 | 1,9 | 25,6 |
| П373 | 1 | 0,75 | 4,03 | 2,57 | 10,0 | 317 | 54,8 | 21,7 | 0,6 | 21,7 |
| | 2 | 0,74 | 4,77 | 3,07 | 12,7 | 543 | 62,2 | 25,2 | 0,7 | 25,2 |
| | 3 | 0,75 | 9,54 | 5,85 | 12,7 | 1687 | 48,3 | 31,7 | 1,6 | 31,7 |
| П410 | 1 | 0,77 | 4,03 | 2,36 | 10,0 | 366 | 50,8 | 24,9 | 1,5 | 24,9 |
| | 2 | 0,77 | 4,77 | 2,83 | 12,7 | 608 | 57,4 | 27,8 | 1,7 | 27,8 |
| | 3 | 0,75 | 9,54 | 5,68 | 12,7 | 1676 | 51,0 | 34,6 | 2,2 | 34,6 |
| П414 | 1 | 0,71 | 3,99 | 2,32 | 10,0 | 308 | 51,6 | 21,3 | 1,2 | 21,3 |
| | 2 | 0,74 | 4,8 | 2,8 | 12,7 | 417 | 68,2 | 22,0 | 1,2 | 22 |
| | 3 | 0,78 | 9,54 | 5,73 | 12,7 | 1620 | 52,8 | 33,2 | 4,9 | 33,2 |

| Условная маркировка ИЛ | № обр. | Смещение консоли (факт.) δ, мм | Толщина B, мм | Толщина Bn, мм | Высота h, мм | Нагрузка P, Н | Длина трещины a, мм | $K_{ISSC}$, МПА√м | Станд. отклонение | $K_{ISSC}$ среднее, МПА√м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| П415 | 3 | 0,72 | 3,99 | 2,31 | 10,0 | 288 | 52,7 | 20,4 | 1,3 | 20,4 |
| | 2 | 0,73 | 4,81 | 2,83 | 12,7 | 414 | 67,2 | 21,5 | 1,2 | 21,5 |
| | 1 | 0,75 | 9,53 | 6,13 | 12,7 | 1432 | 53,1 | 28,7 | 3 | 28,7 |
| П416 | 3 | 0,73 | 3,99 | 2,34 | 10,0 | 482 | 46,2 | 29,0 | 5 | 29 |
| | 2 | 0,73 | 4,80 | 2,84 | 12,7 | 646 | 56,7 | 28,7 | 2,1 | 28,7 |
| | 1 | 0,73 | 9,53 | 6,07 | 12,7 | 2178 | 43,4 | 37,4 | 2,6 | 37,4 |
| П420 | 1 | 0,73 | 3,98 | 2,43 | 10,0 | 764 | 37,8 | 37,8 | 7,6 | 37,8 |
| | 2 | 0,75 | 4,75 | 2,86 | 12,7 | 931 | 53,5 | 34,7 | 15,2 | 34,7 |
| | 3 | 0,76 | 9,58 | 5,77 | 12,7 | 2984 | 41,3 | 49,0 | 9,2 | 49 |
| П424 | 1 | 0,73 | 4,00 | 2,40 | 10,0 | 721 | 38,8 | 36,6 | 7,5 | 36,6 |
| | 2 | 0,77 | 4,75 | 2,90 | 12,7 | 1262 | 49,0 | 44,2 | 16,8 | 44,2 |
| | 3 | 0,76 | 9,58 | 5,79 | 12,7 | 3138 | 42,5 | 52,9 | 11,1 | 52,9 |
| П446 | 3 | 0,71 | 3,98 | 2,33 | 10,0 | 702 | 38,5 | 35,8 | 8,1 | 35,8 |
| | 2 | 0,73 | 4,80 | 2,85 | 12,7 | 677 | 53,3 | 28,6 | 1,1 | 28,6 |
| | 1 | 0,74 | 9,53 | 6,13 | 12,7 | 2130 | 45,2 | 37,5 | 1,5 | 37,5 |

# Результаты исследования

Данное исследование было проведено на 172 образцах, отобранных от муфтовых заготовок для НКТ из сталей марок 18ХМФБ/С90 (тип 1) и 30ХГМА-1/С90 (тип 1). Размер заготовок позволил из одного и того же металла изготовить ДКБ-образцы различных геометрических размеров. За основу был взят параметр B (мм) для различия геометрических параметров образцов (см. табл. 3). Следует отметить, что такой представительный массив данных анализируется впервые.

Были проведены три серии испытаний. Условия испытаний представлены в табл. 2. Видно, что условия испытаний для всех серий практически одинаковы и соответствуют требованиям стандарта NACE TM0177-2016 для среды А.

Результаты испытаний образцов 1-й и 2-й серии (образцы маркировки П-371, П-372, П-373, П-410) указывают на возрастание величины KISSC с увеличением параметра B.

# Зависимость изменения величины $K_{ISSC}$ (%) от величины B (%)

| № п/п | Толщина B, мм | $S_k$, среднее значение $K_{ISSC}$, МПа $м^{1/2}$ | $U_k$, отношение максимального к текущему значению $K_{ISSC}$, % | $U_B$, отношение максимального к текущему значению B, % |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 4 | 26,6 | 73 | 42 |
| 2 | 4,76 | 27,8 | 76 | 50 |
| 3 | 9,53 | 36,5 | 100 | 100 |

SK – среднее значение KISSC по всем образцам данной толщины Bn;

Uk = Sk/ Sk max·100, например: 26,6/36,5×100 = 73 %;

UB = B/ B max·100, например: 4/9,53×100 = 42 %.

Таким образом, из таблицы видно, что:

– уменьшение толщины B на 50 % от стандартного размера образца толщиной B = 9,53 мм приводит к уменьшению KISSC на 24 %;

– дальнейшее уменьшение толщины B на 6 % приводит к уменьшению KISSC на 3 %.

Результаты испытаний 3-й серии образцов на первый взгляд кажутся неоднозначными, однако тенденция к возрастанию величины $K_{ISSC}$ с увеличением параметра B сохраняется при переходе от B = 4,76 к B = 9,53. Повышенное значение $K_{ISSC}$ на ДКБ-образцах маркировки П420, П446 (B = 4,0) свидетельствует о том, что образцы столь малого размера более подвержены влиянию неучтенных при испытаниях факторов, чем стандартные образцы. Поскольку величина $K_{ISSC}$ играет в механике разрушения важнейшую роль, образцы малых размеров, видимо, имеют наибольшие отклонения от законов механики разрушения, в частности, отсутствует соответствие между размером образца и площадью зоны пластической деформации. В связи с этим рекомендации стандарта NACE TM0177 о проведении испытаний методом D на образцах стандартного размера (B = 6,35; B = 9,53) являются обоснованными и актуальными. Результаты испытаний на образцах с параметром B = 4,76 менее достоверны, и величина $K_{ISSC}$ всегда занижена .

Однако, несмотря на указанные выше отклонения результатов испытаний, выявленная тенденция к возрастанию величины $K_{ISSC}$ с увеличением параметра B сохраняется для всего массива экспериментальных данных .

# Выводы

Коррозионные испытания на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением SSC по стандарту NACE TM0177-2016 методом D значительной выборки ДКБ-образцов (172 обр.) из сталей марок 18ХМФБ/С90 (тип 1) и 30ХГМ-1/С90 (тип 1) показали:

1. Величины коэффициента $K_{ISSC}$ на образцах малых размеров (B = 4,0 и B = 4,76) имеют стабильно низкие значения и не соответствуют требованиям ТУ.

2. Значения $K_{ISSC}$, полученные на образцах стандартного размера (B = 9,53), удовлетворительные и соответствуют рекомендациям ряда Технических условий.

3. Полученные результаты свидетельствуют о возрастании коэффициента интенсивности напряжений в вершине коррозионной трещины $K_{ISSC}$ при увеличении размеров ДКБ-образца.

4. Коррозионные испытания на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением SSC по стандарту NACE TM0177-2016 методом D следует проводить на образцах стандартных размеров во избежание получения некорректных результатов. В случае отсутствия возможности изготовления образцов стандартных размеров оценку стойкости к SSC рекомендуем проводить другими методами (A или C).

Данная работа позволяет на основе анализа полученных экспериментальных данных оценить объективную картину влияния размера испытуемых ДКБ-образцов на точность установления значения коэффициента $K_{ISSC}$ и обосновать возможность применения других методов оценки стойкости к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением заводами – изготовителями трубной продукции. При аттестации НКТ с толщиной стенки менее 10 мм представляется целесообразным применение методов A или C по NACE TM 0177-2016.