Закономерности коррозионного растрескивания под напряжением трубных сталей

к.т.н. И.В. Ряховских, к.х.н. Р.И. Богданов

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Лаборатория исследования процессов коррозионного растрескивания под напряжением

IV Научно-практический Семинар «Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных КРН, Москва, 6-8 июня 2018 г.

Текущее состояние КРН МГ

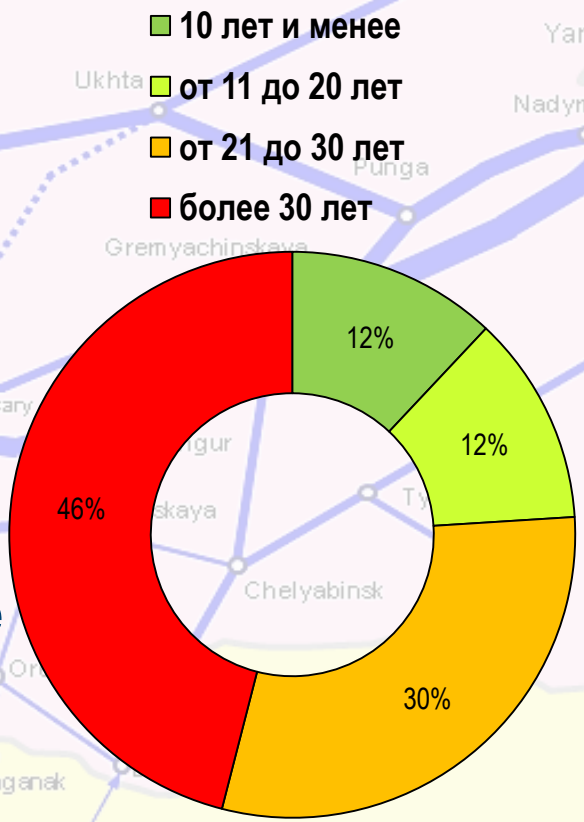
Более 170 000 км магистральных газопроводов

Более 2000 км технологических трубопроводов 250 компрессорных станций

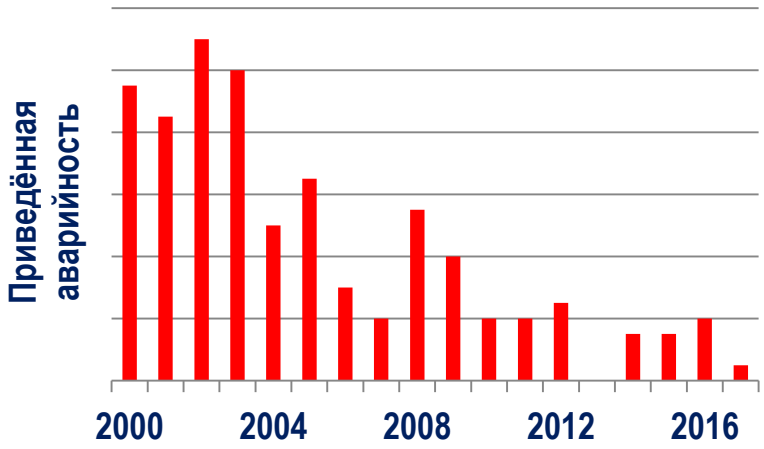
80 % магистральных газопроводов подвержены КРН в 11 газотранспортных обществах ПАО «Газпром»

46 % магистральных газопроводов эксплуатируются более 30 лет

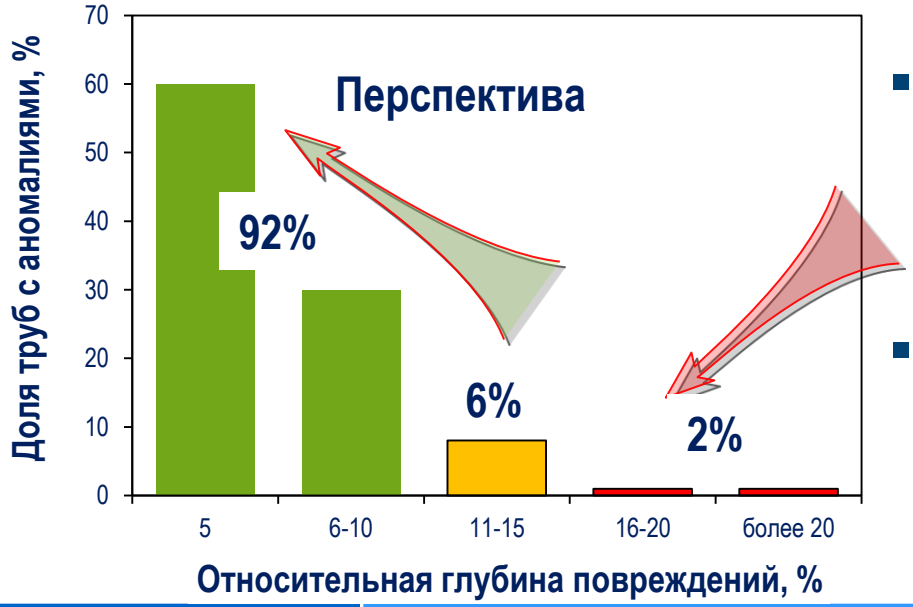
До 30% от общего числа аварий происходит по причине КРН, при этом не более 1,5 % происходит после 30 лет эксплуатации



Актуальность работ



- **Снижение инцидентов по причине КРН за последние 7 лет**



- **Повышение достоверности и чувствительности внутритрубных диагностических комплексов**
- **Увеличение выявляемых аномалий труб, что требует увеличения выборочных обследований и ремонтов трубопроводов в шурфах**

Цель и задачи исследования

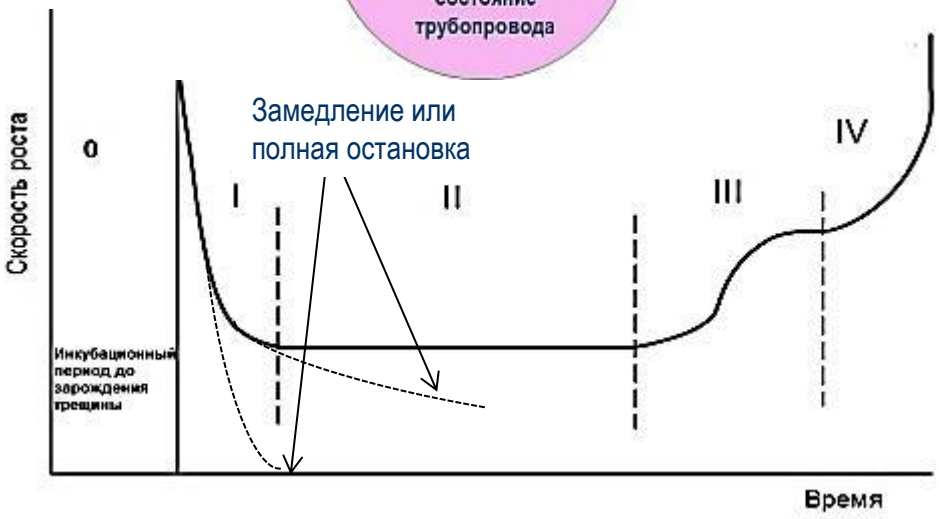
<u>Цель работы</u> – совершенствовании расчетно-методического аппарата оценки коррозионно-механической прочности и долговечности стальных труб с дефектами КРН, а также оптимизации требований к организации технического диагностирования и ремонта МГ с учетом прогнозируемых скоростей развития дефектов

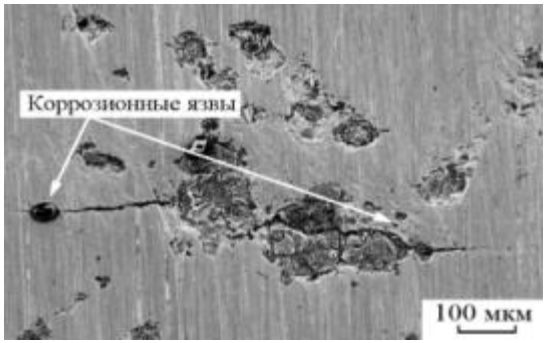
<u>Задачи :</u>

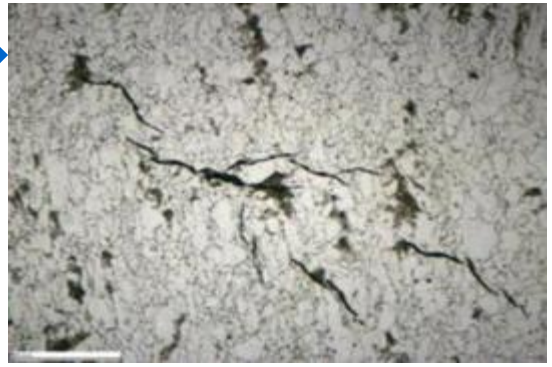
1. Экспериментально установить качественные и количественные закономерности влияния остаточных напряжений, структурных составляющих и текстуры трубных сталей, химического состава грунтового электролита, величины и типа механической нагрузки на трубопровод на образование и скорости развития стресс-коррозионных повреждений с использованием комплекса коррозионно-механических, механических, ресурсных испытаний, рентгеновских и металлофизических исследований
2. Разработать многостадийную модель и методику прогнозирования скоростей образования и последующего развития или торможения процесса КРН стальных труб в зависимости от времени эксплуатации МГ
3. Разработать алгоритм принятия решения о возможности эксплуатации труб с дефектами КРН в составе МГ с учетом прогнозируемой кинетики их развития

Основные факторы и стадии роста стресс-коррозионных повреждений стальных труб

Факторы, влияющие на появление и развитие повреждений труб по механизму КРН





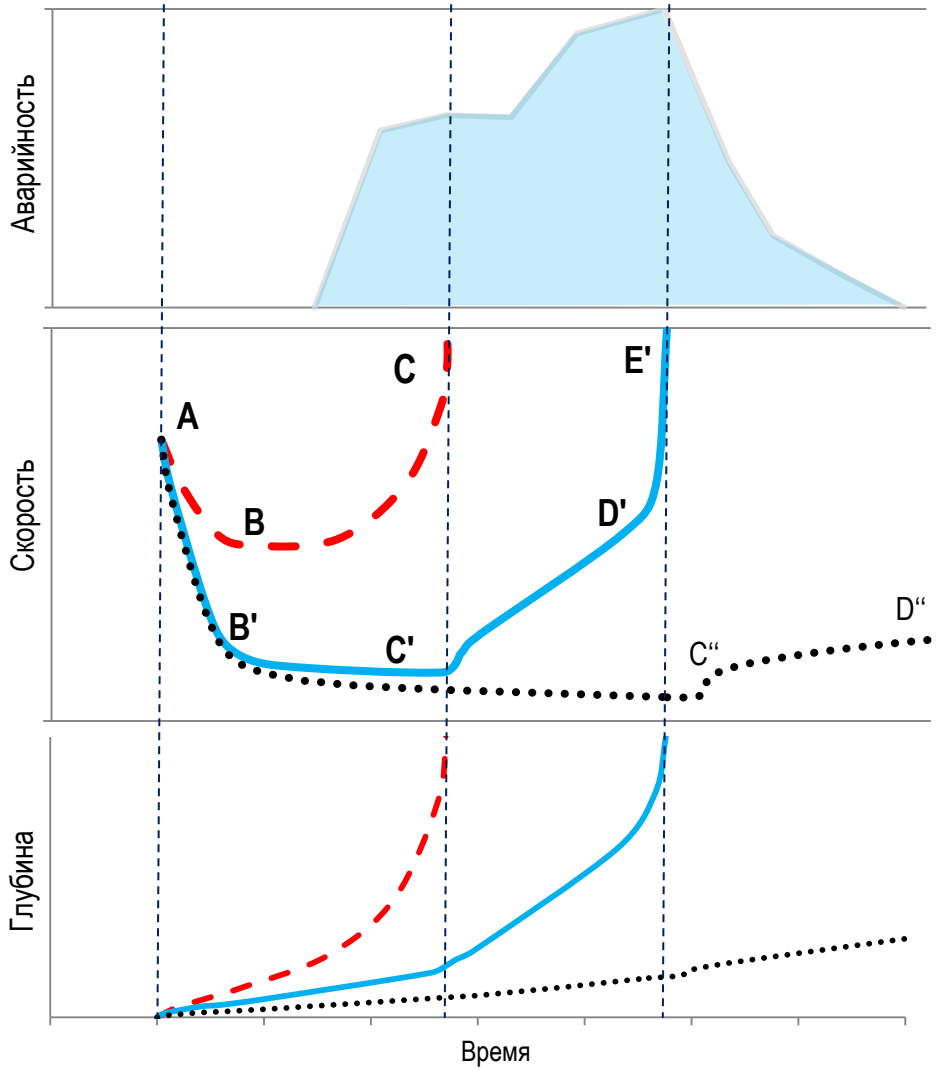


Образование микротрещин из локальных коррозионных язв

Формирование колоний трещин

Взаимодействие трещин в колонии

Многостадийность КРН и сценарии развития трещин с учетом опыта эксплуатации МГ



Сценарий 1 (Ускоренный рост)

Инциденты на МГ по причине КРН в первые 15 лет эксплуатации.

Средняя скорость 1,0-1,5 мм/год

Сценарий 2 (Интенсивный рост)

Инциденты на МГ по причине КРН в период 15-30 лет эксплуатации.

Средняя скорость 0,5-1,0 мм/год

Сценарий 3 (Замедленный рост)

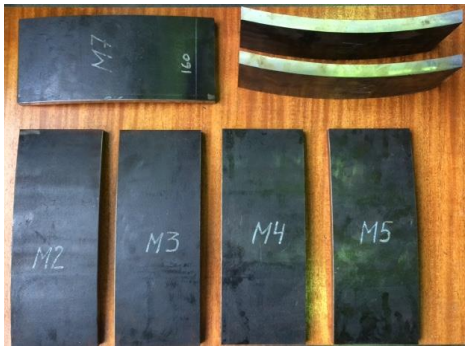
Инциденты на МГ по причине КРН после 30 лет эксплуатации.

Средняя скорость до 0,5 мм/год

Экспериментальные исследования кинетики КРН по сценарию 3 (Замедленный рост)

- **Стадия «0» Инкубационный период до образования трещин**
  - коррозионно-электрохимические исследования;
  - металлографический анализ
- **Стадия «1» Образование, начальный рост и стабилизация трещин**
  - рентгеноструктурные исследования;
  - коррозионно-механические испытания;
  - микроскопические исследования
- **Стадия «2» – Развитие индивидуальной трещины в колонии**
- **Стадия «3» – Развитие магистральной трещины**
- **Стадия «4» – Разрушение**
  - коррозионно-механические испытания образцов;
  - гидроциклические и гидростатические испытания труб;
  - металлографический анализ

Трубы после 25-35 лет эксплуатации Ø1420 мм, толщина стенки 15,7÷18,7мм

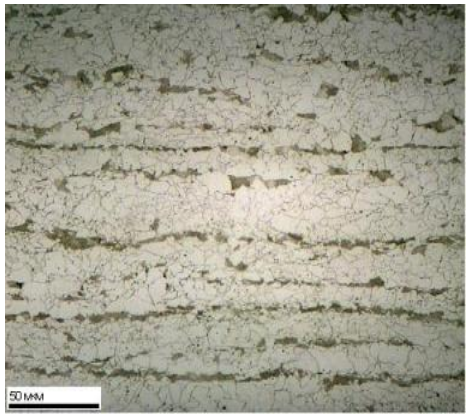


Испытательные среды

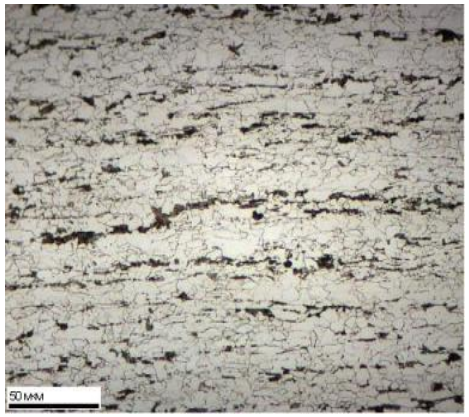
Раствор NS4 pH 7,0 (мод. грунтовый электролит)
+ Na2S (сульфид)
+ NaHCO3 (карбонат)

Свойства металла труб

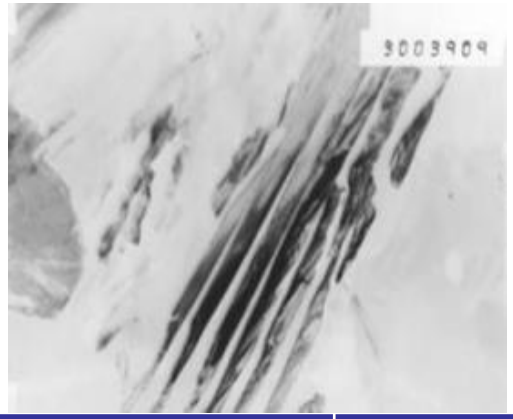
(2 Ш)



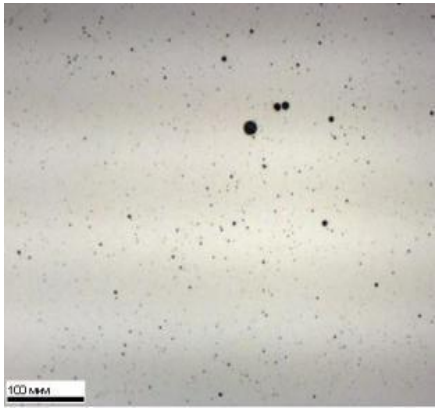
(1 Ш)



(2 Ш)

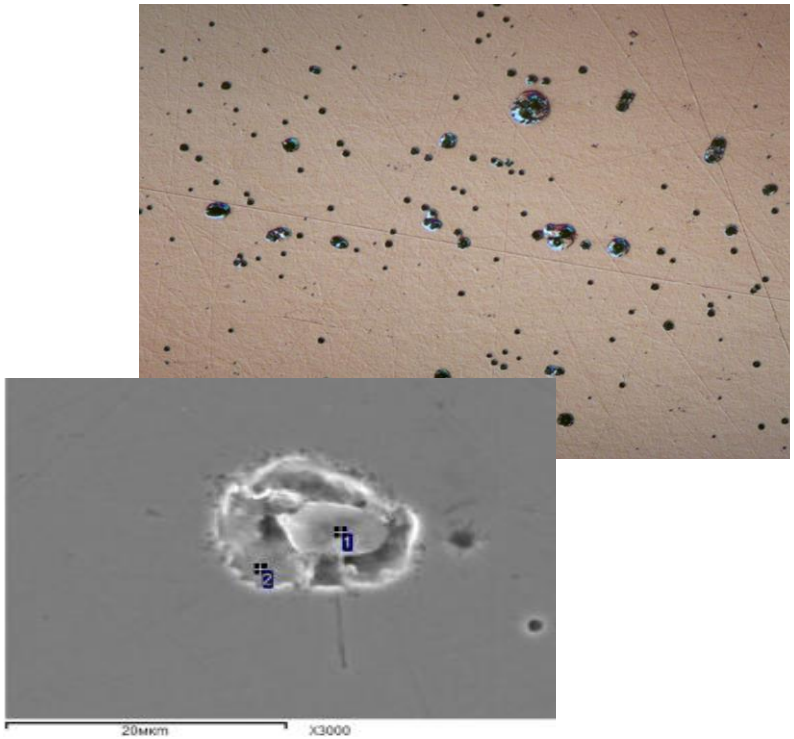


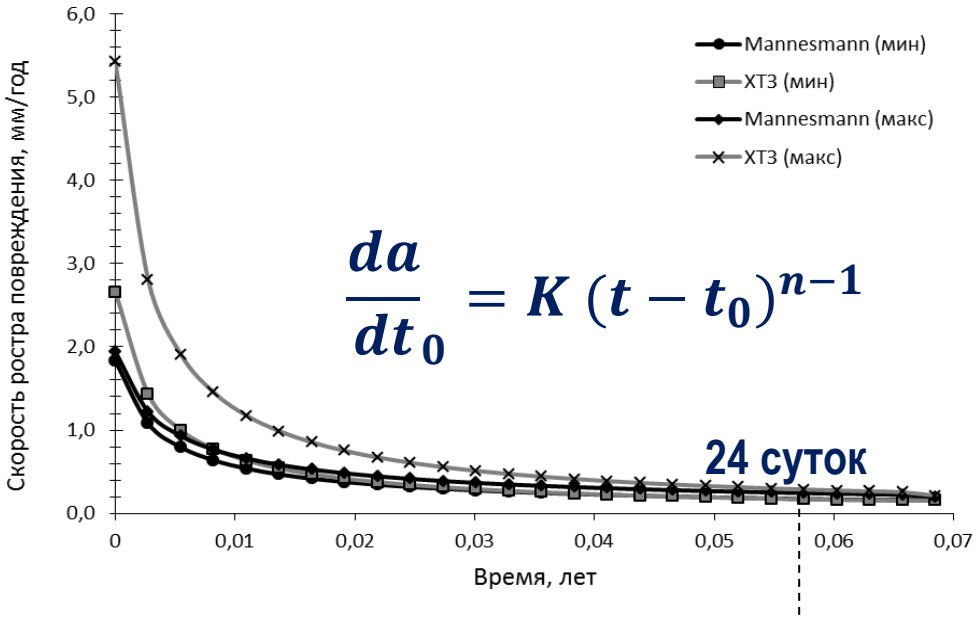
(2 Ш)



Параметр	ХТЗ	Mann
Размер зерна феррита	10-12	9-10
Полосчатость структуры	2-3 (по всему сечению)	Менее 2 (слабо выражена)
$\sigma_{0,2}$	Соотв. ТУ	Соотв. ТУ
$\sigma_в$	Соотв. ТУ	Соотв. ТУ
δ	20 (-1,49 +1,34)	20 (-0,06 +2,7)
$\sigma_т/\sigma_в$	Соотв. СТО Газпром 2-4.1-713	Соотв. СТО Газпром 2-4.1-713
KCV, KCU	Соотв. ТУ (кроме ЛС)	Соотв. ТУ

Стадия «0». Инкубационный период до образования трещин. Коррозионные испытания





$$\frac{da}{dt_0} = K\,(t - t_0)^{n-1}$$

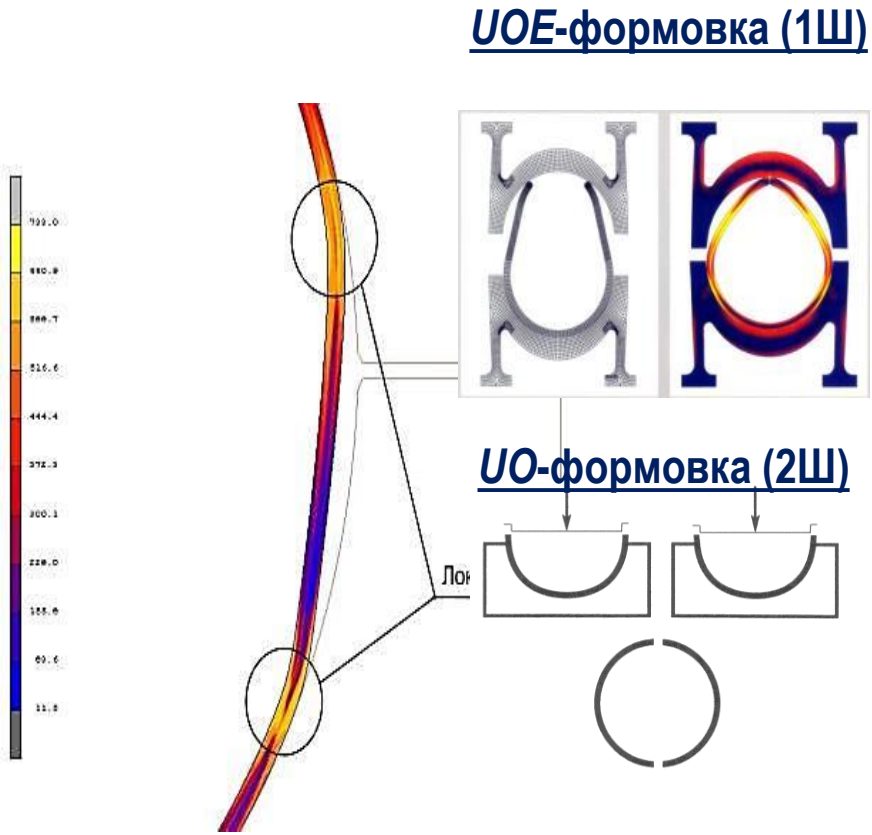
Спектр	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	V	Mn	Fe
1а	17.54	**23.73**	0.00	2.27	0.18	**17.15**	**20.76**	0.09	0.27	17.56
2а	16.85	**18.29**	0.00	0.27	0.28	**1.08**	**1.94**	0.21	0.82	60.27
1б	7.32	**9.01**	3.55	8.85	0.00	**11.62**	**10.65**	0.00	0.83	48.16

- **Состав грунтового электролита**
- **Загрязненность НВ на поверхности стали**

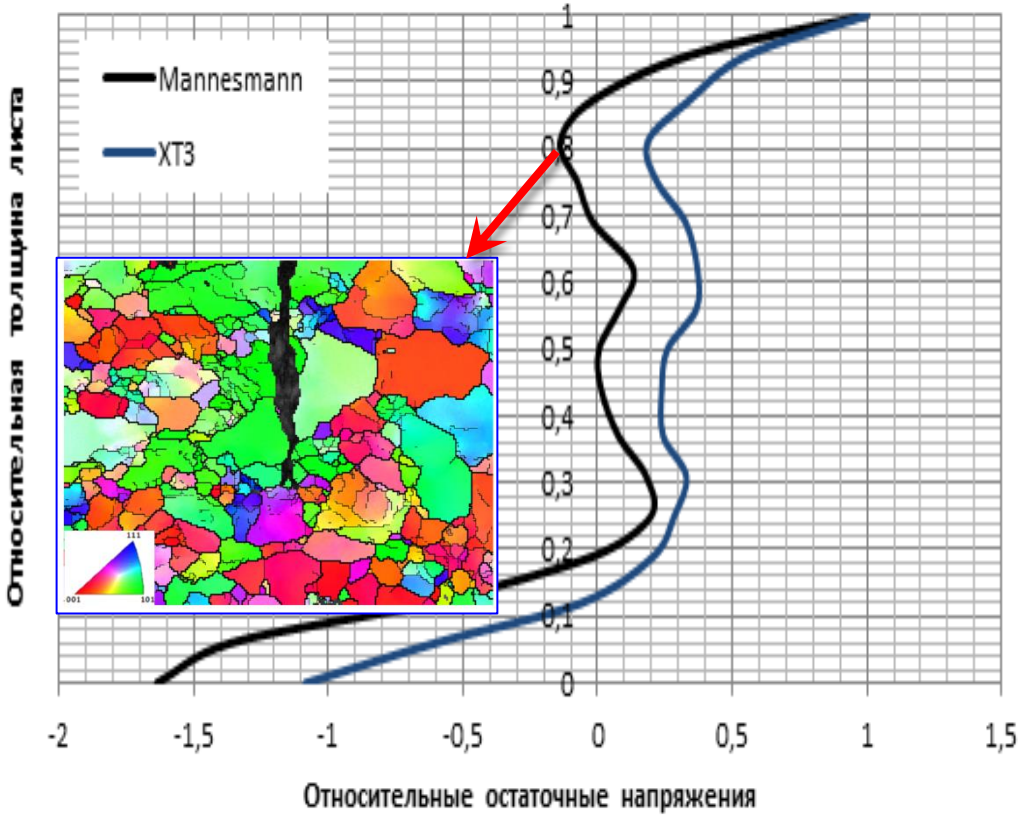
- сульфиды и оксисульфиды марганца;
- оксидные или оксисульфидные включения, содержащие кальций

Стадия «1». Влияние остаточных (технологических) напряжений исследуемых труб

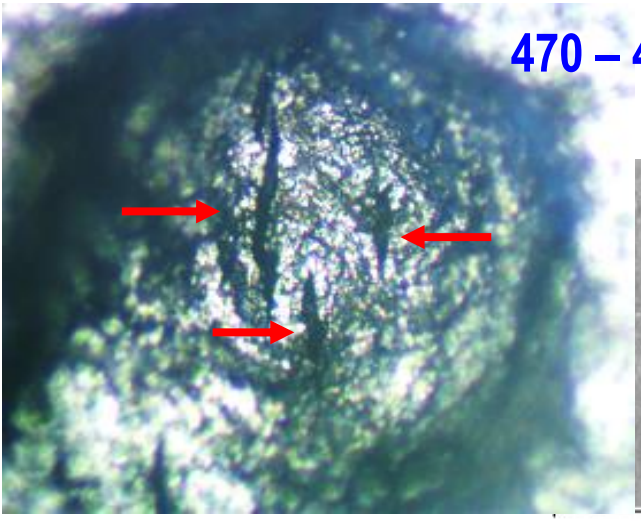
Напряжения в результате формовки



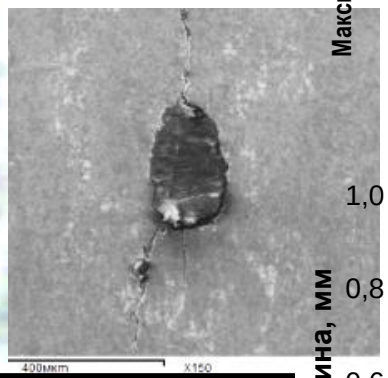
Напряжения в результате прокатки

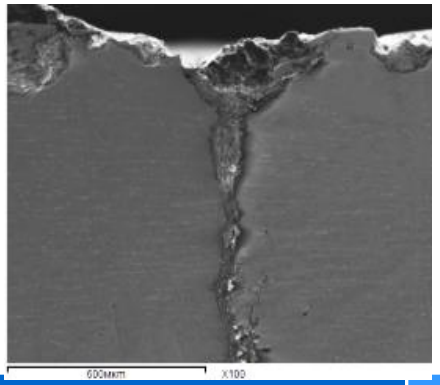


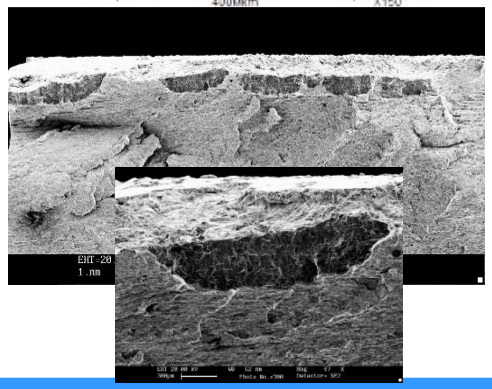
Стадия «1». Образование, начальный рост и стабилизация трещин. Корр.-механические исп.

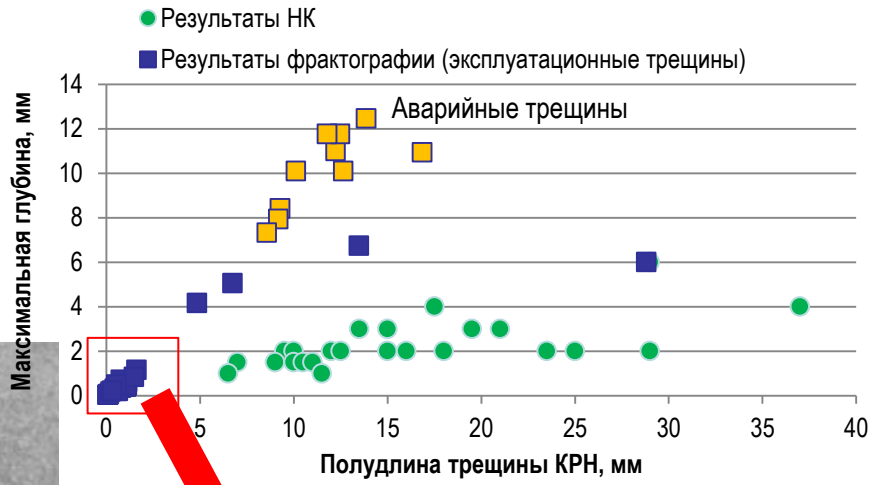


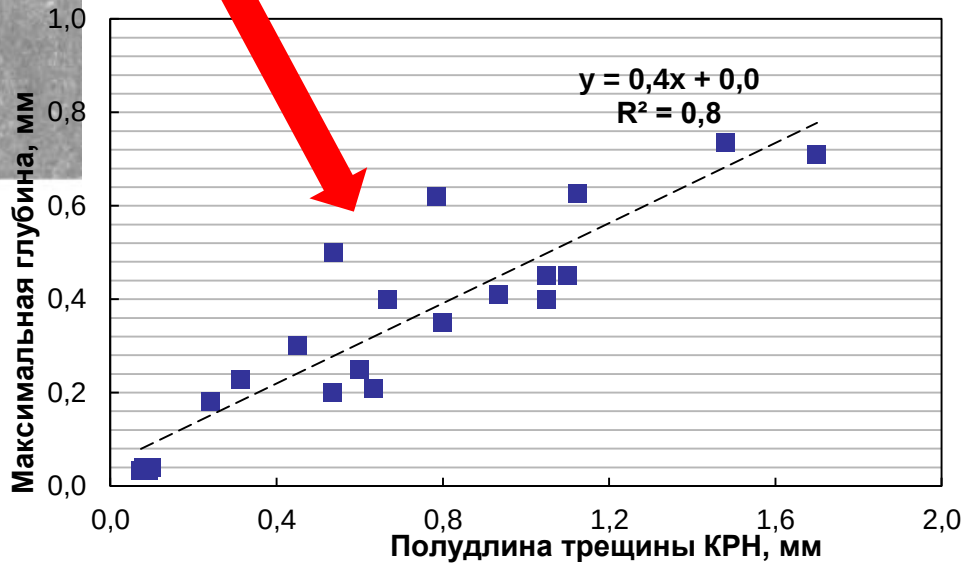
470 – 490 МПа ≈$\sigma_{0,2}$



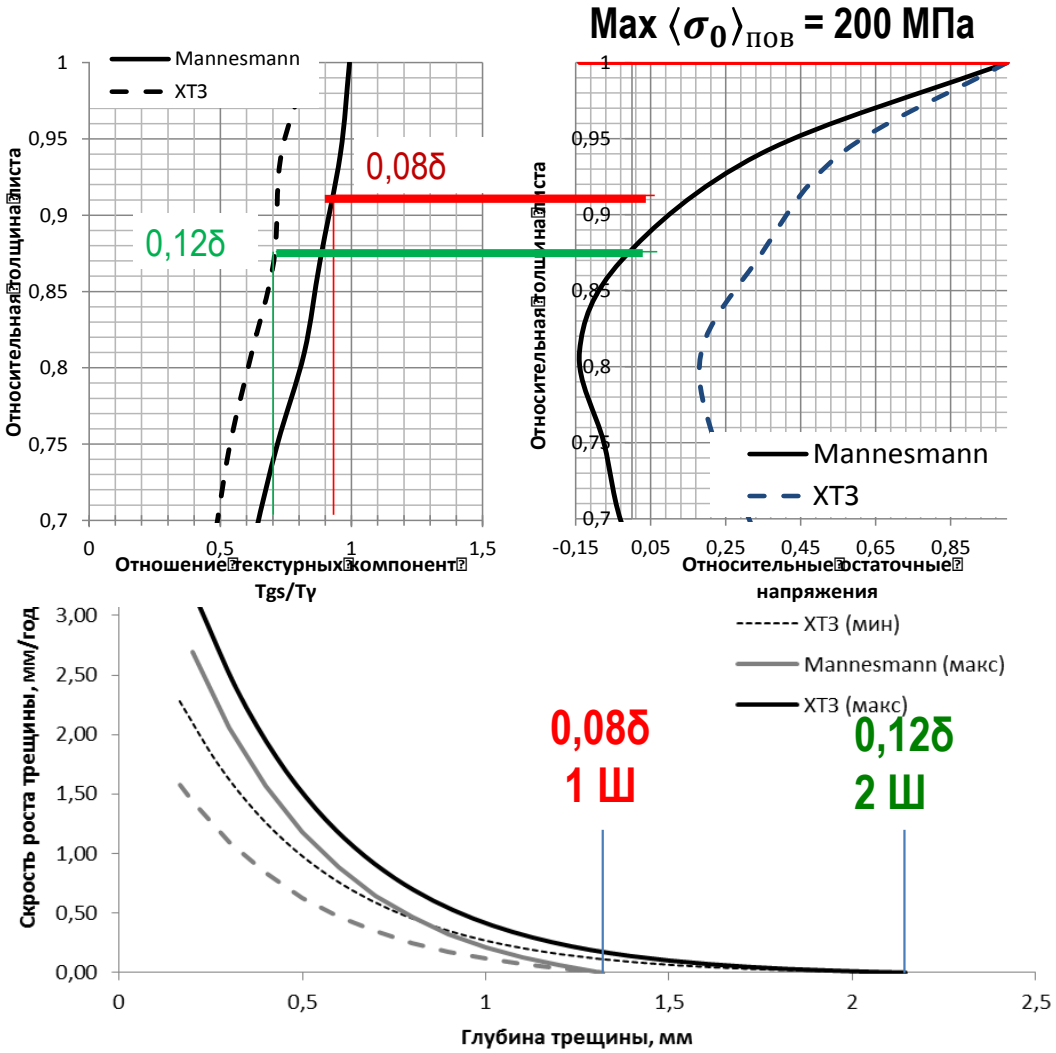






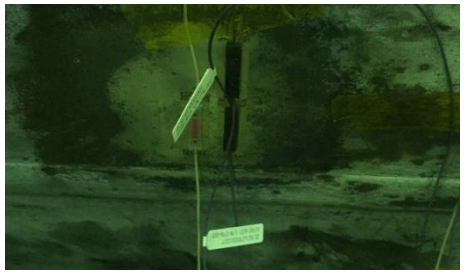


Стадия «1». Образование, начальный рост и стабилизация трещин. Рентгеновские исследования



- **Наличие и геометрия поверхностного концентратора напряжений или скопления НВ**
- **Уровень остаточных напряжений на поверхности и по толщине стенки трубы**
- **Интенсивность снижения остаточных напряжений по толщине листа**
- **Величина текстурной неоднородности**

Стадия «2». Испытательный стенд. Гидравлические испытания дефектных труб



Параметры труб для экспериментальных исследований

1. Труба ТТ КС, диаметр 1420, толщина стенки 18,7 мм, класс прочности Х70, конструкция одношовная, срок эксплуатации в составе МГ 26 лет

2. Отвод холодного гнутья ЛЧ МГ, диаметр 1420 мм, толщина стенки 18,7 мм, класс прочности стали Х70, конструкция одношовная, срок эксплуатации в составе МГ 26 лет

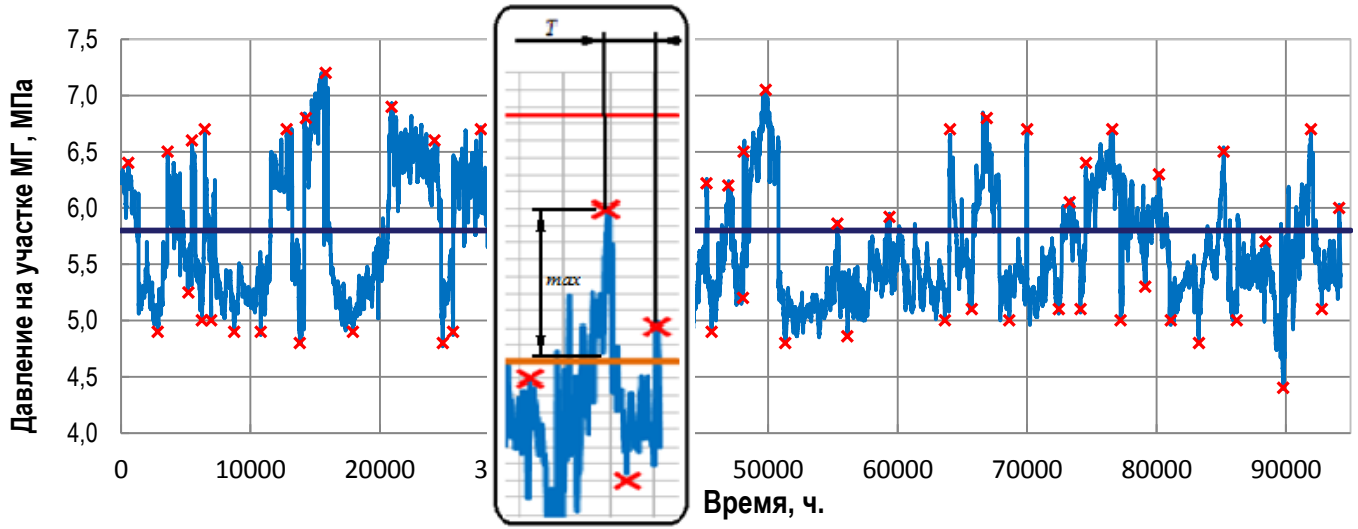
3. Трубы ЛЧ МГ, диаметр 1420 мм, толщина стенки 16,0-16,4 мм, класс прочности стали Х70, конструкция одношовная, срок эксплуатации в составе МГ 33 года

4. Трубы ЛЧ МГ, диаметр 1420 мм, толщина стенки 16,0 мм, класс прочности стали К60, конструкция двухшовная, срок эксплуатации в составе МГ 33 года

Зона – с дефектом КРН в задире на основном металле

Зона – с дефектами КРН, пересекающими сварной шов

Анализ изменения рабочего давления в процессе эксплуатации МГ и режимы нагружения стендов



$N_Б = 2$

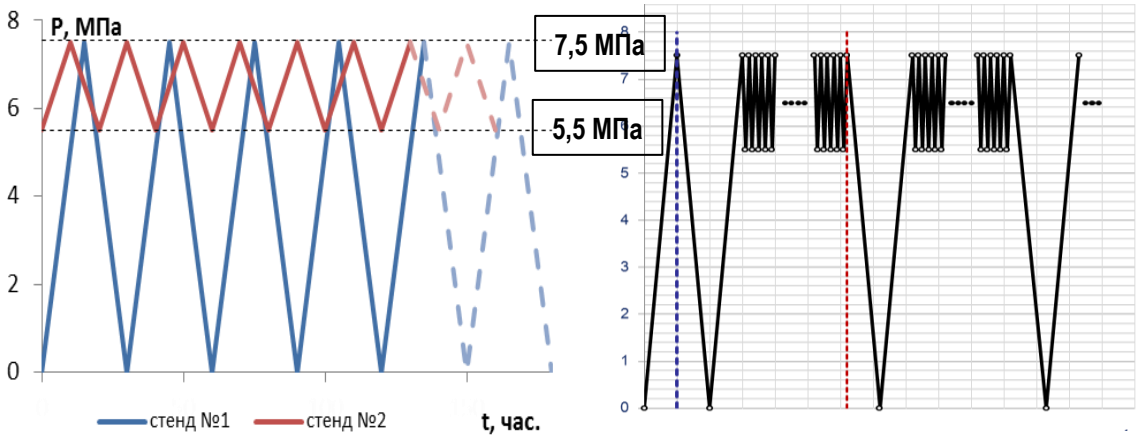
$f = 10^{-7}$ Гц

Рсред = 5,8

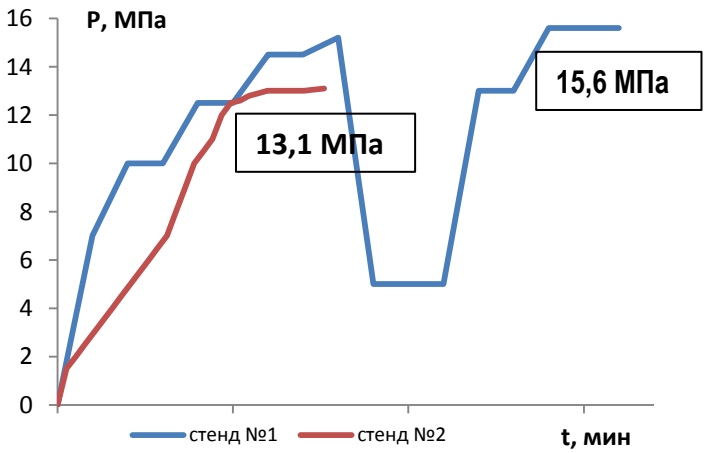
$N_М = 32$

$f = 10^{-6}$ Гц

Переменное нагружение плети

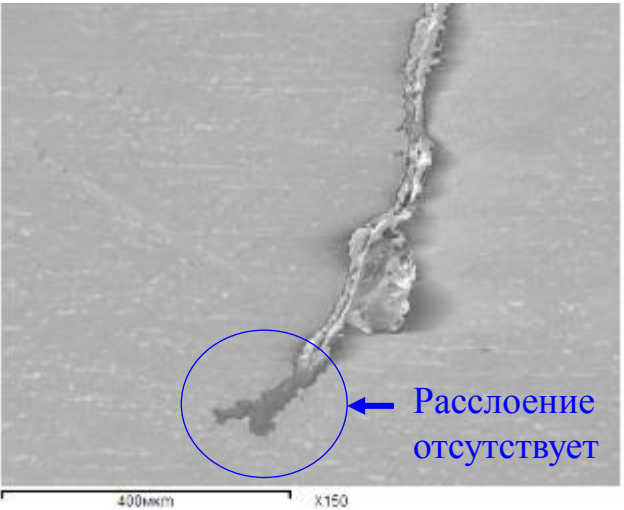


Статическое нагружение



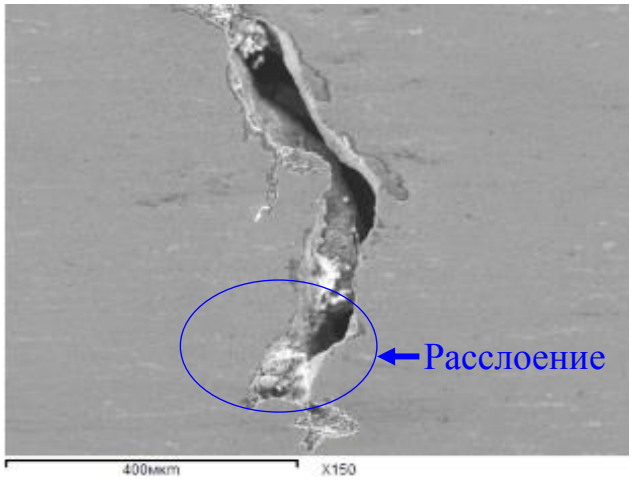
Стадия «2». Результаты металлографических исследований КРН после гидравлических испытаний труб

Без испытаний



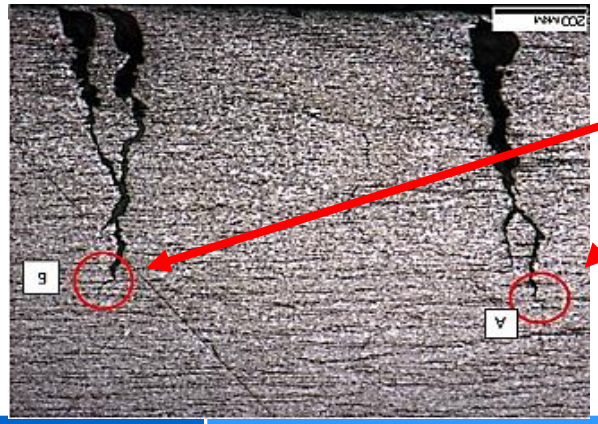
Трещины КРН глубиной до 0,20δ после испытаний в среде

После переменного нагружения

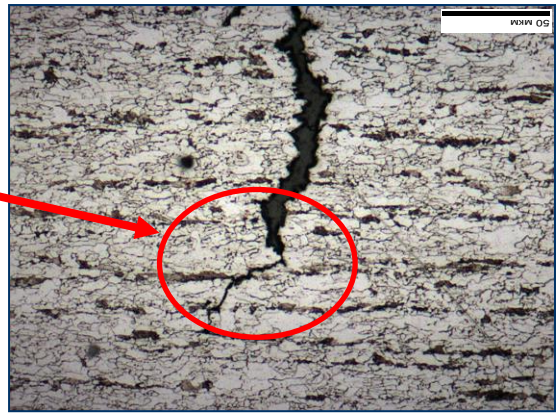


После статического нагружения

Трещины КРН глубиной около 0,30δ после испытаний в среде

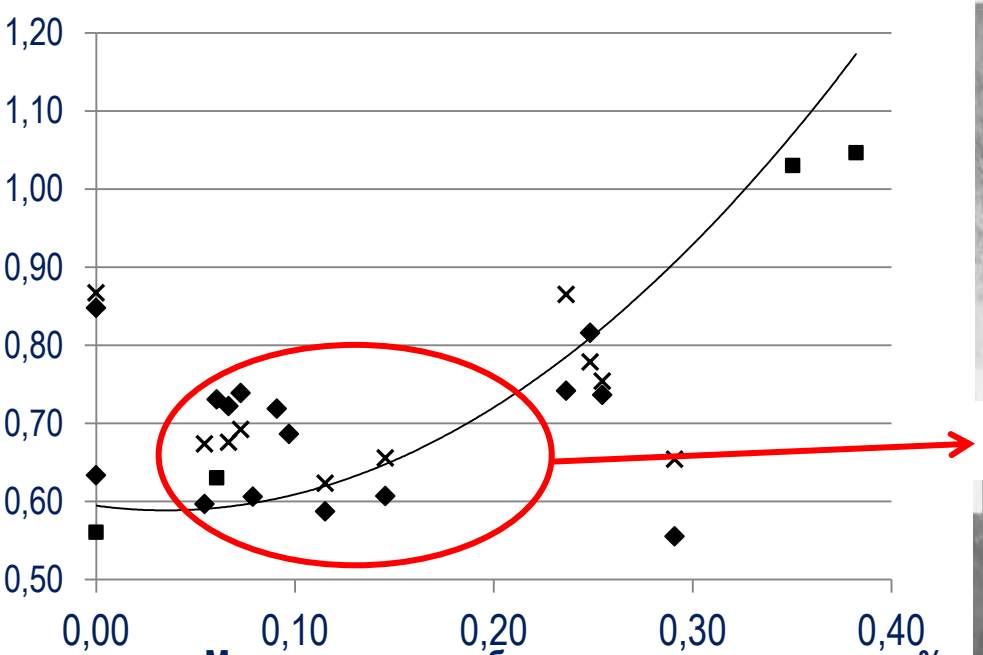


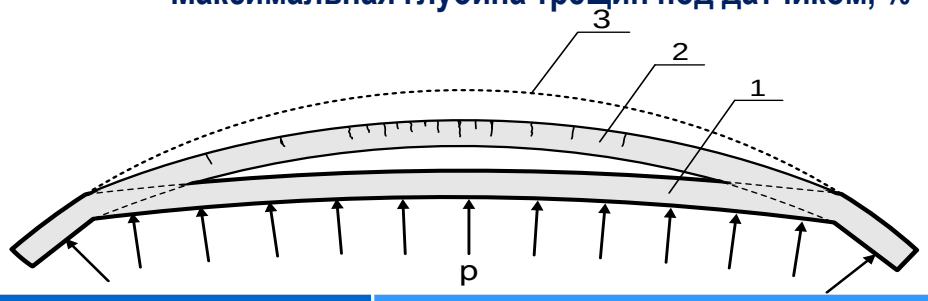
острые тонкие ответвления от основной трещины



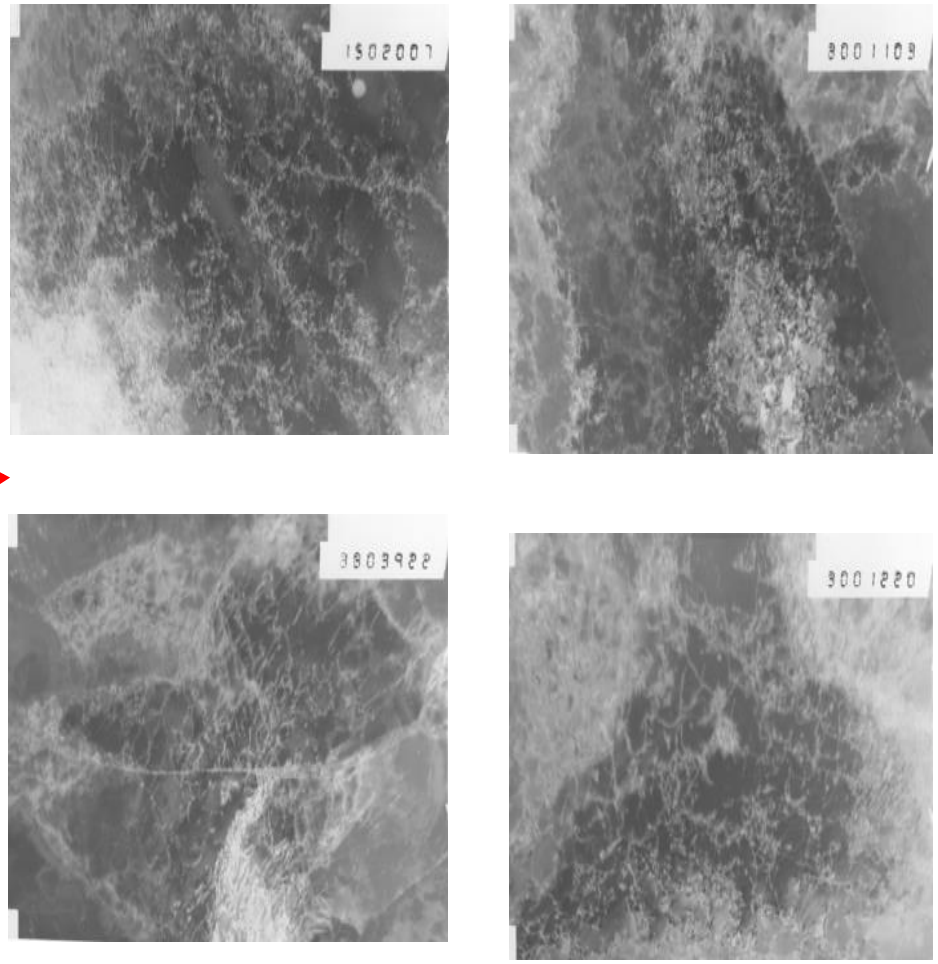
Стадия «2». Данные ВОДД и электронно-микроскопическое исследование вблизи КРН

Напряжение относительно предела текучести по результатам ВОДД

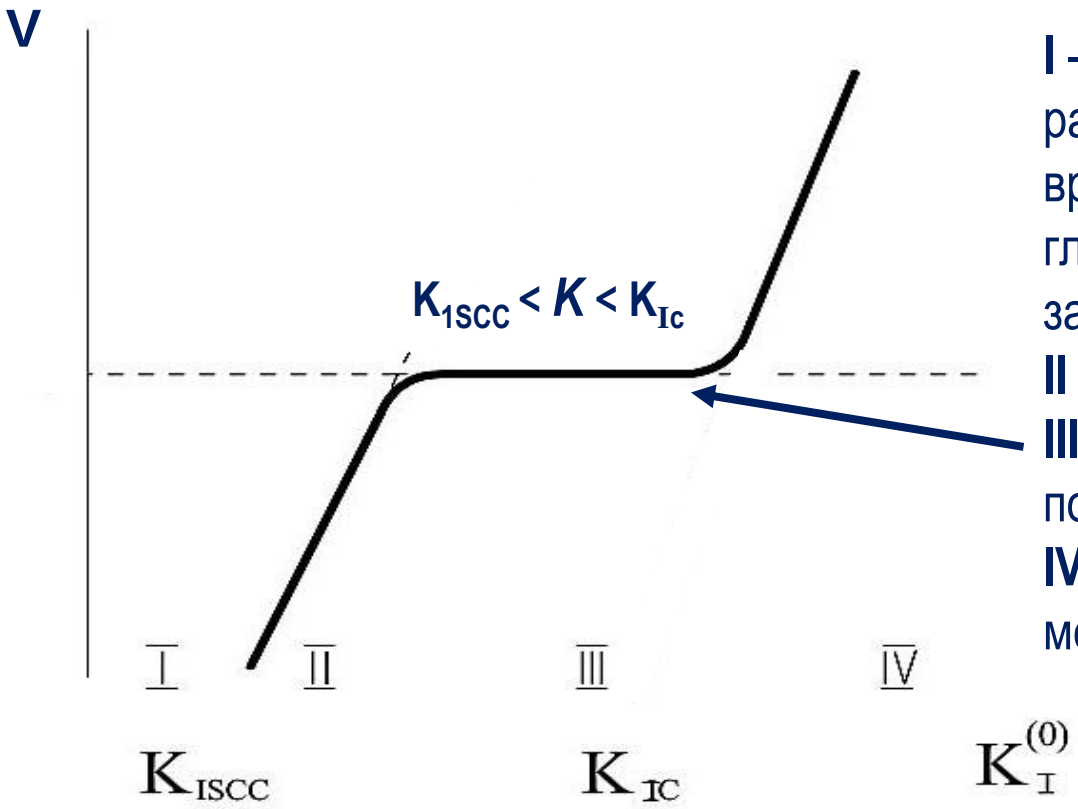




До ***После***



Зависимость скорости роста трещины от расчетного значения КИН



I - зона, где трещина не растет или растет настолько медленно, что за время эксперимента увеличение ее глубины не может быть зафиксировано;
II – зона быстрого роста трещины;
III - зона медленно или почти постоянного роста («плато»);
IV - зона быстрого роста и механического долома

***K_{ISCC}* – пороговая величина начала роста трещины в данной коррозионной среде**

***K_{IC}* – критическая величина механического разрыва металла на воздухе**

Влияние состава раствора на скорость роста трещины при статической нагрузке

Состав раствора	i_a^*	V, мм/год
Модельный электролит NS4 (pH7.0)	2,4-2,6	0,17 –0,19
с добавкой сульфид ионов	3,55-3,9	0,29 – 0,33
с добавкой карбонат ионов	4,15-4,4	0,36 – 0,39

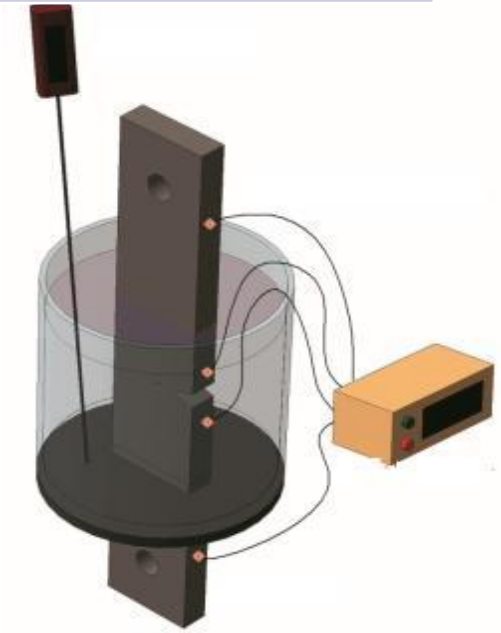
$$\frac{da}{dt} = (A_0 \cdot B \cdot i_a^*)^{\frac{1}{1-n}} \cdot \left(\ln\left(\frac{K^2 - K_{1scc}^2}{\pi \cdot r_0 \cdot \sigma_{0,2}^2}\right)\right)^{\frac{N+1}{N-1} \cdot \frac{n}{1-n}}$$

A_0 –электрохимические параметры системы

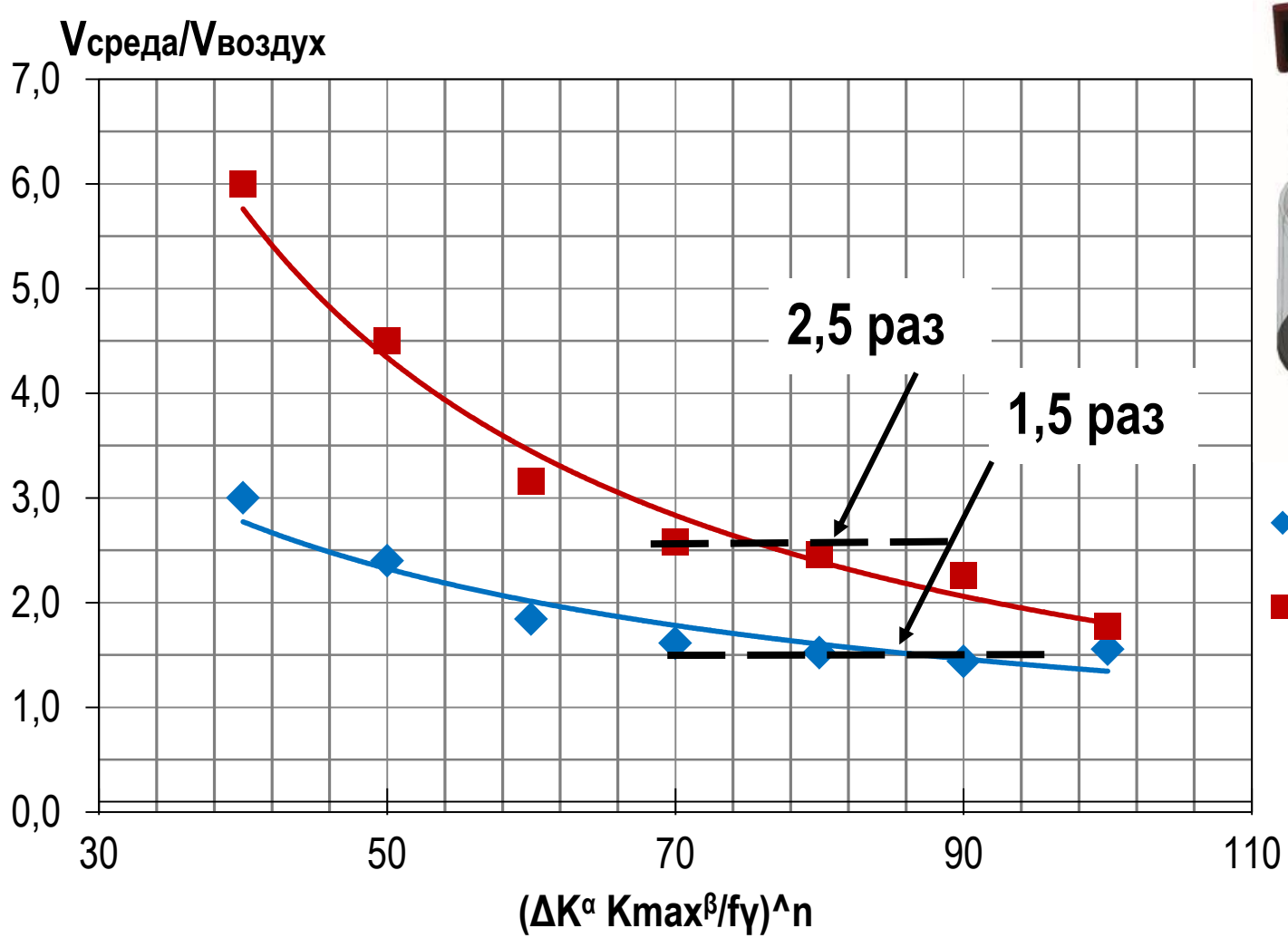
B – механические свойства стали

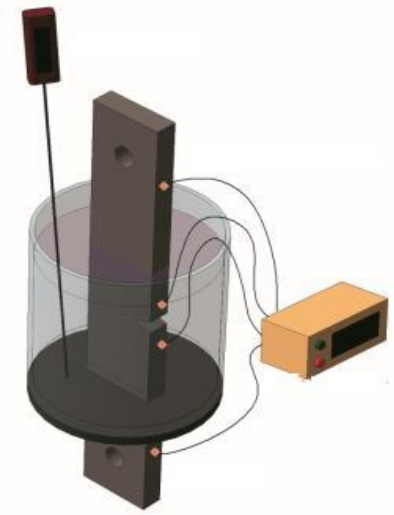
i_a^* – скорость растворения свежеобразованной поверхности металла, А/м^2

$K_{1SCC} < K < K_{Ic}$ – «плато»

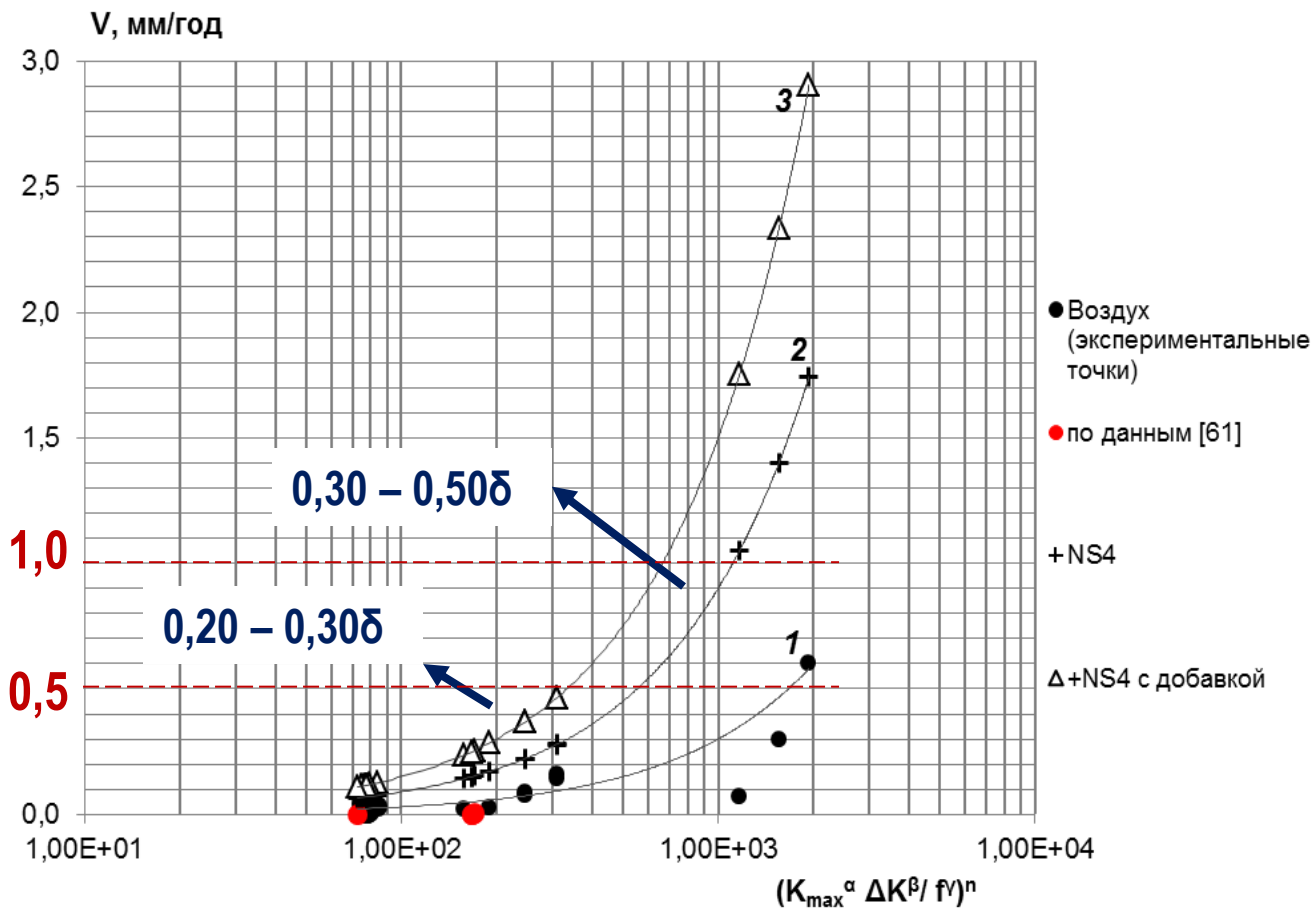


Влияние состава коррозионной среды на скорость роста трещины при переменном нагружении образцов





Стадия «3». Развитие магистральной трещины (глубина более 0,20δ)



$$\frac{da}{dt} = A_i \cdot N_b \left(\frac{\Delta K^{\alpha} \cdot K_{max}^{\beta}}{f^{\gamma} \cdot \frac{N_l}{32}} \right)^n$$

A_i - состав коррозионной среды и условия эксплуатации МГ

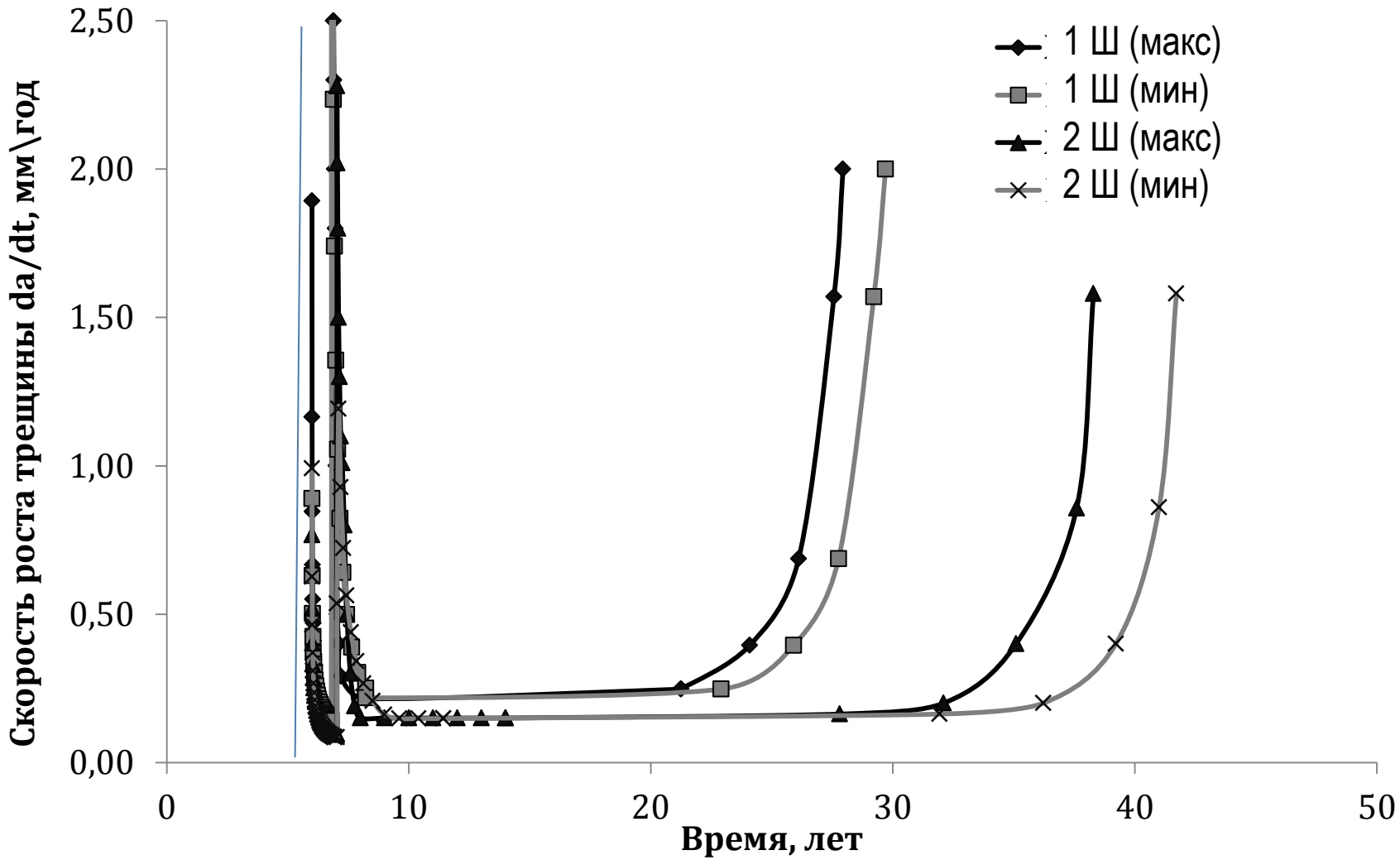
ΔK, K_{max} – циклическая нагрузка

f –частота изменения внутреннего давления в трубопроводе с амплитудой цикла от

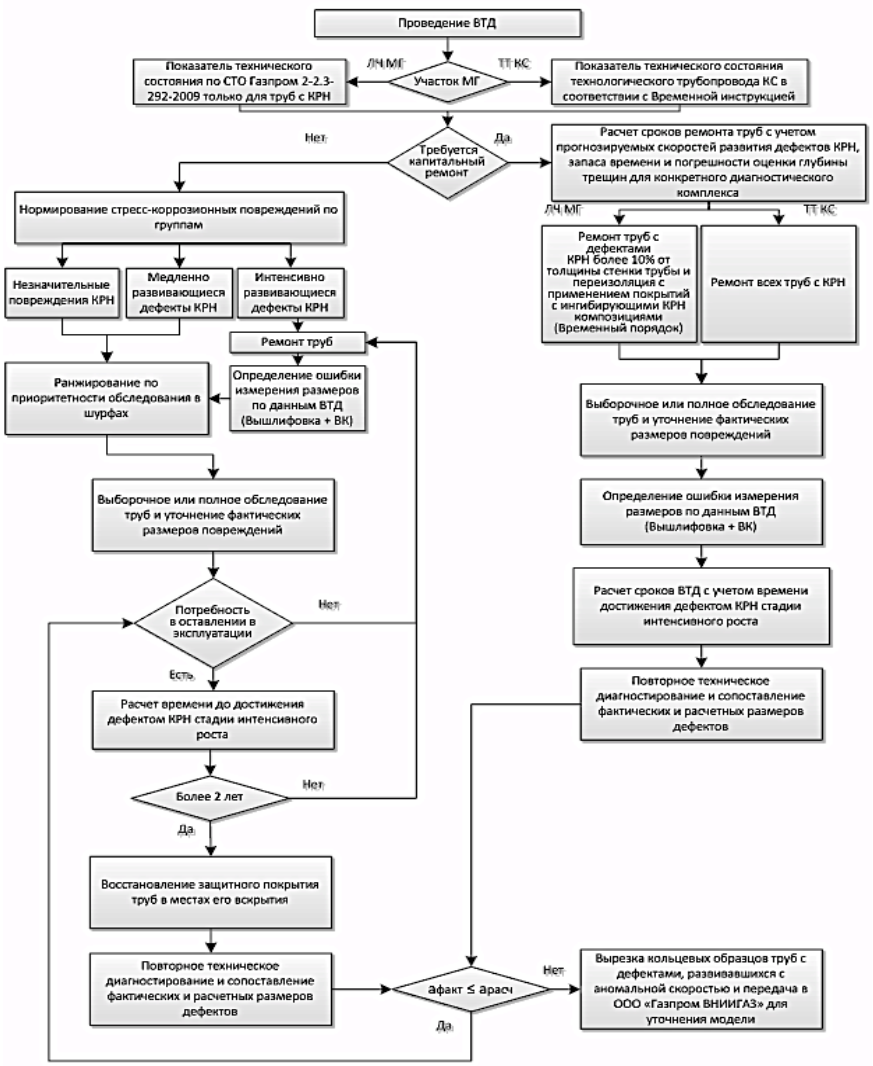
N_l – количество малых циклов с амплитудой от 90 до 98% $P_{раб}$, испытываемых газопроводом

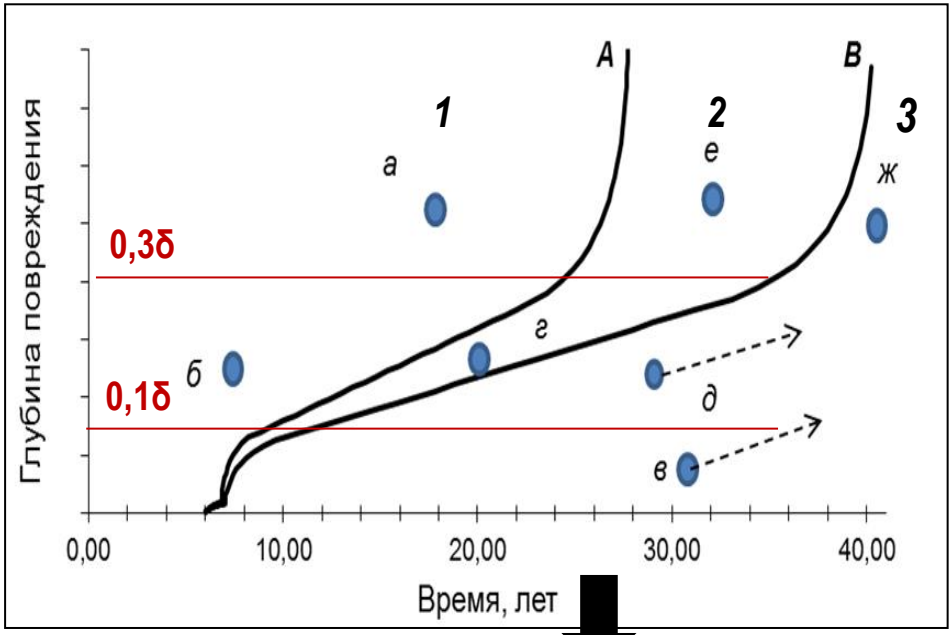
N_b .- количество циклов с амплитудой от 10% до 100% Рраб

Диаграмма изменения скоростей развития дефектов КРН по результатам моделирования



Алгоритм принятия решений об эксплуатации труб с дефектами КРН





- *A* – кривая интенсивного развития КРН
- *B* – кривая замедленного развития КРН

(*1*) - область «*ускоренного*» роста

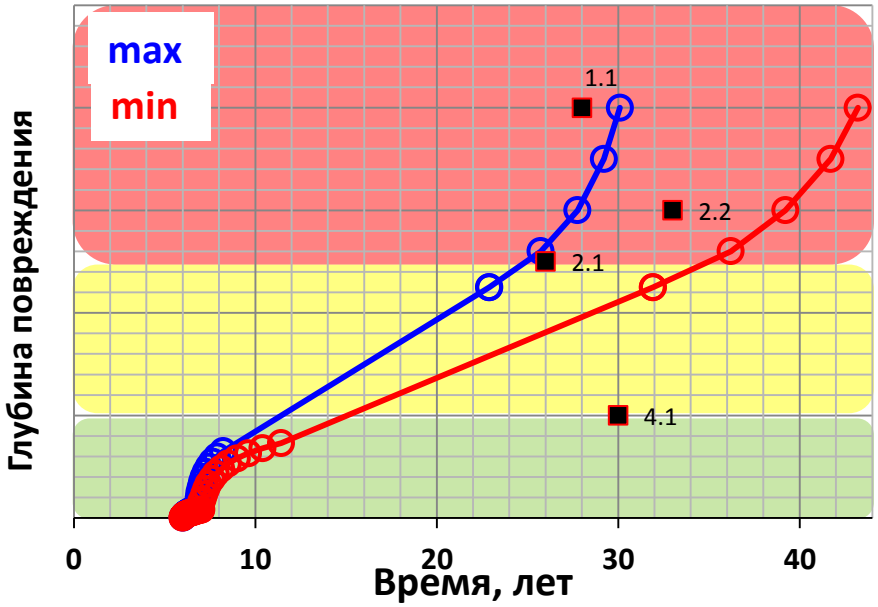
(*2*) – область «*интенсивного*» роста

(*3*) – область «*замедленного*» роста

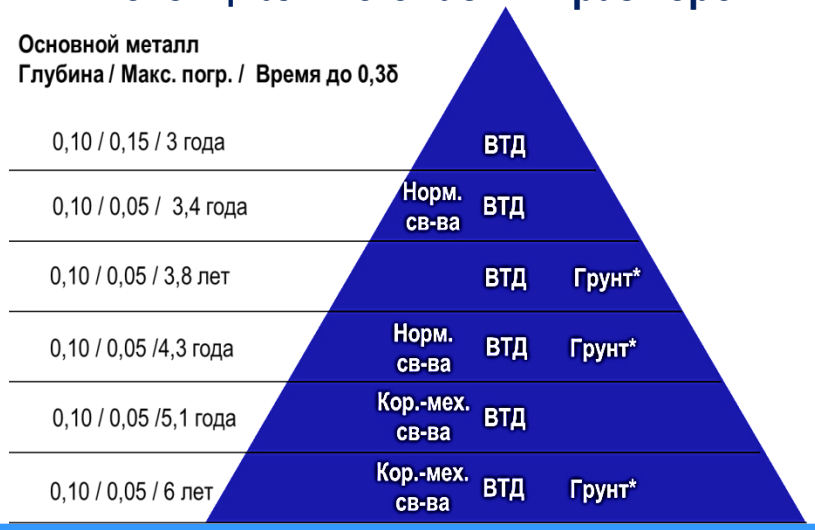
Оценка сроков безопасной эксплуатации труб с дефектом КРН с учетом исходных данных

- Устранение дефектов
- Ранжирование и наблюдение за развитием дефектов
- Оставление дефектов при кап. ремонте

- Нормативные свойства и коррозионно-механические характеристики стали
- Химический состав грунтового электролита
- Уровень остаточных напряжений на поверхности и по толщине стенки трубы
- Параметры постоянной и переменной нагрузки на газопровод
- Конструкция трубы и геометрия в области КРН



Срок эксплуатации труб с КРН до достижения потенциально опасных размеров



Выводы по результатам выполненной работы

1. Рассмотрены характерные сценарии развития КРН металла труб, описывающие стадийность процесса, а также изменение скорости роста и глубины трещин во времени с учетом ретроспективы эксплуатации МГ

2. Расчетно-экспериментально определены скорости развития повреждений КРН в трубах диаметром 1420 мм с толщиной стенки 15,7-18,7 мм из сталей контролируемой прокатки класса прочности Х70 (категория прочности К60), после их длительной (более 25 лет) эксплуатации в составе МГ.

3. Скорость развития КРН глубиной от 10% до 25% от толщины стенки трубы постоянна и не превышает 0,4 мм/год, что позволяет безопасно эксплуатировать дефектные трубы при условии их мониторинга с применением ВТД

4. Установлено количественное влияние остаточных напряжений, структурных составляющих и текстуры трубных сталей, химического состава грунтового электролита, электродного потенциала, величины и типа механической нагрузки на скорости образования и стадийного развития КРН

Предложения

5. С учетом разработанной модели КРН важными задачами повышения надежности ЛЧ МГ и технологических трубопроводов КС, подверженных КРН, и эффективности диагностических и ремонтных мероприятий представляются:

- нормирование стресс-коррозионных повреждений по типам «спящие», «растущие с постоянной скоростью» и «аварийно опасные», при нормативном закреплении возможности эксплуатации газопроводов с первыми двумя типами повреждений с учетом скоростей их развития;
- отмена вырезки труб со «спящими» дефектами КРН при проведении капитального ремонта МГ, за счет их переизоляции с применением покрытий, содержащих ингибирующие КРН композиции
- планирование ремонта труб с дефектами КРН на стадии 2 «растущие с постоянной скоростью» в соответствии с расчетными скоростями их развития и условиями эксплуатации труб
- увеличение протяженности ремонтных работ на участках ЛЧ МГ, подверженных КРН, в местах протяженных отслоений защитных покрытий (по данным ВТД) в рамках которых выполнение 100% контроля продольных и кольцевых сварных швов на предмет наличия трещин, что обеспечит уменьшение амортизации и аварийности ГТС
- внедрение методов трассового диагностирования грунтов на предмет наличия в них активаторов протекания локального анодного растворения и промоторов наводораживания стали, для прогнозирования скоростей развития дефектов КРН в различных природно-климатических условиях
- сериальные испытания различных типоразмеров труб после длительной эксплуатации в составе МГ и их классификация по стойкости против КРН, а также для определения эмпирических коэффициентов уравнений разработанной модели для широкой номенклатуры труб

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Ряховских Илья Викторович, канд. техн. наук
Начальник лаборатории исследования процессов КРН
Тел.: (498) 657-40-48 доб. 21-15 (газ. 5-67-30)
E-mail: I_Ryakhovskikh@vniigaz.gazprom.ru

Богданов Роман Иванович, канд. хим. наук
Вед. научный сотрудник лаборатории исследования процессов КРН
Тел.: (498) 657-40-48 доб. 27-72
E-mail: R_Bogdanov@vniigaz.gazprom.ru

Результаты исследований ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в области КРН газопроводов

Публикации
в европейских и российских научных журналах 14-17 гг.

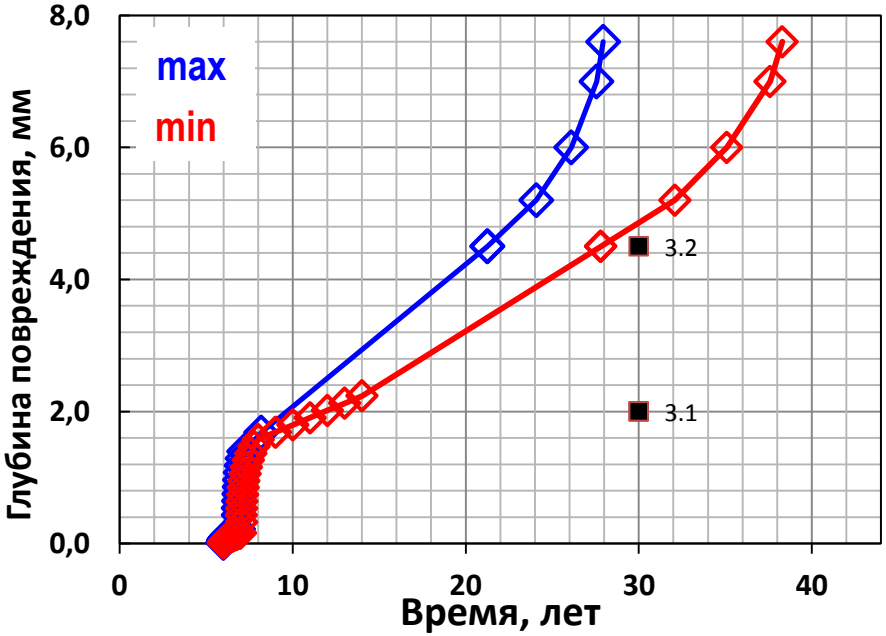
Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных газопроводов: Атлас – 2006 г.

Скорость развития стресс-коррозионных дефектов по результатам комплексных испытаний дефектных труб

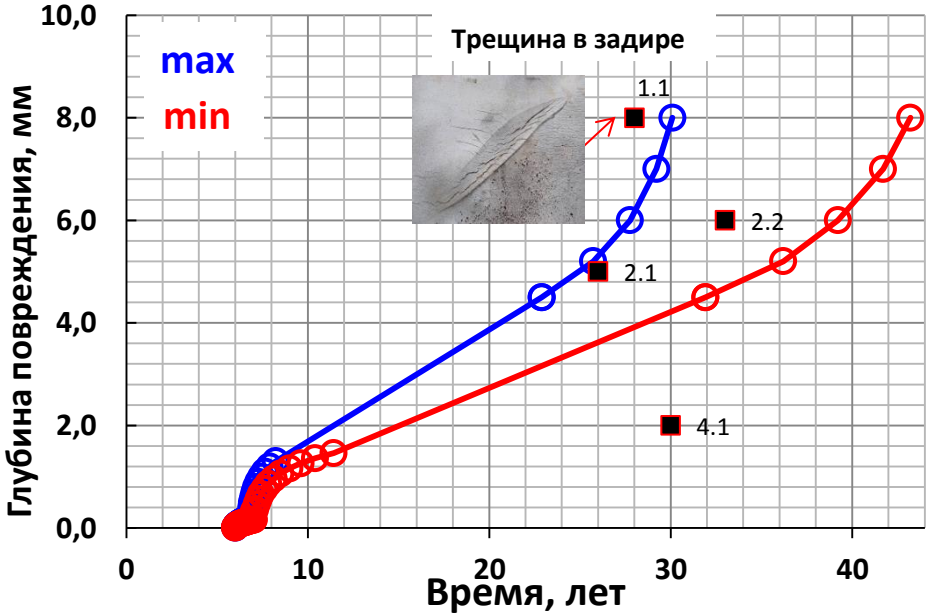
$$\frac{da}{dt_i} = \begin{cases} i = 0 \mid \quad K\,(t - t_0)^{n-1}, \\ i = 1 \mid \quad r \cdot \exp\left(-\frac{a}{m}\right), \\ i = 2 \mid \quad (A_0 \cdot B \cdot i_a^*)^{\frac{1}{1-n}} \cdot \left(ln\left(\frac{K^2 - K_{1scc}^2}{\pi \cdot r_0 \cdot \sigma_Y^2}\right)\right)^{\frac{N+1}{N-1} \cdot \frac{n}{1-n}}, \\ i = 3 \mid \quad A_i N_b \left[\frac{K_{max}^{\beta} \Delta K^{\propto}}{f^{\gamma} \frac{N_l}{32}}\right]^n, \\ i = 4 \mid \quad 0 - \text{Разрушение} \end{cases}$$

Стадия «0»	**0,16 - 0,26 мм/год**
Стадия «1»	**0,01 - 1 мм/год**
Стадия «2»	**0,15 - 0,39 мм/год**
Стадия «3»	**0,5 – более 1 мм/год**

Ø1420х16,5 мм ХТЗ

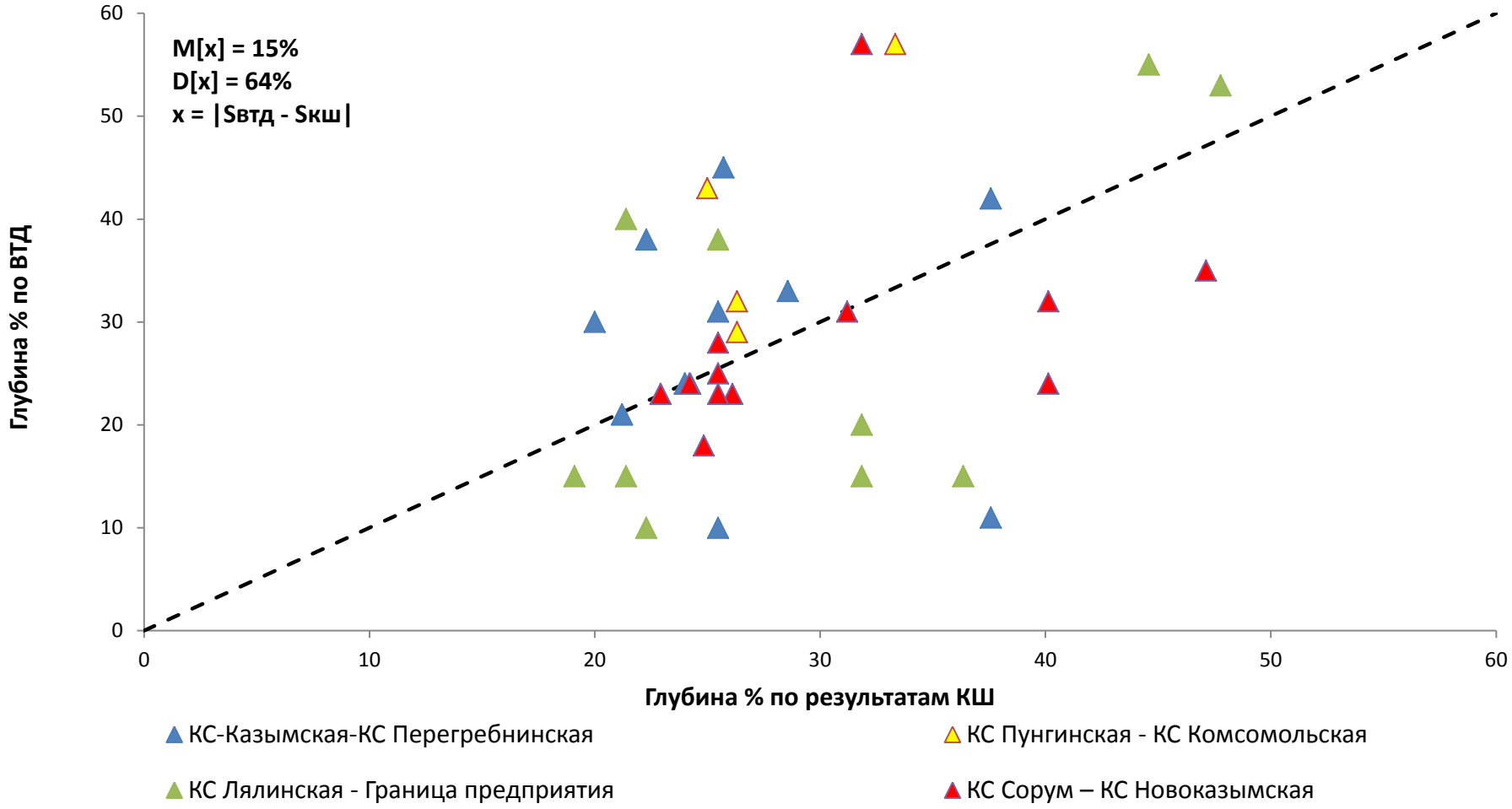


Ø1420х16,5 мм Mannesmann

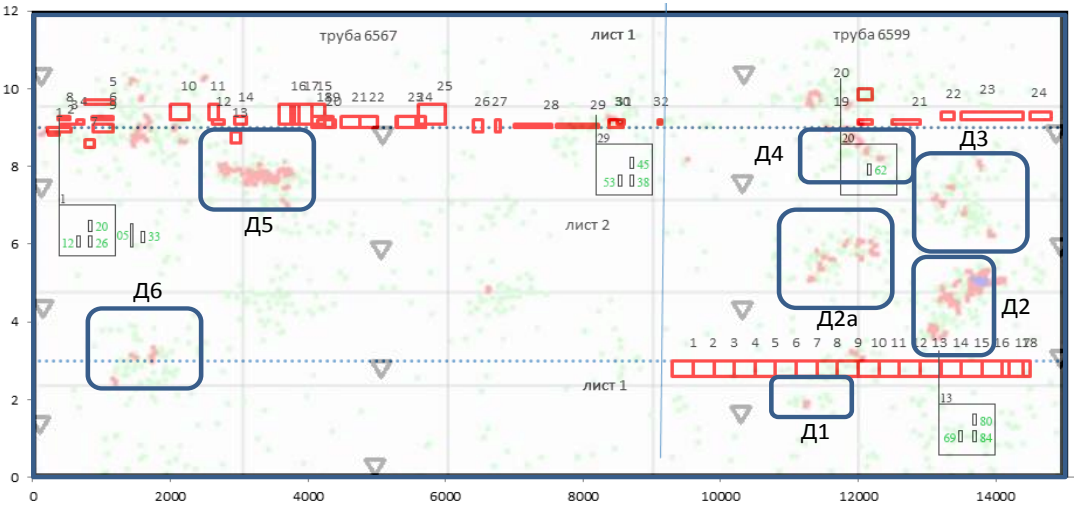


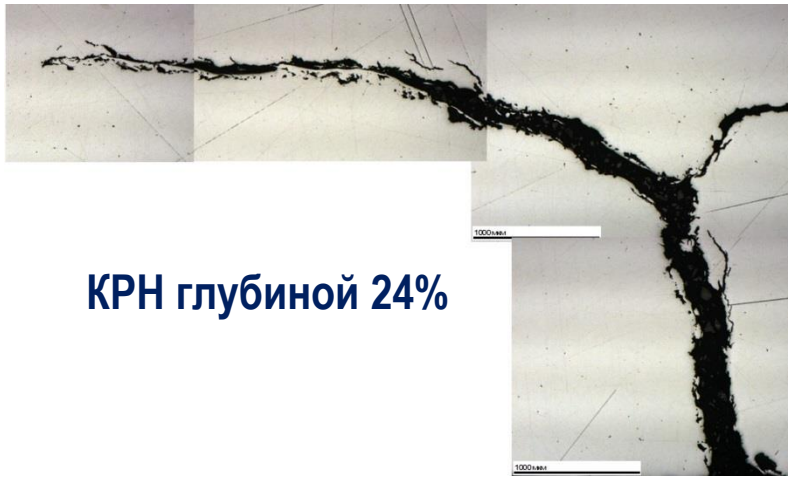
Подходы к прогнозированию усредненных скоростей роста трещин МГ

Сравнительный анализ оценки глубины трещин по данным ВТД (MFL) и обследований в шурфах



Данные АЭ для труб при давлении 7,5 МПа

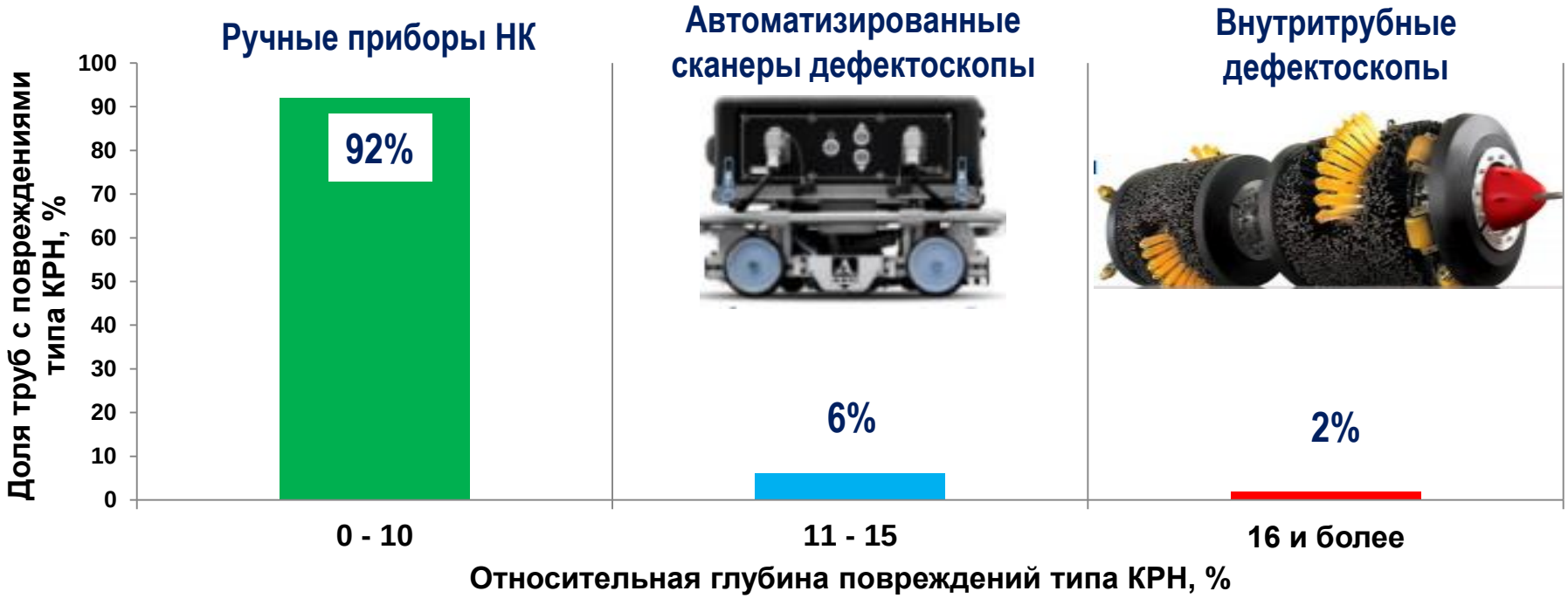




КРН глубиной 24%

Класс опасности источника АЭ*	Описание области	Макс. глубина повреждений, %
II	Дефекты КРН в зоне ПСШ	до 24
III	Язвенная коррозия	до 0,6
III	Язвенная коррозия	до 6
II	Дефекты КРН в зоне ПСШ	до 8
II	Дефекты КРН	до 27
III	Дефекты КРН	до 8
II	Дефекты КРН	до 0,4

Актуальность работ



Стресс-коррозионные повреждения глубиной менее **30%** от толщины стенки трубы никогда не становились причиной разрушения МГ, на их долю приходится до **99%** от всех выявленных при ремонте МГ повреждений КРН труб

Матрица «параметр – стадия» для труб ХТЗ/Mannesmann

Параметр/Стадия	Стадия «0». Инкубационный период	Стадия «1». Образование, начальный рост и стабилизация трещин	Стадия «2». Развитие единичной трещины	Стадия «3». Развитие магистральной трещины	Стадия «4». Разрушение
Долговечность защитного покрытия	значительное влияние				
Макросвойства и механические характеристики стали	не влияет				
Плотность и состав неметаллических включений		незначительное влияние			
Химический состав грунтового электролита					
Скорость внедрения водорода в металл				! значительное влияние в спец. условиях	
Аспектное отношение локального концентратора напряжений					
Уровень остаточных напряжений на поверхности и по толщине стенки трубы					
Параметры текстурной неоднородности					
Отношение глубины к длине единичной трещины					
Плотность трещин в колонии		? треб. доп. исследования		? треб. доп. исследования	
Величина статической нагрузки в газопроводе					
Параметры переменной нагрузки в газопроводе					