



**Влияние циклической нагрузки на
развитие ранее образованных
коррозионно-механических трещин
в малоуглеродистой стали**

X70

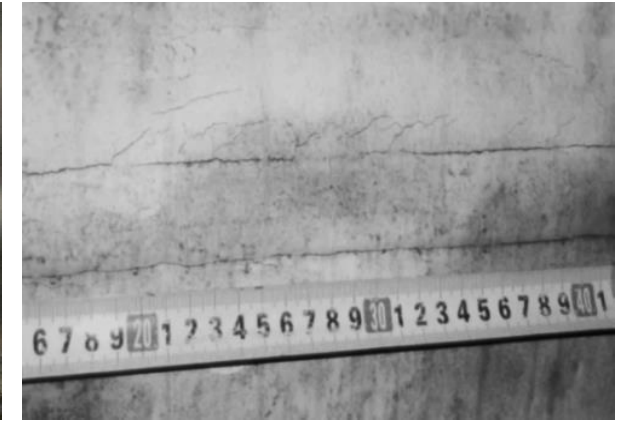
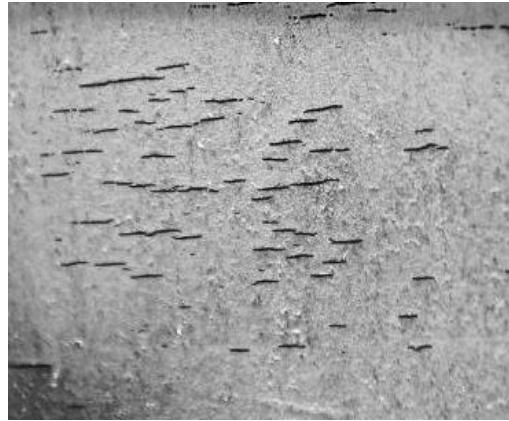
Докладчик : Жедулов Сергей Александрович

Должность: младший научный сотрудник

Проблематика



Проблема коррозионного растрескивания под напряжением (в англоязычной литературе «*stress corrosion cracking*») является актуальной для широкого спектра конструкционных материалов, эксплуатируемых в условиях воздействия растягивающих напряжений и коррозионно-активной среды.

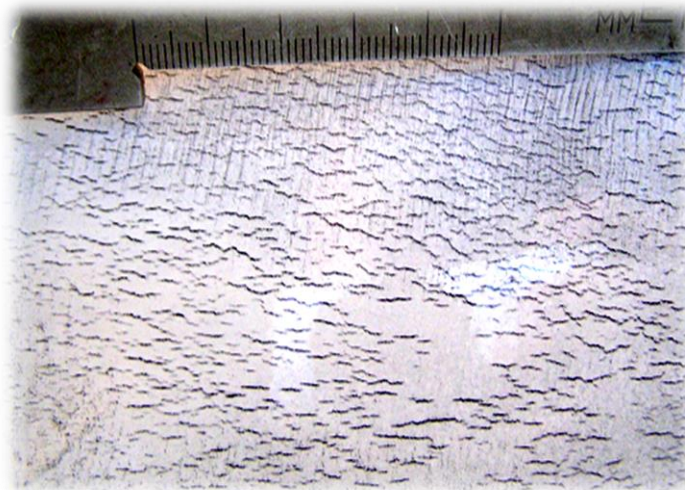


Дефекты КРН на магистральных газопроводах

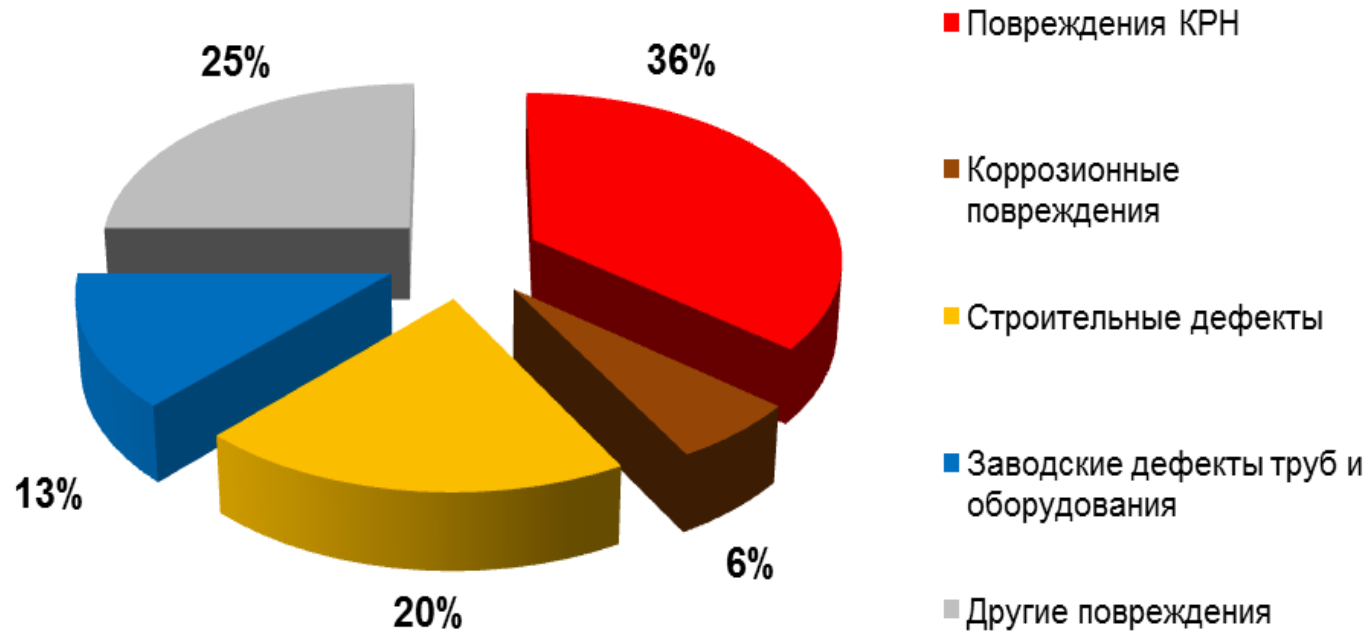
КРН в газотранспортной отрасли

Газотранспортная система ПАО «Газпром»

- более 170 000 км магистральных газопроводов
- 80 % магистральных газопроводов подвержены КРН в 11 газотранспортных обществах ПАО «Газпром»



КРН в газотранспортной отрасли



Дефекты КРН на магистральных газопроводах



36% аварий по причине КРН

Цель работы – оценка кинетики развития ранее образованных коррозионно-механических трещин в малоуглеродистой стали класса прочности X70 при различных режимах циклической нагрузки в отсутствии коррозионной среды.

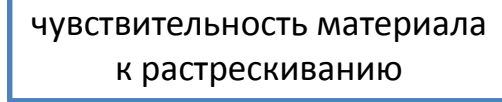
Задачи исследования:

- разработать и изготовить приспособление для испытаний стальных образцов в лабораторных условиях на машине Instron с максимальной нагрузкой 100кН;
- определить условия циклического нагружения, при которых происходит страгивание (начало роста) ранее образованных трещин КРН в малоуглеродистой стали X70, а также оценить скорость их дальнейшего развития при выбранных режимах нагрузки;
- выполнить оценку времени до образования и скорости роста вновь зародившихся трещин из искусственно нанесенных концентраторов напряжений (пропилов) различной глубины на поверхности стальных образцов при циклической нагрузке;
- определить морфологические особенности развития трещин до и после циклических испытаний с учетом микроструктурных и текстурных особенностей малоуглеродистой стали X70.

Процесс КРН



КРН



Основные стадии роста стресс-коррозионных повреждений на поверхности стальных труб



I - Образование микротрещин из локальных поверхностных дефектов труб

II - Монотонный рост отдельных ориентированных трещин в колонии

III - Слияние отдельных трещин в колонии, образование и рост магистральной трещины

IV - Разрушение аварийной трещины (излом)

Скорость роста трещины на стадии III:

$$V = C \cdot (\Delta K)^m$$

, где C и m – эмпирические коэффициенты, которые в том числе зависят от свойств материала.

Испытательное оборудование

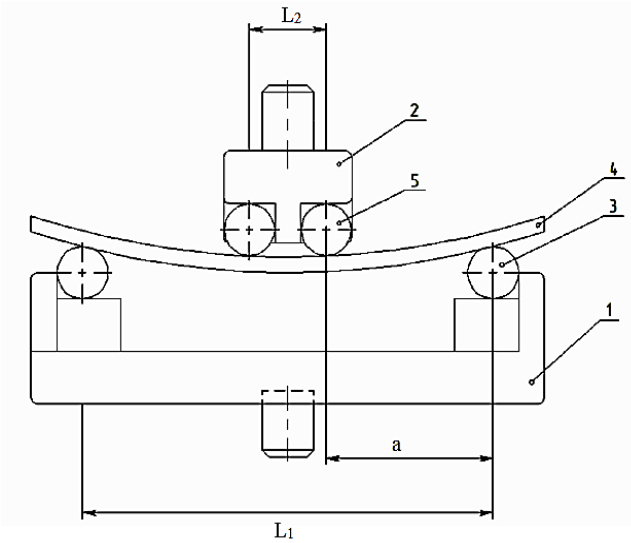
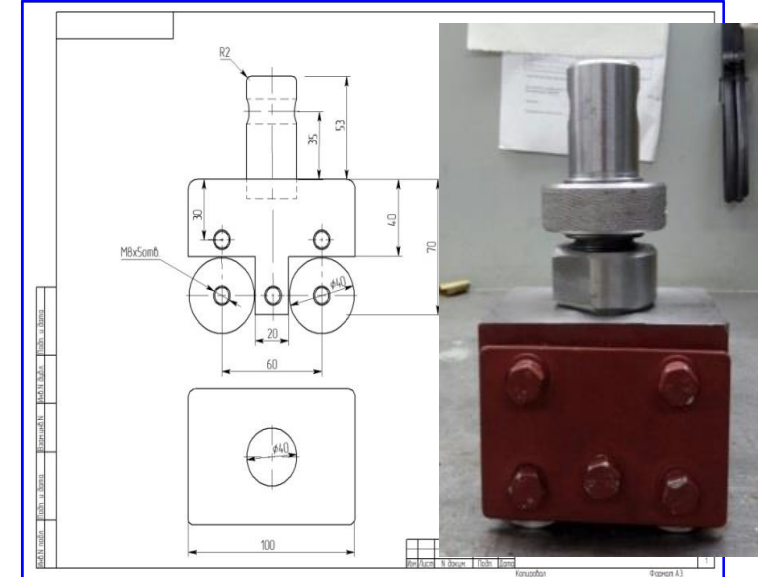
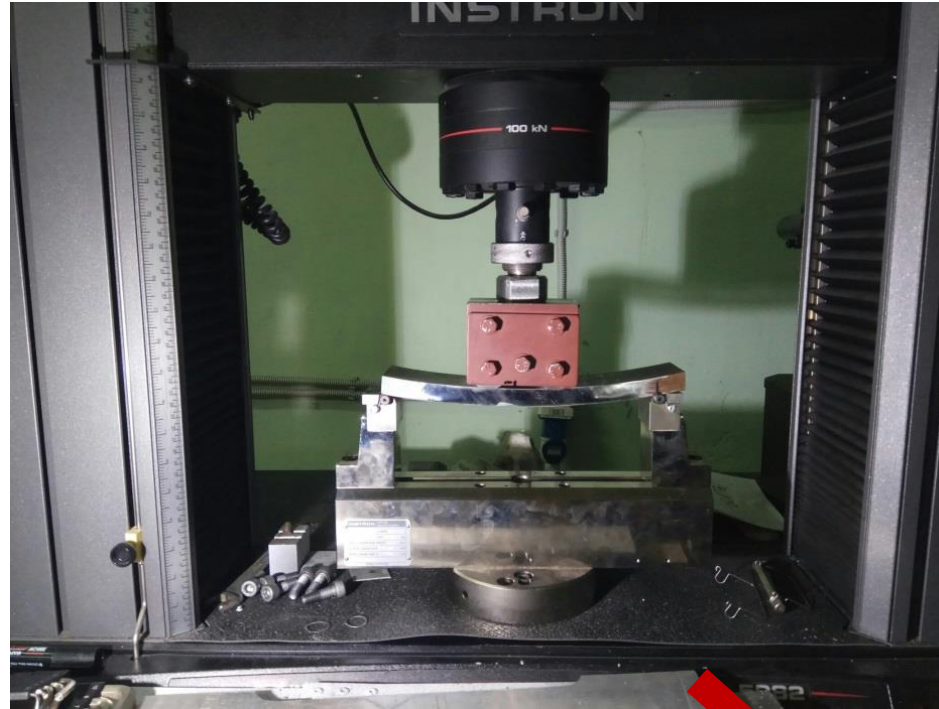


Схема нагружения образца

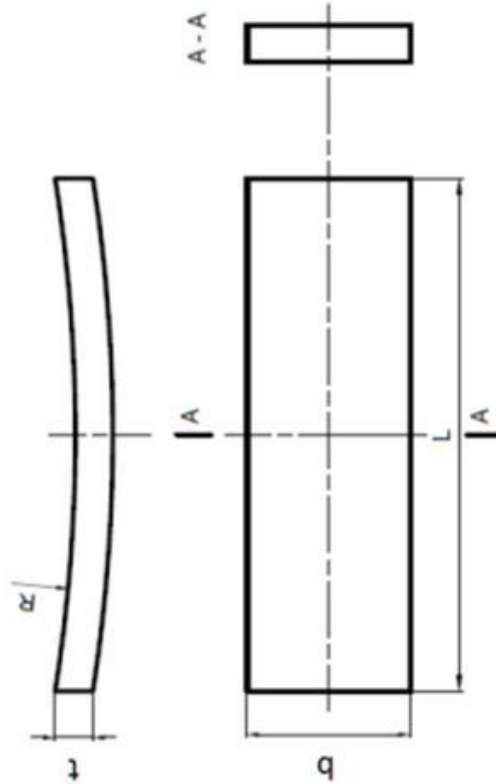


Разработанное приспособление
Контроль за развитием трещин в процессе испытаний

Механические испытания модельных образцов осуществлялись на испытательной машине Instron 3382 с максимальной нагрузкой – 100кН.



Модельные образцы



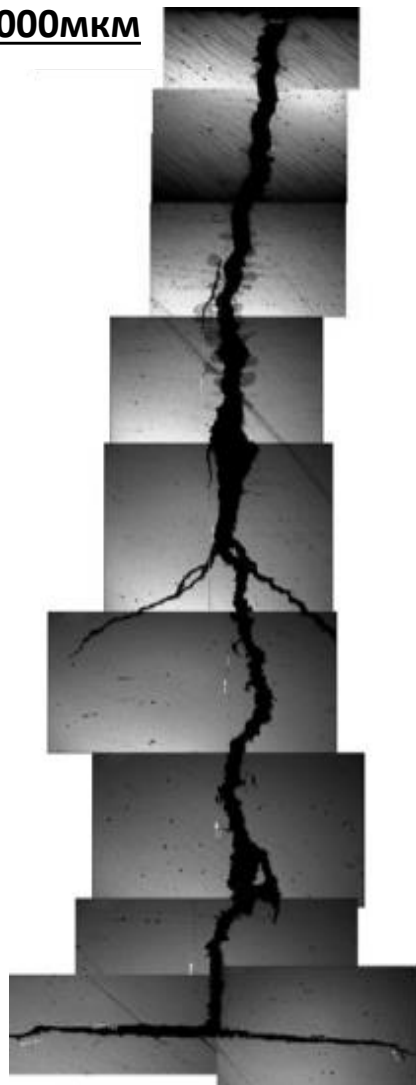
Геометрия модельного образца после технологических обработок

№ Образца	Характеристика дефекта	Д x Ш x Г, мм	Параметры образца	Примечание
1a	Естественная трещина	11,6x0,19x8,27	305x62x16,5	Левая ветвь трещины
1б		11,6x0,19x7,71		Правая ветвь трещины
2	Естественная трещина	12,7x0,07x5,64	332x65x16,6	
3	Искусственный пропил	25,4x0,7x4,95	326x58,5x16,5	
4	Искусственный пропил	26x0,7x6,6	331x62x16,5	
5	Искусственный пропил	25,6x0,7x8,2	330x66x16,5	
6	Дефектов не обнаружено		328x64x16,5	Тарировочный образец
7	Естественная трещина	6,17 мм	331x65x16,5	Образец без испытаний
		6,64 мм		

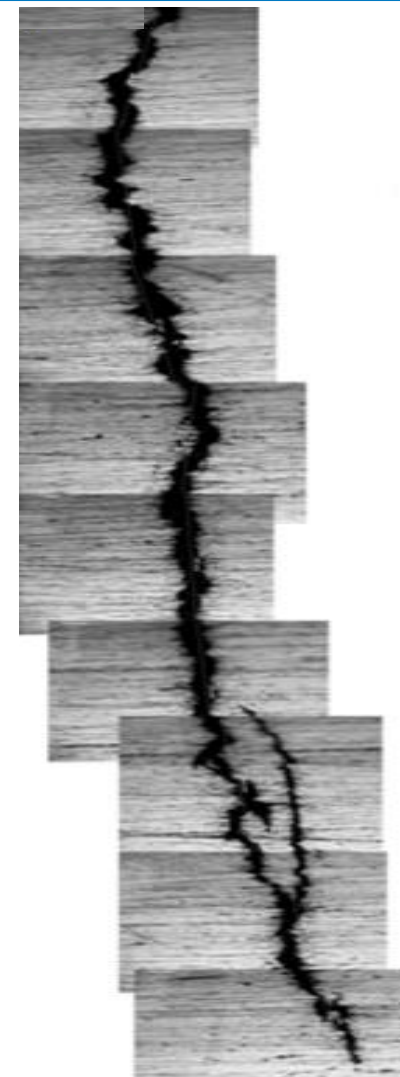
Материалом для изготовления образцов служили темплеты, вырезанные из трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 16,5 мм, изготовленной из стали класса прочности X70 производства Mannesmann (ТУ 56-72/73), после 33 лет эксплуатации в составе МГ.

Трещины КРН в модельных образцах

1000мкм



300мкм

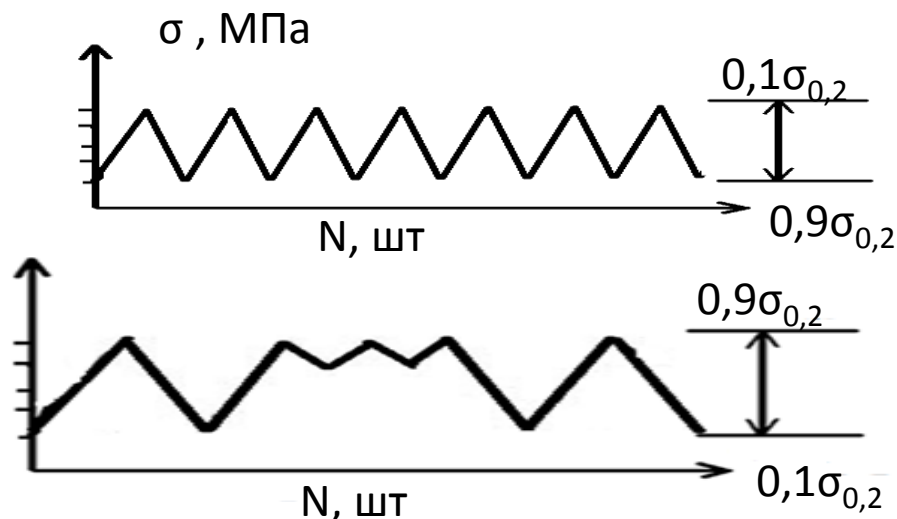


Дефекты КРН рост, которых
наблюдался под микроскопом,
при циклических испытаниях
модельных образцов труб
подземных магистральных
газопроводов из стали класса
прочности

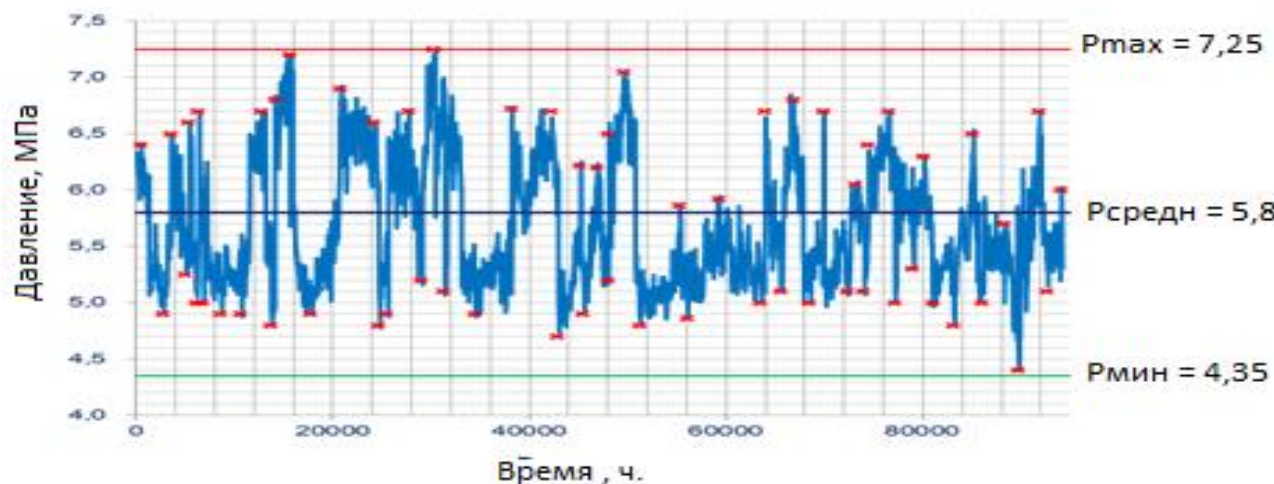
X70

производства **Manesman**,
ТУ 56-72/73 .

Методика циклических испытаний образцов



Режимы эксплуатации реального МГ за 10 лет



Циклические нагрузки с постоянной амплитудой:

44МПа – 396МПа - 1000 циклов

Циклические нагрузки с переменной амплитудой:

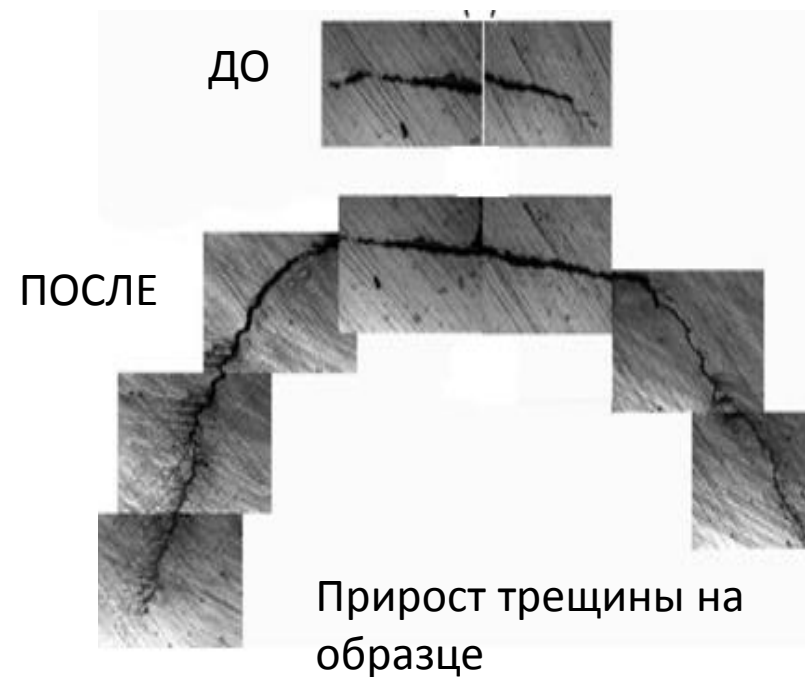
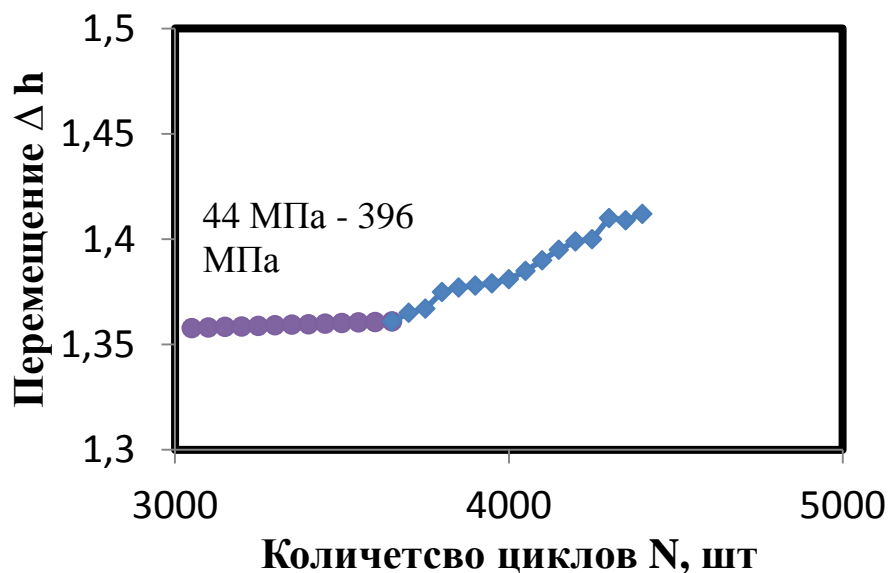
44МПа – 396МПа - 10 циклов

308МПа – 396МПа - 1000 циклов

- ❖ Выбор режима нагружения сделан на основе расчетов ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и моделирует наработку заданного количества циклов за 20 лет эксплуатации МГ.
- ❖ В случае отсутствия прироста трещин (или образования трещин из пропила), следует поднять максимальную амплитуду циклов на $0,1 \sigma_{0,2}$.

Зависимость перемещения захватов от числа циклов в процессе испытаний до начала развития трещин

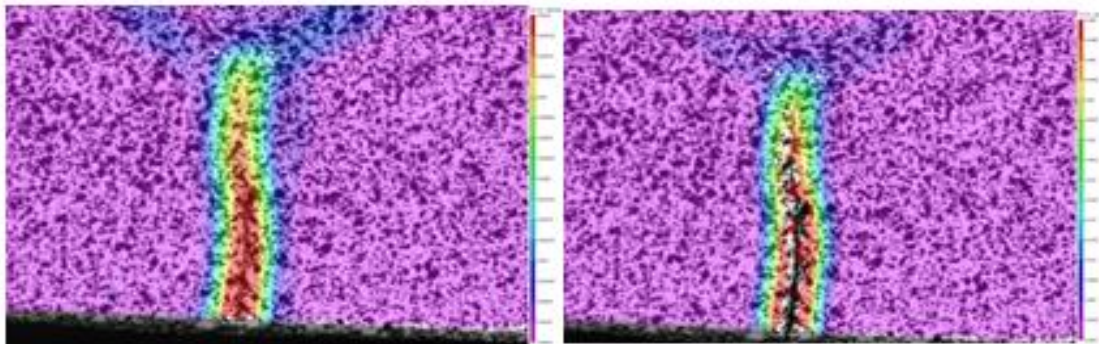
На основе полученных данных по перемещениям нагружающих траверс построены графики, на которых отчетливо видно начало роста трещины. Этому участку соответствует плавное изменение относительного перемещения захватов образца.



Данные зависимости получены для всех модельных образцов с естественными и искусственными дефектами.

Наблюдения на ВИК

По оси X в образце присутствовали значительные напряжения. Данный факт подтверждает двухосное напряженно-деформированное состояние образца, подобное тому в котором находится реальный материал в составе МГ при эксплуатации.

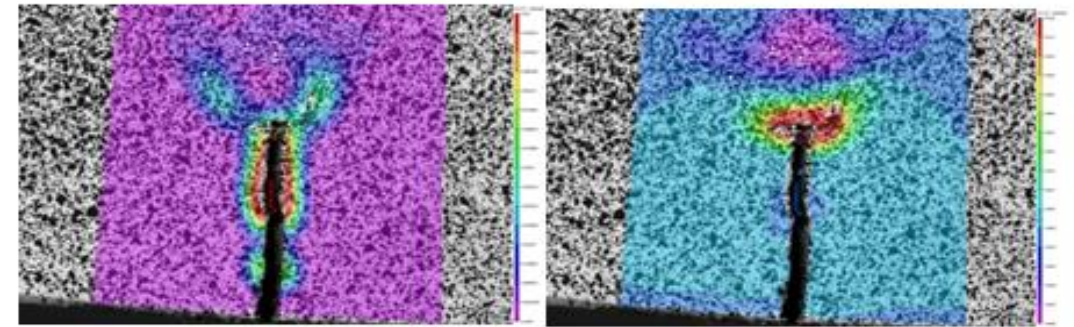


(a)

(б)

а - 1кН, б - 19.7 кН

Деформация по X после 1000 циклов с различной нагрузкой

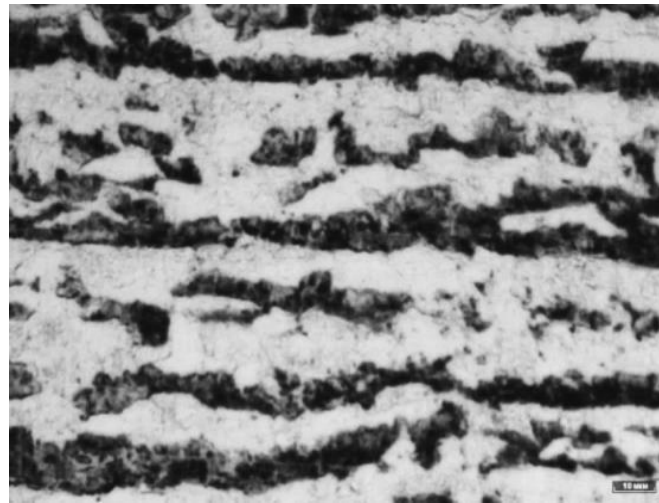
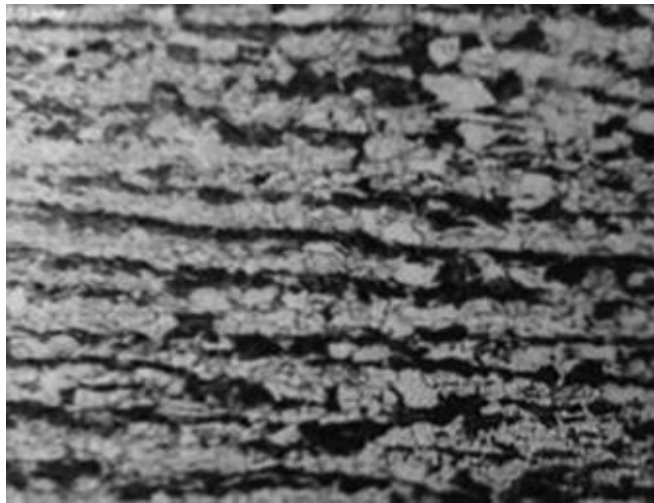


(a)

(б)

а – по оси X, б – по оси Y

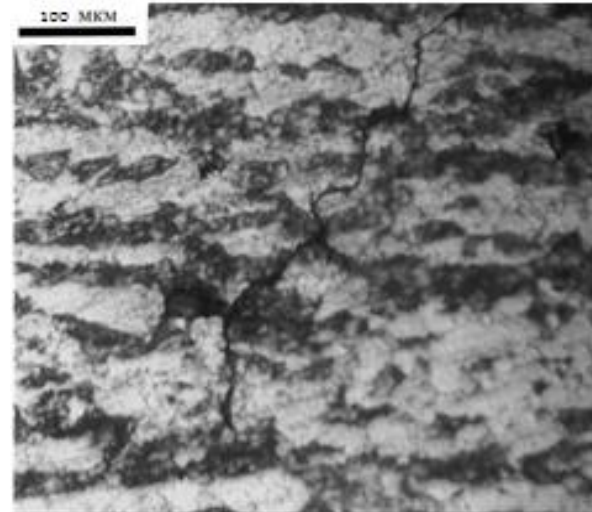
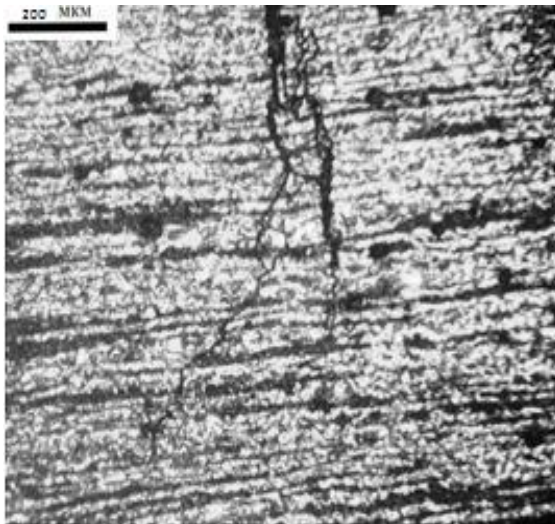
3420 циклов с нагрузкой 22,7кН по различным осям деформации



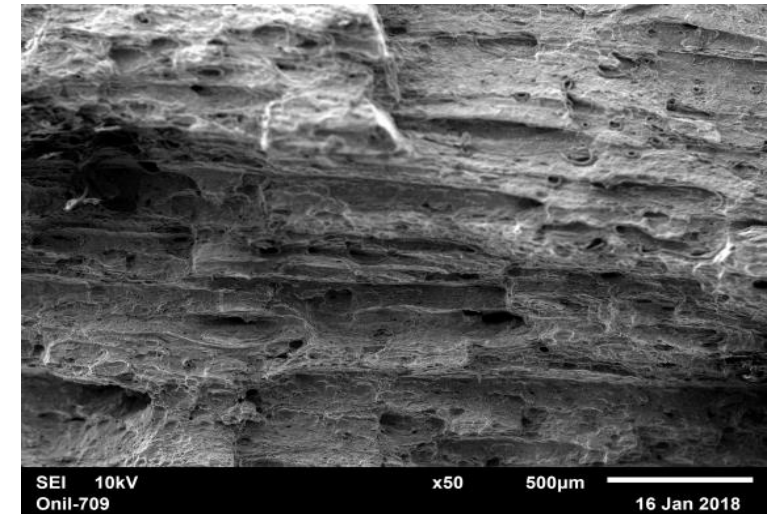
Микроструктура без дефектной области образца



Излом образца №1



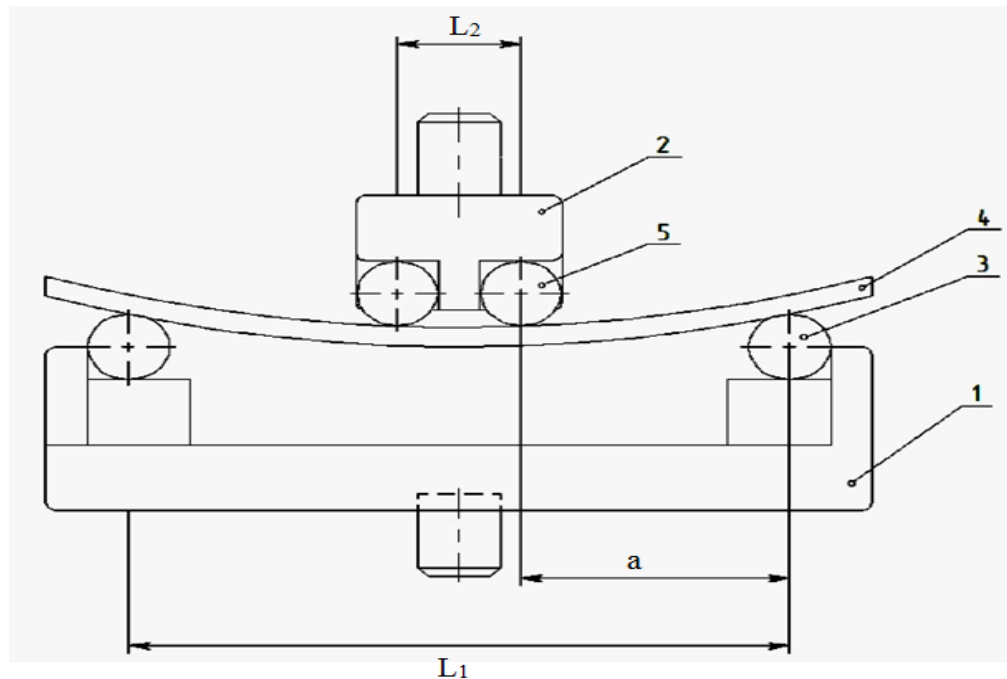
Микроструктуры образца с естественной трещиной КРН, травленный шлиф: а – общий вид, б – вершина отростка



Фотография РЭМ разлома образца №1

ВЫВОДЫ

1. Разработано и изготовлено приспособление для проведения циклических испытаний стальных образцов по методу 4-х точечного изгиба на разрывной машине мощностью до 100 кН. Чертежи основных элементов приспособления выполнены с помощью системы автоматизированного проектирования T-Flex CAD.

Общий вид приспособления для испытания модельных образцов 4-точечного изгиба:

- 1 — нижняя опора;
- 2 — верхняя опора;
- 3 — нижние опорные ролики;
- 4 — образец;
- 5 — верхние опорные ролики,

a — расстояние от опоры до точки приложения усилия,

$L1$ — параметр нижней опоры,
 $L2$ — параметр верхней опоры
 $a = 130\text{мм}$ $L1 = 320\text{мм}$, $L2 = 60\text{мм}$, ширина приспособления $B = 70\text{мм}$

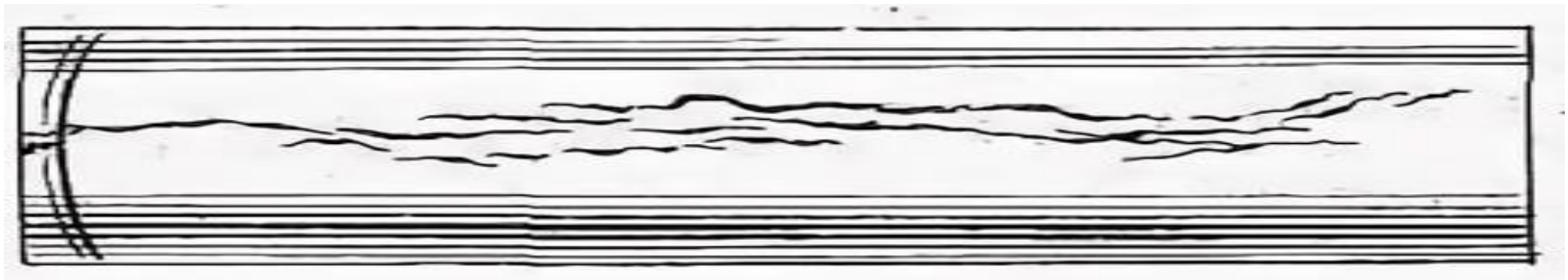
ВЫВОДЫ

2. Установлено, что с увеличением глубины дефектов в модельных образцах уменьшается максимальное напряжение в цикле, при котором происходит стагивание естественной трещины КРН или зарождение трещины из искусственного пропила.

Образование трещин из пропила глубиной 40% и 50% от толщины стенки трубы зафиксировано после 3500 циклов и 3100 циклов, соответственно при максимальном уровне напряжения в цикле в 1,2 - 1,5 раз превышающем эксплуатационные нагрузки МГ.



3. Средняя скорость роста естественной трещины КРН глубиной 8,27 мм (50% от толщины стенки трубы) в 10 раз выше, средней скорости роста трещины глубиной 5,65 мм (40% от толщины стенки трубы) в образце №2. Таким образом, с учетом эксплуатации МГ в течение 20 лет прирост для трещин в образце №1 и №2 будет равен 3,5 мм и 3,7 мм соответственно.



4. Значительной разницы в микроструктуре дефектных и бездефектных участков не обнаружено. Морфология естественных трещин КРН до и после испытаний имела тенденцию к ветвлению и огибанию структурных препятствий. Трещины, развивающиеся из пропилов, имели прямолинейный характер распространения без существенного ветвления.

5. Установлены основные морфологические признаки усталостного развития естественных трещин КРН после циклических испытаний образцов в лабораторных условиях. В частности, на поверхности излома стали присутствуют сдвиговые ступенки, микроусталостные полосы на границах зерен, а также материал имеет ячеистую структуру.

THANK YOU FOR ATTENTION!

Докладчик :

Должность : младший научный сотрудник