

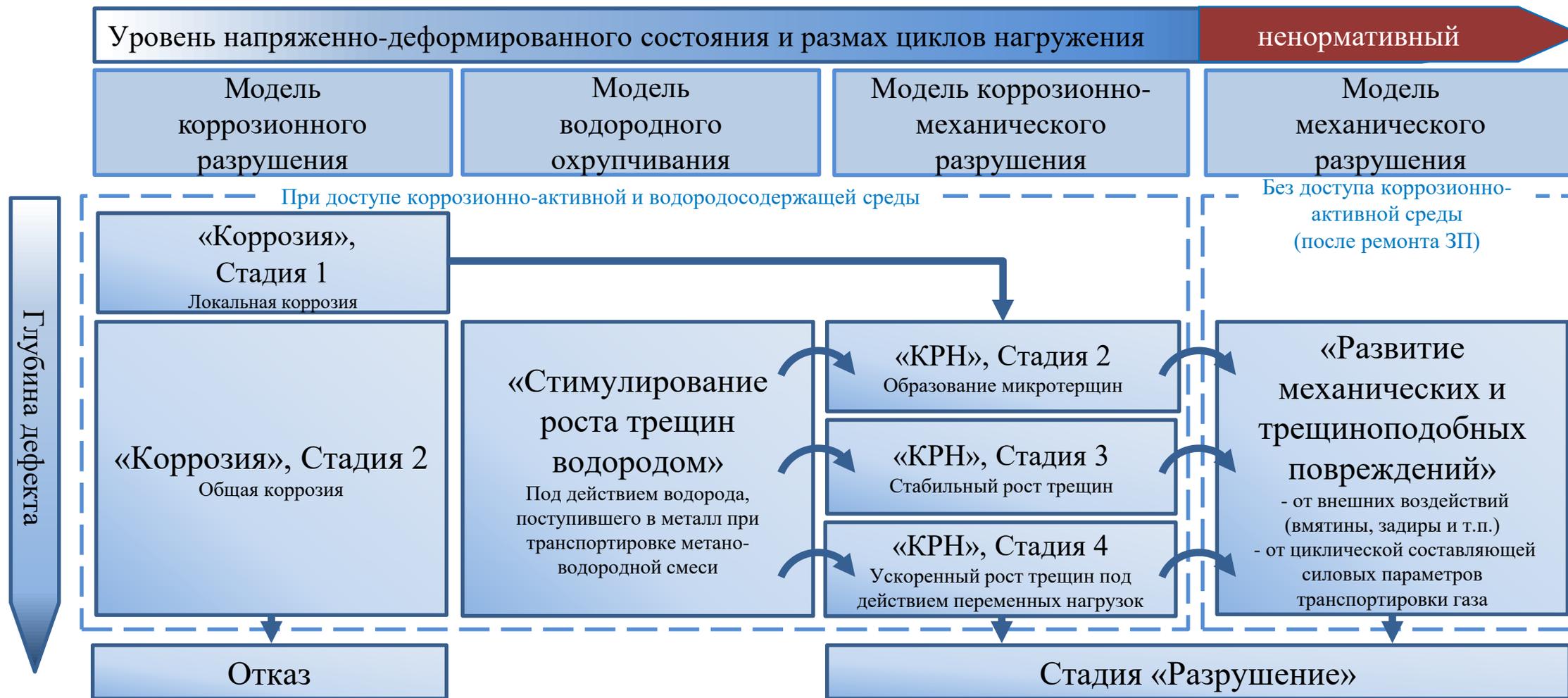
Исследование влияния различных концентраций водорода на развитие эксплуатационных дефектов труб длительно эксплуатируемых газопроводов

Кашковский Р.В.

КНТЦ управления техническим состоянием и целостностью производственных объектов
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»



Взаимосвязь моделей разрушения труб МГ



Программа создания корпоративного экспериментального комплекса для оценки работоспособности труб МГ с дефектами КРН и эффективности ремонтных технологий, утв. 07.12.2021 заместителем Председателя Правления ПАО «Газпром» - начальником Департамента 623 О.Е. Аксютиним.

Методы наводороживания стали

- катодная поляризация
- газофазное насыщение в автоклаве

Методы нагружения образцов

- статическое нагружение
- циклическое нагружение

Методы имитации дефектов

- питтинг (засверловка)
- усталостная трещина

Методы оценки скорости внедрения атомарного водорода в металл и концентраций водорода

- метод электрохимической десорбции
- метод послыонного анодного растворения



Фрагменты труб МГ

Ø 1420, толщина стенки 15,7 мм

МГ «СРТО- Урал»,

Эксп. организация ООО «Газпром трансгаз Югорск»

Изготовлены по ТУ 40/48/56-79-НС

Категория прочности Х70

Предел прочности - не менее 588 МПа

Предел текучести - не менее 461 МПа

Относительное удлинение - не менее 20%.

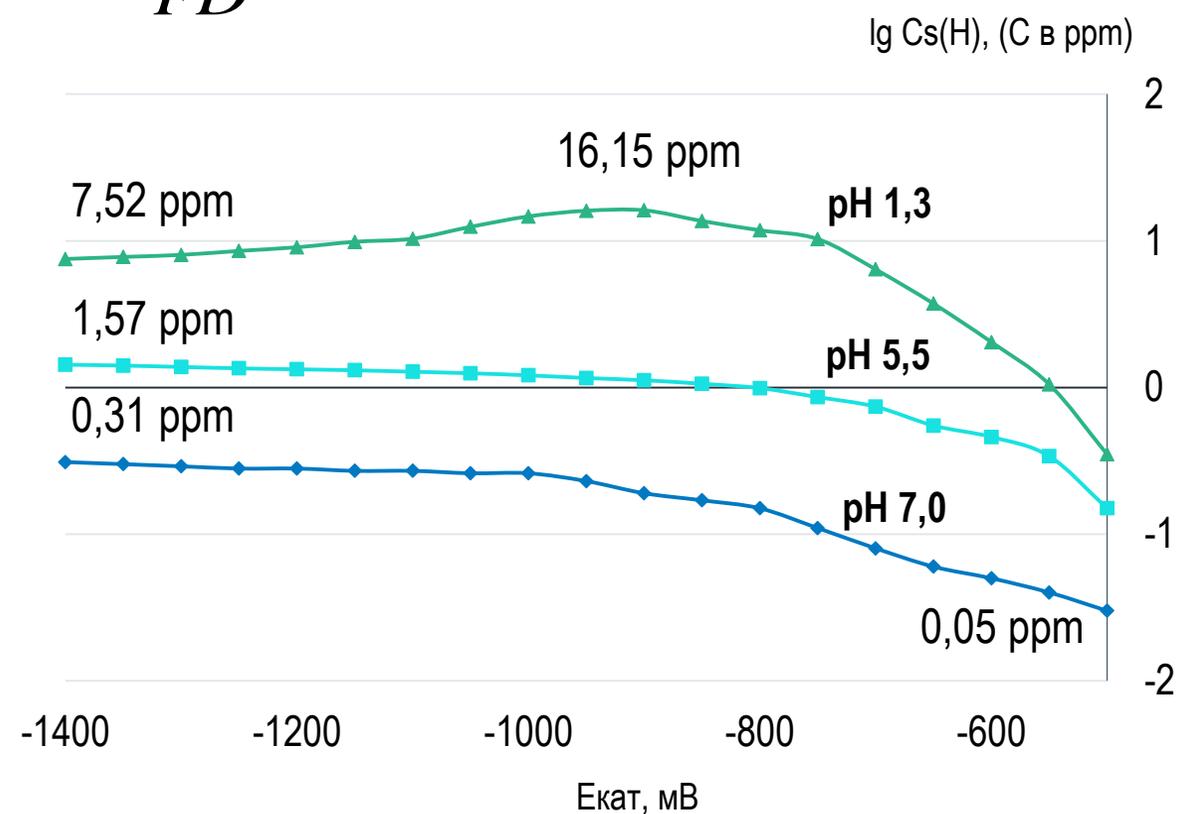
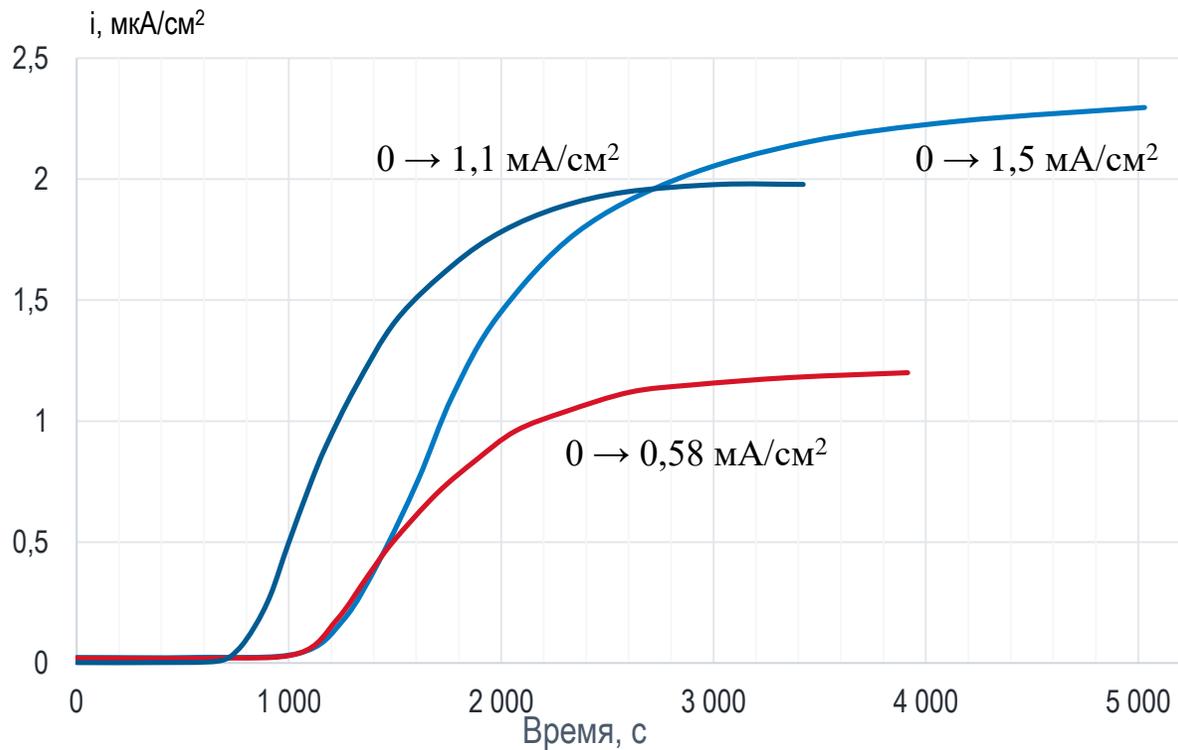


Химический состав стали

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Nb	V	Ti	Al	Mo	Co
0,071	0,224	1,212	0,007	0,018	0,179	0,017	0,006	0,039	0,004	0,0005	0,015	0,013	0,007

Оценка содержания водорода в трубной стали X70

Приповерхностная концентрация $C_s = \frac{i_\infty L}{FD}$



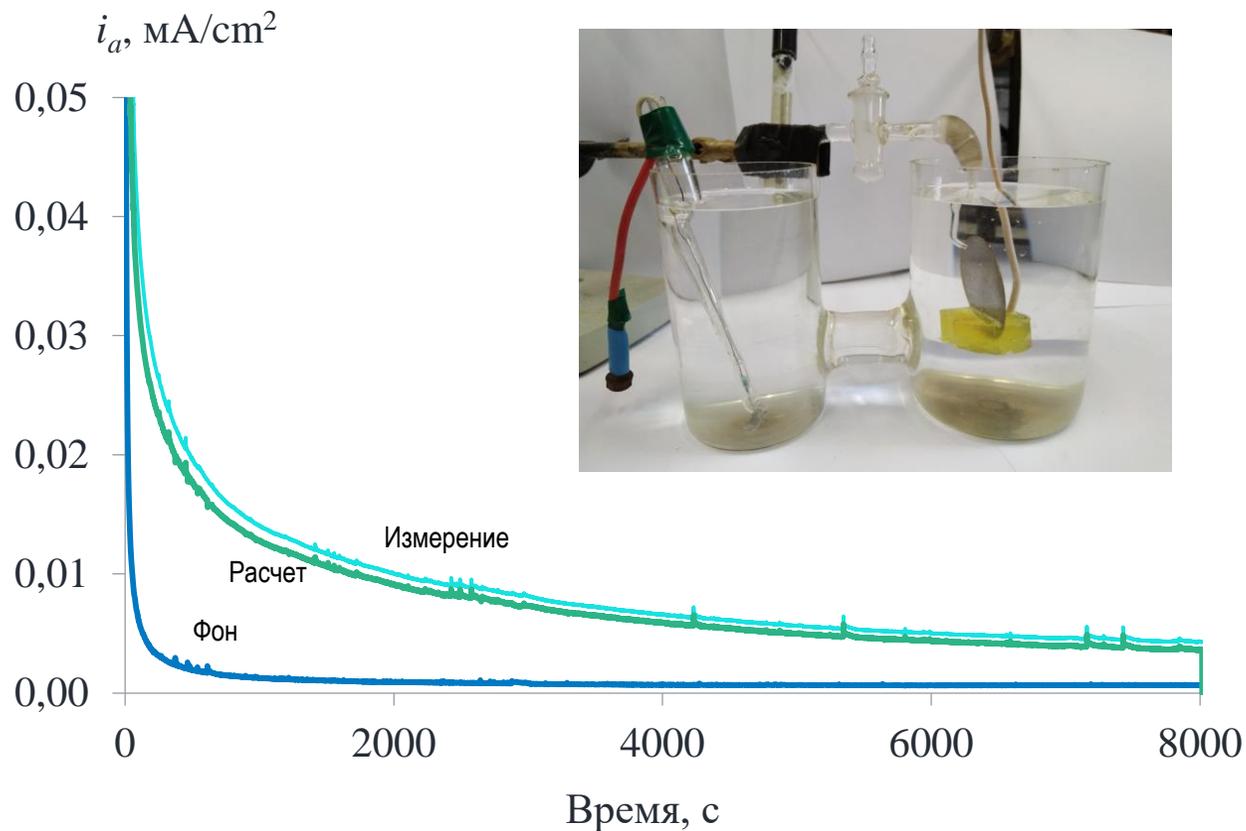
$D = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ при рН 1,3 $D = 5,36 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ при рН 7

Bokris J.O.M. etc. Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Traps // Journal of The Electrochemical Society. 1971. Vol. 118(7), p. 1114-1119.

Халдеев Г.В., Борисова Т.Ф. Водородпроницаемость металлов и сплавов в коррозионно-электрохимических процессах // Итоги науки и техники. Сер. Электрохимия, 1989, т.30. с. 3-54.

Оценка содержания водорода в трубной стали X70

$$\text{Объемная концентрация } C_v = Q_H / nFV_M = \int I_{a(H)} dt - \int I_{a(\text{фон})} dt / nFV_M$$



Потенциал, мВ (хсэ)	Время наводороживания, мин	Q_H , Кл	C_v , ppm (масс)
-1000	30	0,193	0,19
	60	0,222	0,22
	90	0,236	0,23
-1100	60	0,240	0,24
-1200		0,254	0,25
-1300		0,257	0,25
-1400		0,251	0,25

Белоглазов С.М. Об определении водорода в стали методом анодного растворения // Заводская лаборатория, 1961. Т. 27. С. 1468-1469.

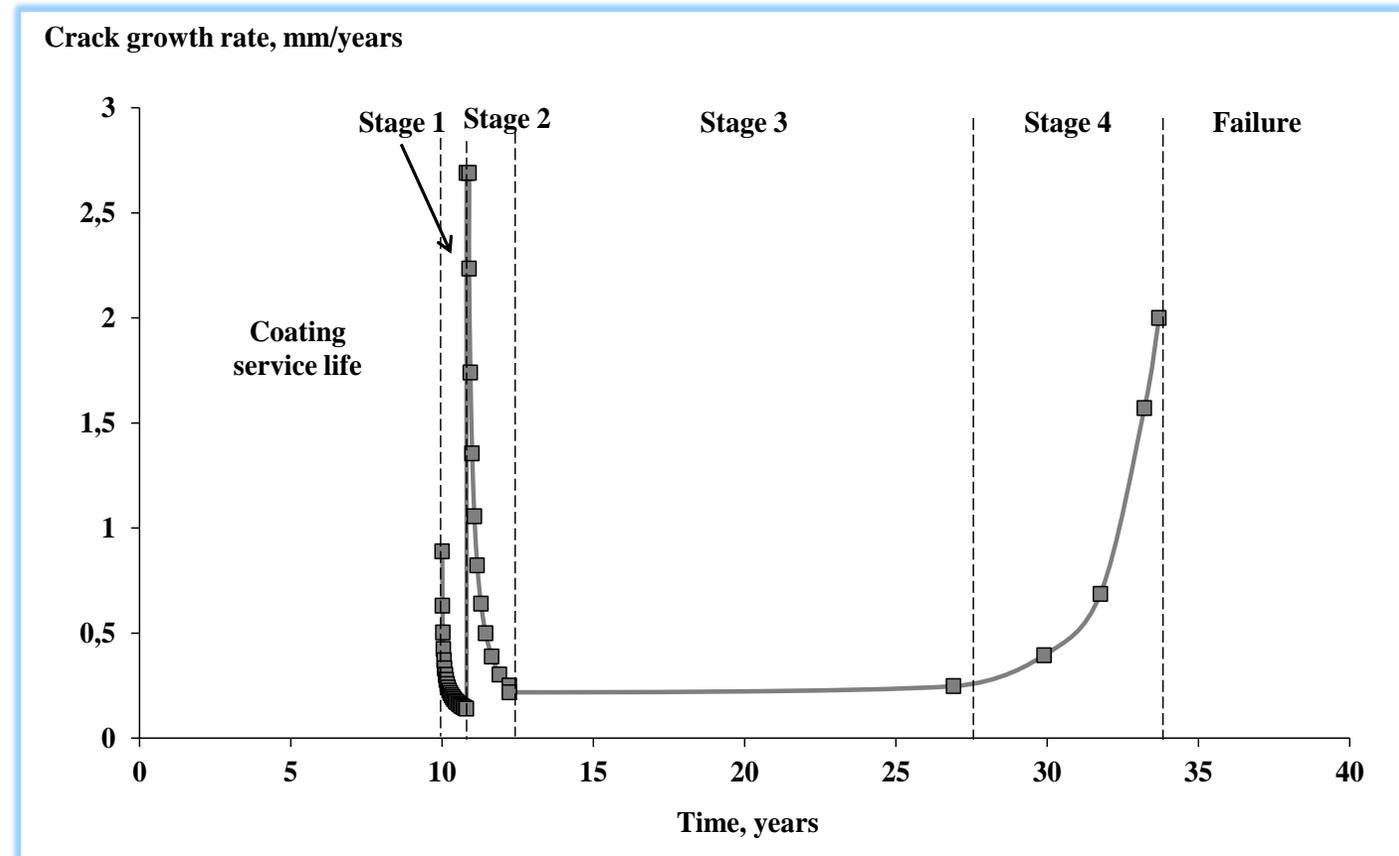
Стадия «1» – Инкубационный период до образования трещин

Стадия «2» – Образование, начальный рост и стабилизация трещин

Стадия «3» – Развитие индивидуальной трещины в колонии

Стадия «4» – Развитие магистральной трещины

Точка Разрушения



Ryakhovskikh I.V. etc. Model of SCC and practical guidelines for pipelines operation // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 121, p. 105134.

Ryakhovskikh I.V. Regularities of the near-neutral pH stress corrosion cracking of gas pipelines // Vesty gasovoy nauki. 2019. №3. p. 43-59.

Статическая нагрузка

Режимы испытаний:

Нагрузка от 0 МПа до $\sigma_{0,2}$

Среда с pH 7,0 и 5,5

в т.ч. + 10 мМ тиомочевины

Поляризация от $E_{корр}$ до -1440 мВ

Содержание водорода от 0,05 до 3,8 ppm

Дефекты \varnothing от 0,1 мм до 1,5 мм

За 60 сут испытаний **не зафиксировано**
образование трещин



Циклическая нагрузка

Режимы испытаний:

Нагрузка от 0 МПа до $\sigma_{0,2}$ с $f = 0,15$ Гц

Остальное – аналогично статике

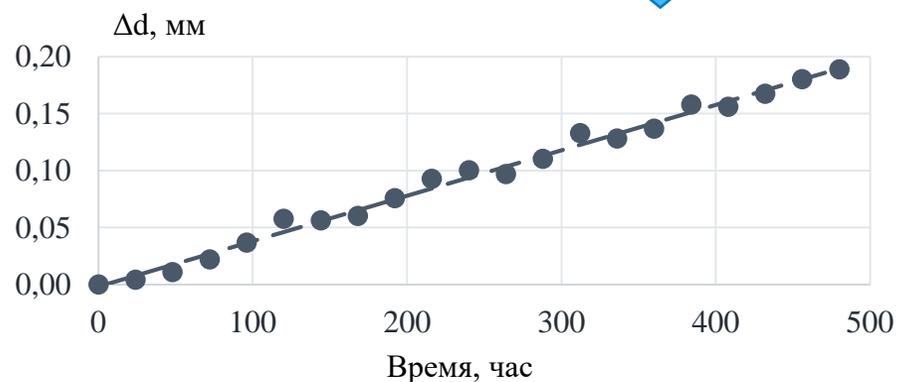
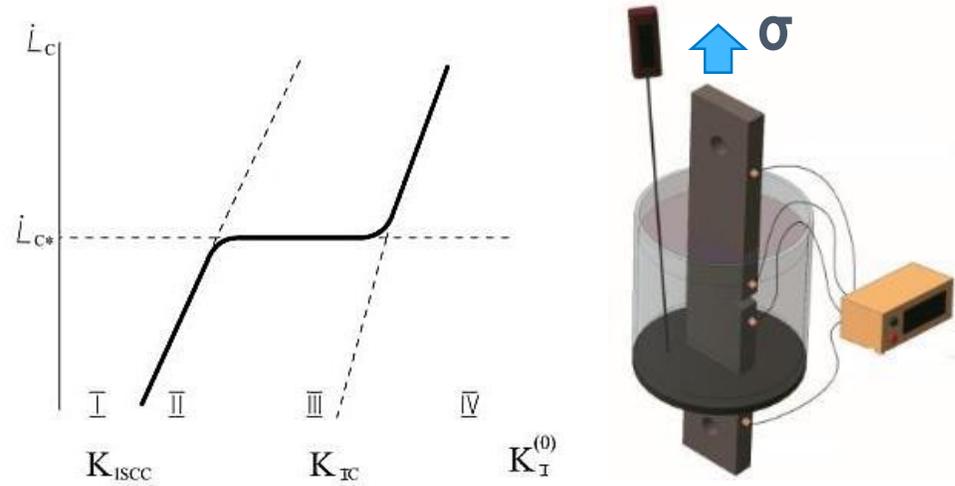


Трещина на воздухе и в большинстве
изученных сред образовывалась на 24 сутки.
В среде с pH 5,5 + ТМ, $E = -1300$ мВ трещина
образовалась на 6 сутки.

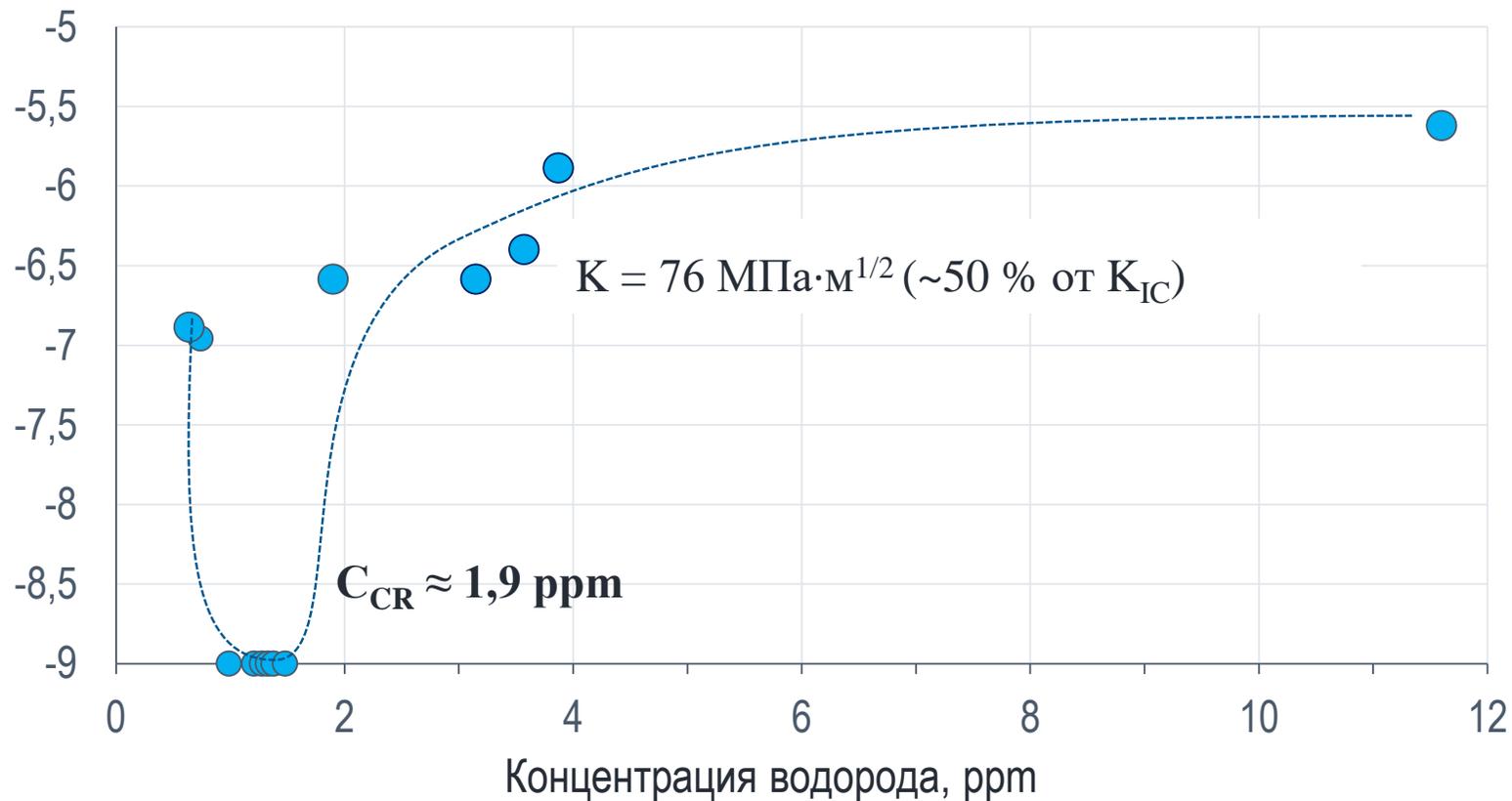
$C_{CR} > 3,8$ ppm

Скорость роста трещин КРН в трубной стали X70

Статическая нагрузка (стадия развития индивидуальной трещины)

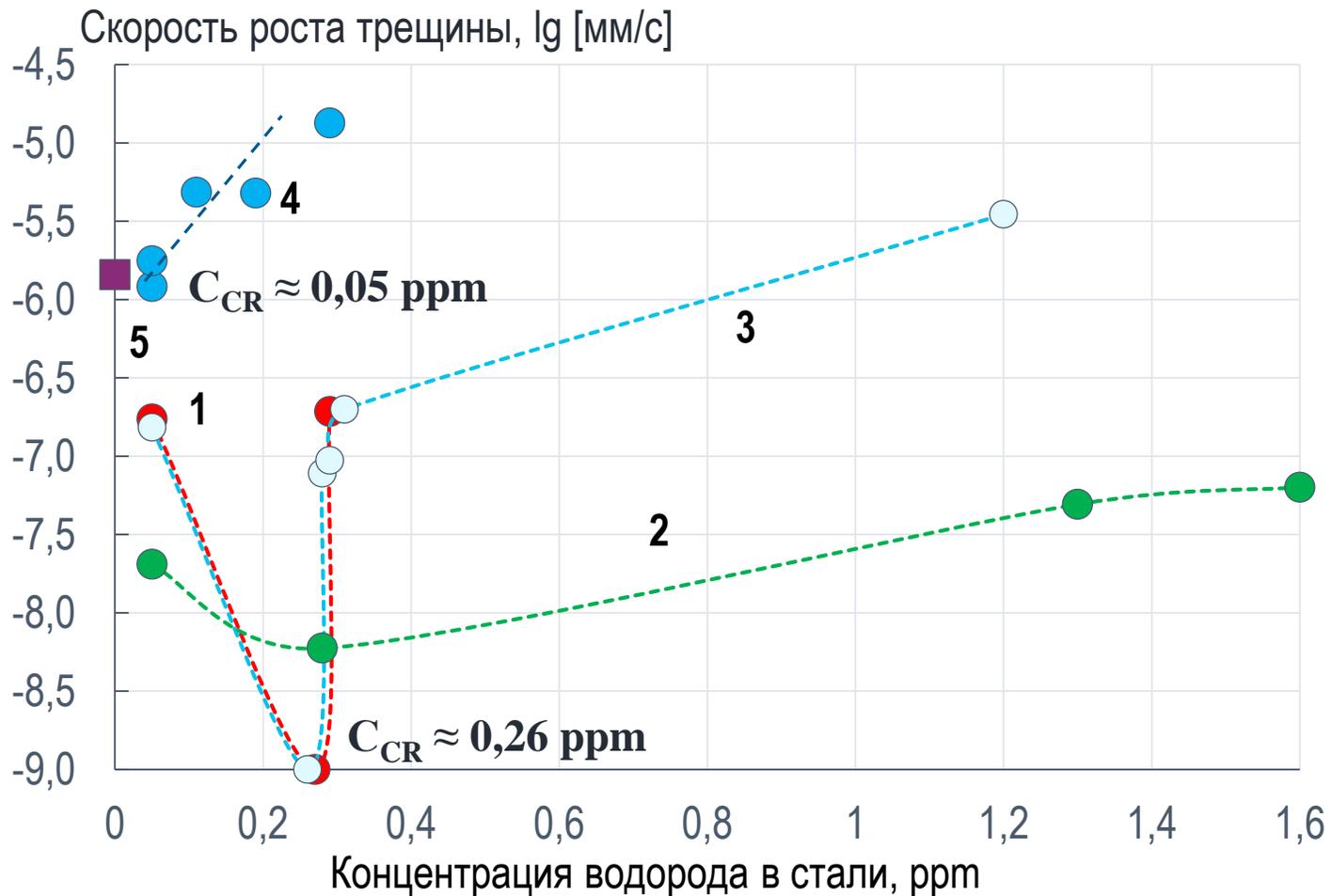


Скорость роста трещины, \lg [мм/с]



Скорость роста трещин КРН в трубной стали X70

Циклическая нагрузка (стадия развития магистральной трещины)



Режимы испытаний

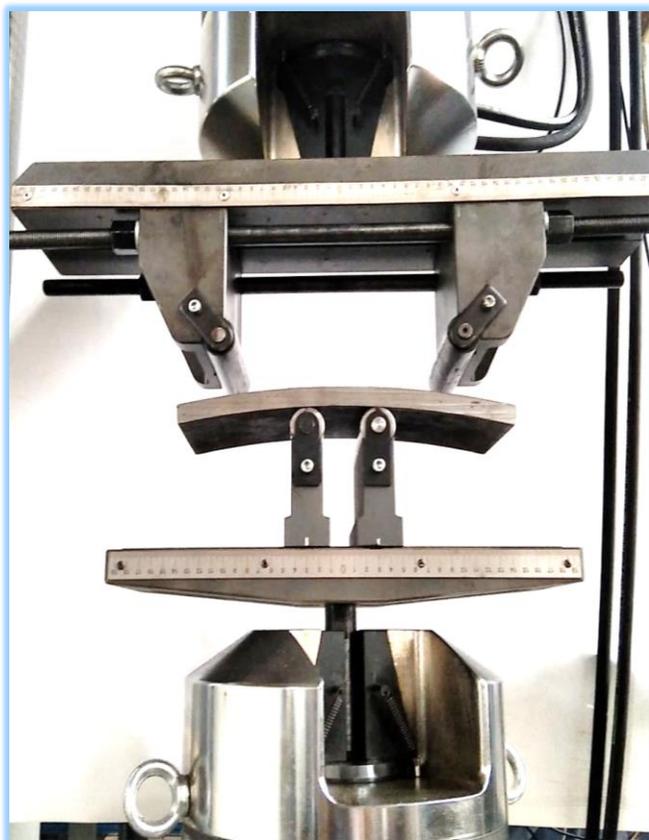
Серия	K_{max} , МПа·м ^{1/2}	ΔK , МПа·м ^{1/2}	f, Гц	$\Delta K^2 \cdot K_{max} / f^{0,1}$
1	31,2	14,6	0,005	$1,13 \cdot 10^4$
2	16,2	8,1		$0,17 \cdot 10^4$
3	32,2	16,1	0,01	$1,33 \cdot 10^4$
4	44,5	21,2		$3,37 \cdot 10^4$
5 (воздух)	86,9	17,4	0,1	$3,31 \cdot 10^4$

Скорость роста трещин КРН в трубной стали X70

Циклическая нагрузка (стадия развития магистральной трещины)



Нанесение надрезов



Выращивание трещины



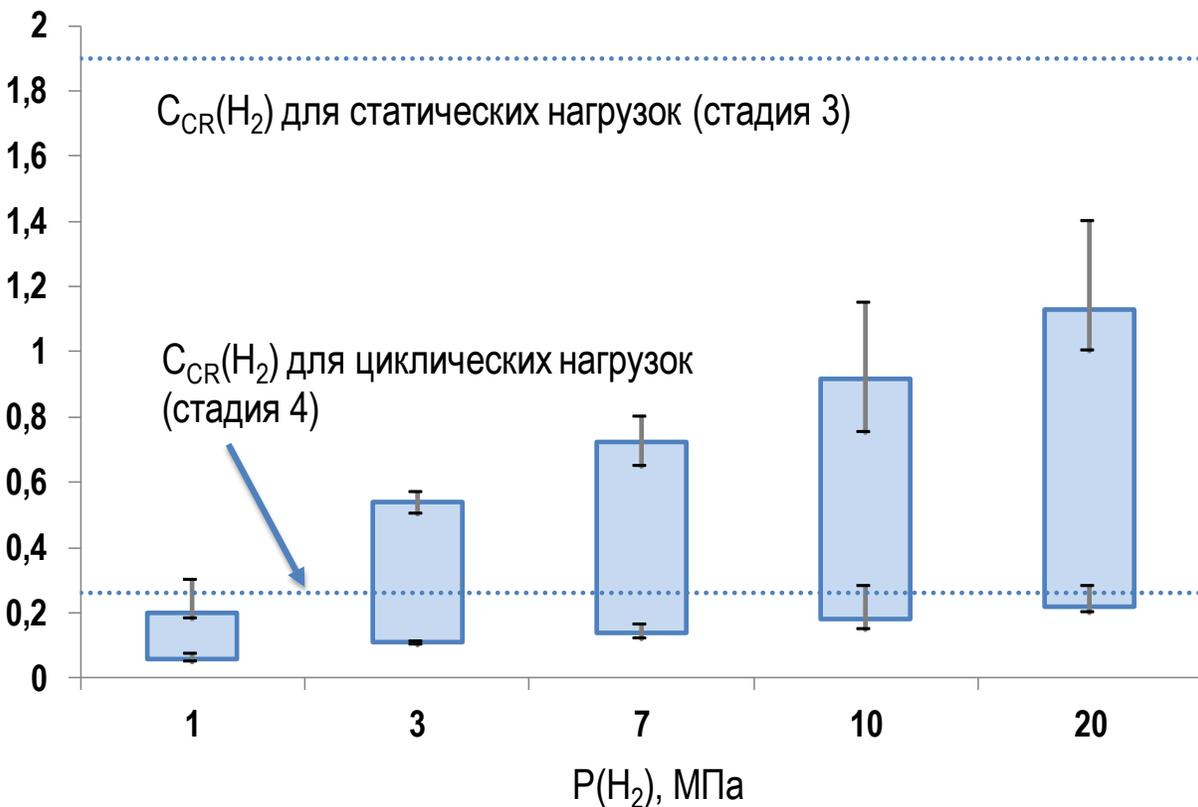
Предварительное
наводороживание
при 5 МПа H_2 72 ч



Поэтапное циклическое
нагружение 0,8...0,9...1,0 от
 σ_T по 10 тыс. циклов

Оценка концентрации водорода в стали X70 в зависимости от $P(H_2)$

$C(H_2)$ в стали, ppm



Отчет о НИР по дог. ДС 8063-623-21-2-РВ от 01.04.2022, этап 2

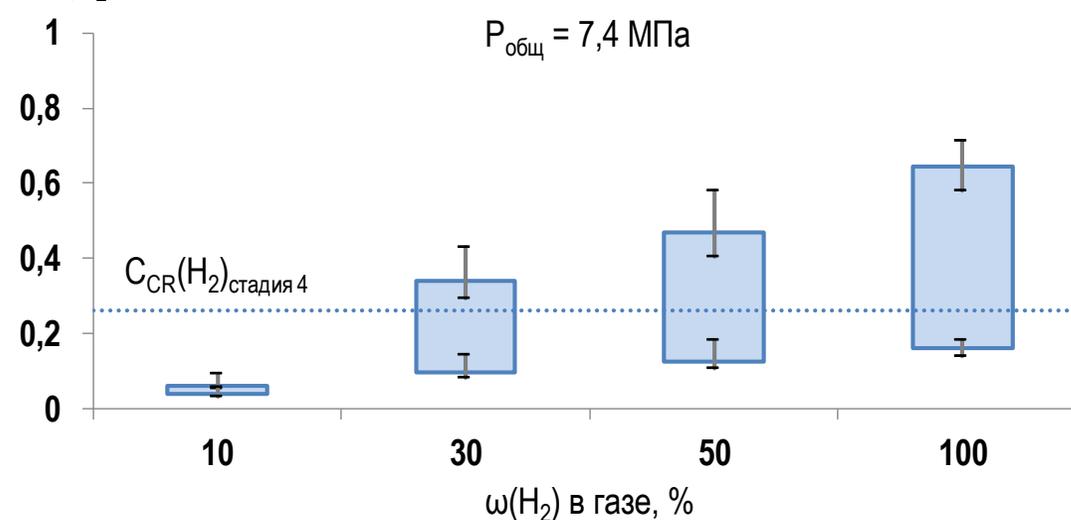
Drexler A. et al // International journal of hydrogen energy. 2022. Vol.47, p. 39639-39653.

Golisch G. at al. // Journal of Pipeline Science and Engineering.2022. Vol. 2, p. 1-6.

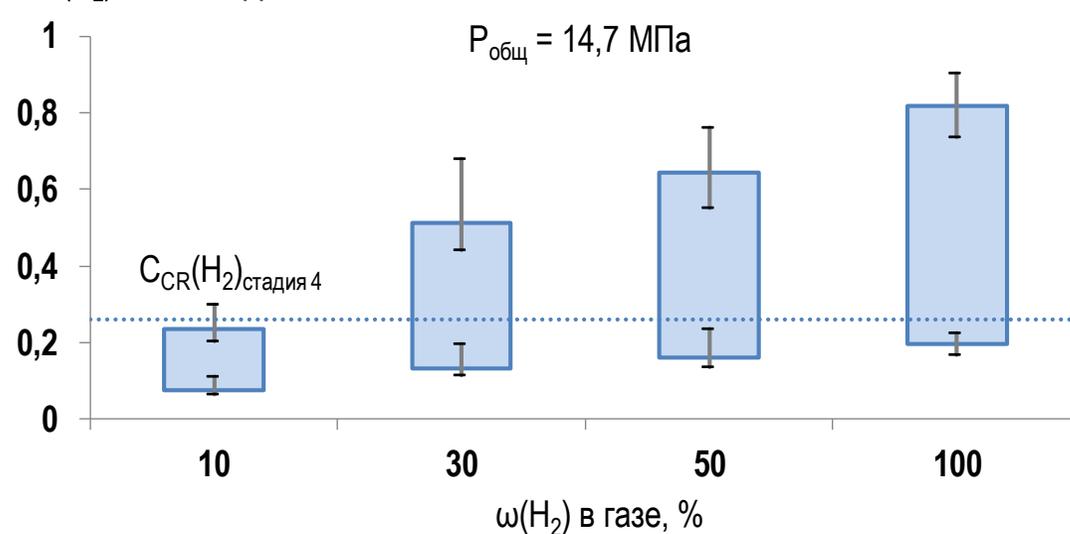
Trautmann A. et al // Materials. 2020. p.13.

Drexler A. et al // International Journal of hydrogen energy. 2022. Vol.47, p. 39639-39653.

$C(H_2)$ в стали, ppm



$C(H_2)$ в стали, ppm



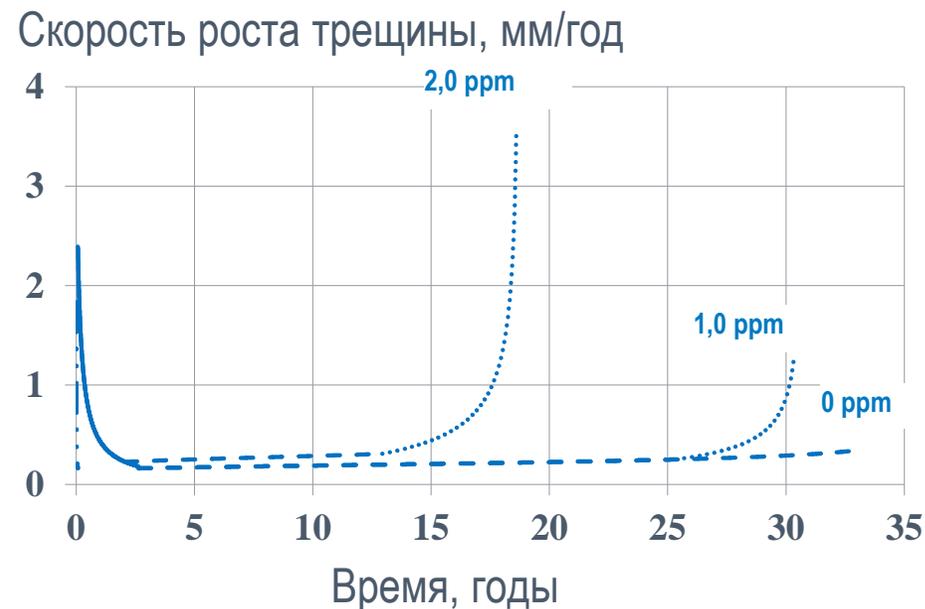
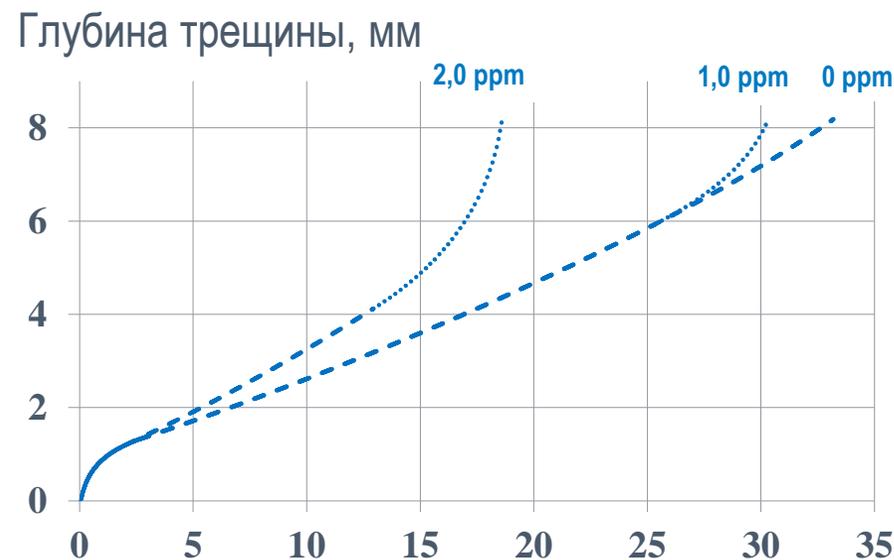
Модель роста трещин КРН на стали X70 в среде водорода

$$\frac{da}{dt} = \begin{cases} V_1 = G_e \cdot (t)^{n-1}, & \text{или } t \leq 24 \text{ дня} \\ V_2 = r \exp\left(-\frac{a}{m}\right) \cdot s, & \text{при } t > 24 \text{ дня и } a < a_{max} \text{ или } V_2 > V_3 \\ V_3 = A_{st} \cdot \left(\frac{C}{C_{cr}^{st}}\right)^{p_{st}} \left[\frac{K_{I,max} - K_{Isc} \left(\frac{C}{C_{cr}^{st}}\right)^{-s_{st}}}{\left(\frac{C}{C_{cr}^{st}}\right)^{-k_{cf}} \cdot K_{IC} - K_{I,i,max}} \right]^{B_{st}}, & \text{при } a \geq a_{max} \text{ или } V_2 \leq V_3 \text{ и } V_3 > V_4 \\ V_4 = A_{cf} \cdot \left(\frac{C}{C_{cr}^{cf}}\right)^{p_{cf}} \cdot \sum_{i=1}^k N_i \cdot f_i^{\gamma} \left[\frac{\left(\Delta K_{I,i}^{\alpha} \cdot K_{I,i,max}^{\beta} - \Delta K_{I,th} \cdot \left(\frac{C}{C_{cr}^{cf}}\right)^{-s_{cf}}\right)}{\left(\frac{C}{C_{cr}^{cf}}\right)^{-k_{cf}} \cdot K_{IC} - K_{I,i,max}} \right]^{B_{cf}}, & \text{при } V_3 \leq V_4 \text{ и } a < a_r \end{cases}$$

Эмпирические коэффициенты, учитывающие влияния водорода на скорость роста трещины КРН зависят от C_{CR} :

$p_{st}, s_{st}, k_{st} = 0$ при $C < C_{cr}^{st}$ (1,9 ppm)

$p_{st}, s_{cf}, k_{cf} = 0$ при $C < C_{cr}^{cf}$ (0,26 ppm)



1. Исследования влияния различных концентраций водорода проведены на образцах трубной стали категории прочности X70, образцы вырезаны из фрагментов трубы МГ Ø 1420 x15,7 мм, на которой ранее были выявлены дефекты КРН.
2. По мере увеличения кислотности среды с рН 7,0 до 1,3 коэффициент диффузии водорода возрастает с $5,36 \cdot 10^{-7}$ $6,3 \cdot 10^{-6}$ см²/с см²/с, а приповерхностная концентрация водорода C_s в стали при $E_{кор}$ – с **0,05 до 0,35 ppm**. Катодная поляризация стали до -1,4 В позволяет достичь максимальных значений C_s , равных **0,31...16,15 ppm**.
3. В рамках выполнения НИР экспериментально установлены значения критических (пороговых) концентрации водорода в стали, ускоряющие процессы разрушения:
 - > **3,8 ppm** для стадии образования трещины из локального дефекта;
 - 1,9 ppm** для стадии роста индивидуальной трещины в колонии;
 - 0,26 ppm** для стадии развития магистральной трещины.

4. Анализ полученных результатов показал, что при давлении газообразного водорода до 20 МПа и температурах, соответствующих условиям эксплуатации МГ, трубная сталь может наводороживаться **до $C = 1,4 \text{ ppm}$** . Указанные $C(H_2)$ в стали значительно ниже критической концентрации водорода, интенсифицирующей процесс роста индивидуальной трещины КРН в колонии трещин под действием статического нагружения трубы. Негативное действие водорода на рост дефектов КРН следует ожидать на стадии **развития магистральной трещины КРН** (с глубиной **свыше 30%**), растущей под действием циклических нагрузок, действующих на МГ, при содержании водорода от 30 % в газе при давлении эксплуатации до 14,7 МПа.
5. На основании результатов комплекса коррозионно-электрохимических и коррозионно-механических испытаний образцов трубной стали X70 разработана кинетическая модель роста дефектов КРН в условиях присутствия различных концентраций водорода в природном газе.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!