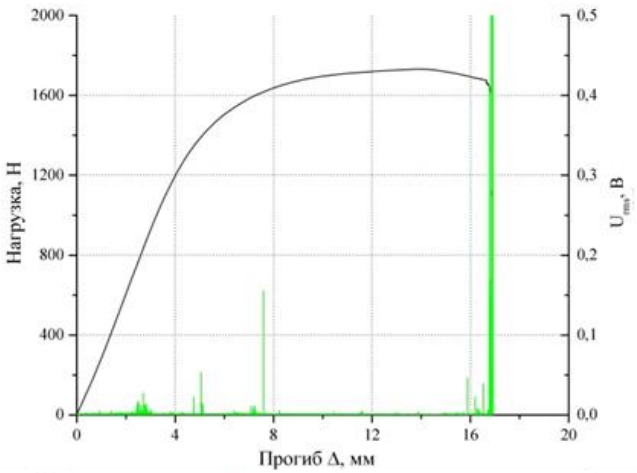
Механизмы распространения трещин и акустическая эмиссия в наводороженных ОЦК-сталях

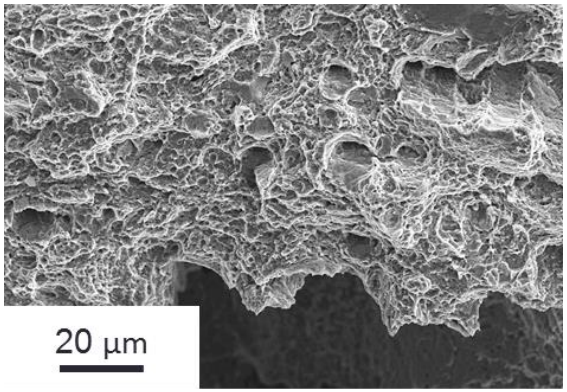
Е. Мерсон, Д.Мерсон*

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

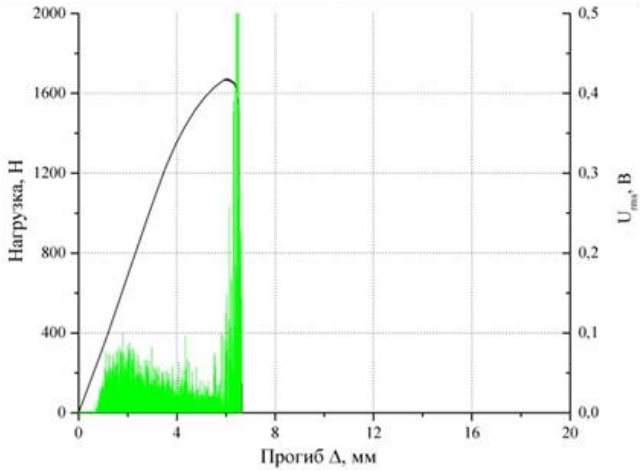
**D.Merson@tltsu.ru*

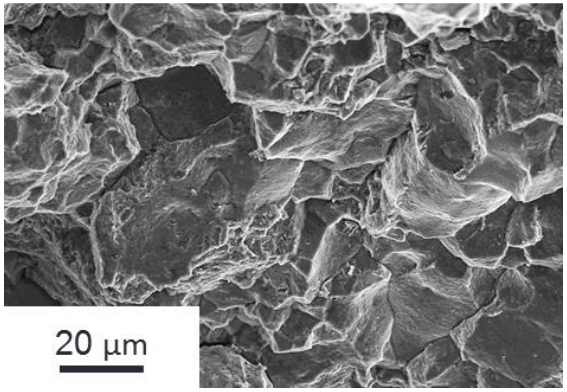
Механизм разрушения и АЭ при ВХ высокопрочной стали





Без водорода





С водородом

Основным источником АЭ в охрупченной водородом высокопрочной стали является межзеренное растрескивание

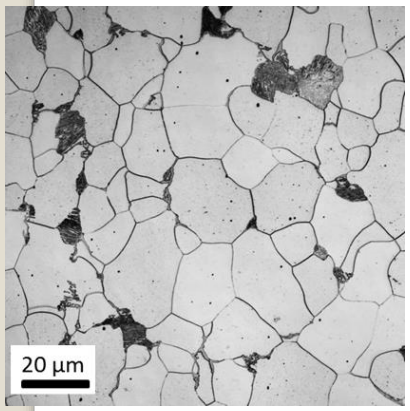
Merson E.D., Krishtal M.M., Merson D.L., Eremichev A. A., Vinogradov A. Effect of strain rate on acoustic emission during hydrogen assisted cracking in high carbon steel // Mater. Sci. Eng. A. 2012. Vol. 550. pp. 408–417.

Методы исследования

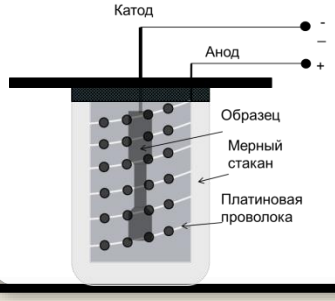
Материал

Низкоуглеродистая сталь марки S235JR (отечественный аналог сталь 15)

Вакуумный отжиг 950°С, 30 мин



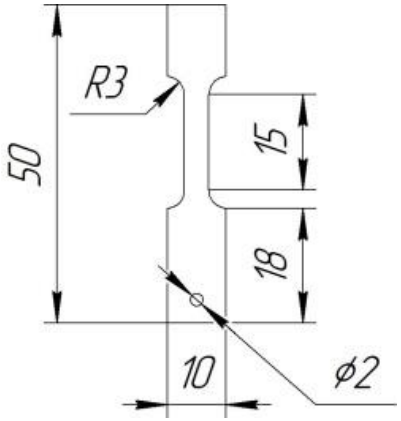
Электролитическое наводороживание



Механические испытания

Одноосное растяжение

$\dot{\varepsilon} = 10^{-4} - 10^{-1}$ с$^{-1}$

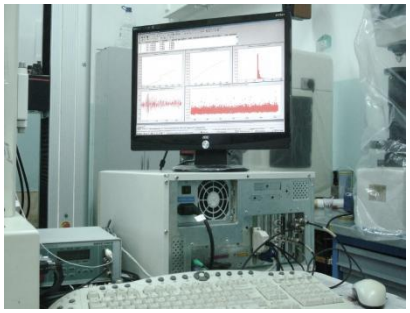




H50KT, Tinius Olsen

Регистрация АЭ

- беспороговая запись
- широкополосный пьезоэлектрический датчик *AE-900S-WB* (100-1000 кГц)
- плата АЦП, *PCI-2, PAC*
- общее усиление 66 дБ
- частота дискретизации 5 МГц



АЭ система ЭЯ-2, ЛАЭС

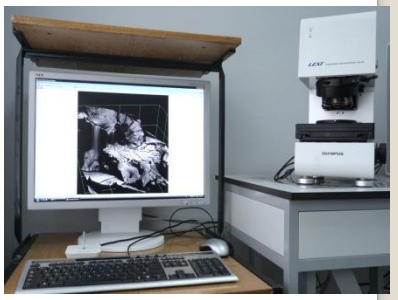
Микроскопия

- сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)



SIGMA, Zeiss

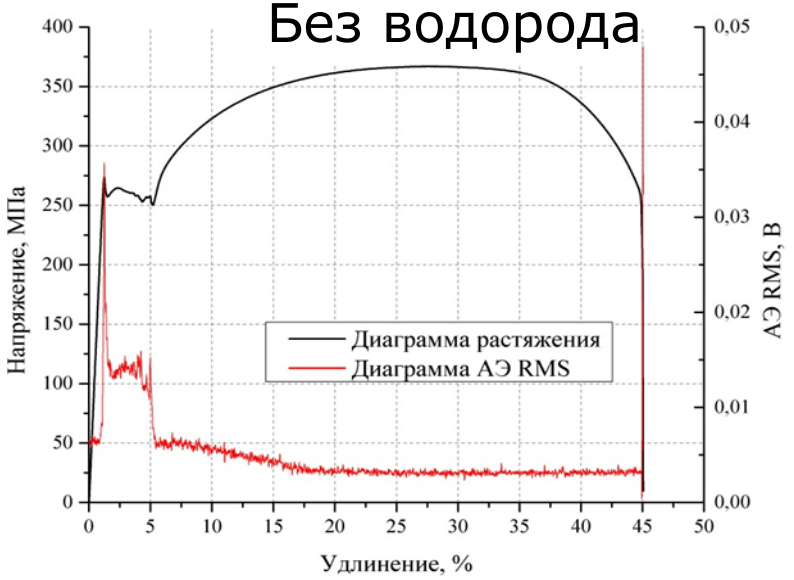
- конфокальная лазерная сканирующая микроскопия (КЛСМ)



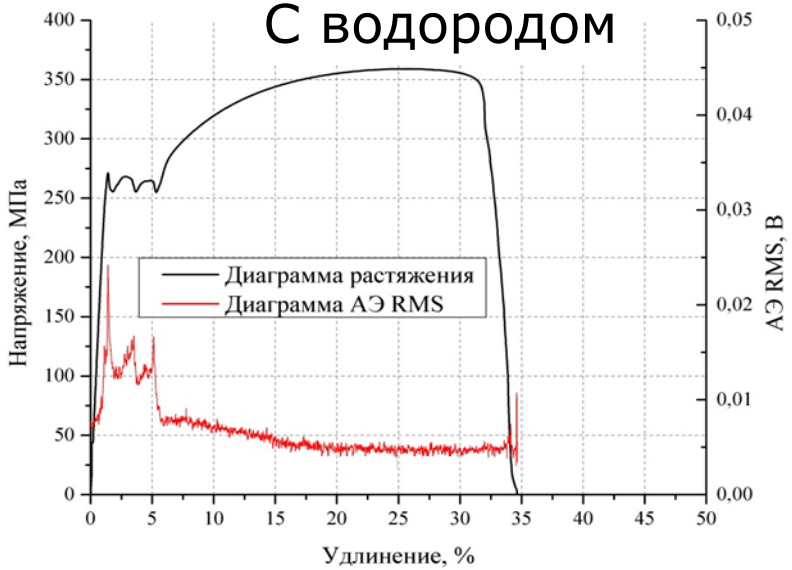
Lext OLS4000, Olympus

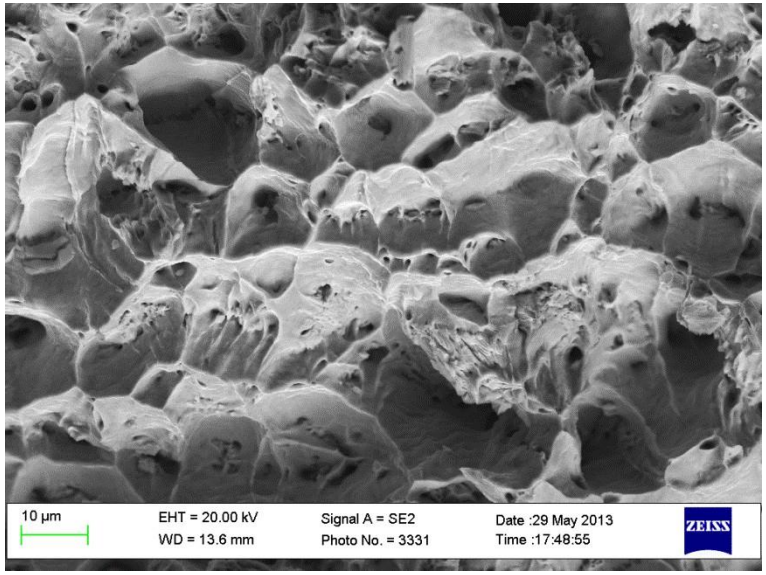
Влияние наводороживания на АЭ при растяжении

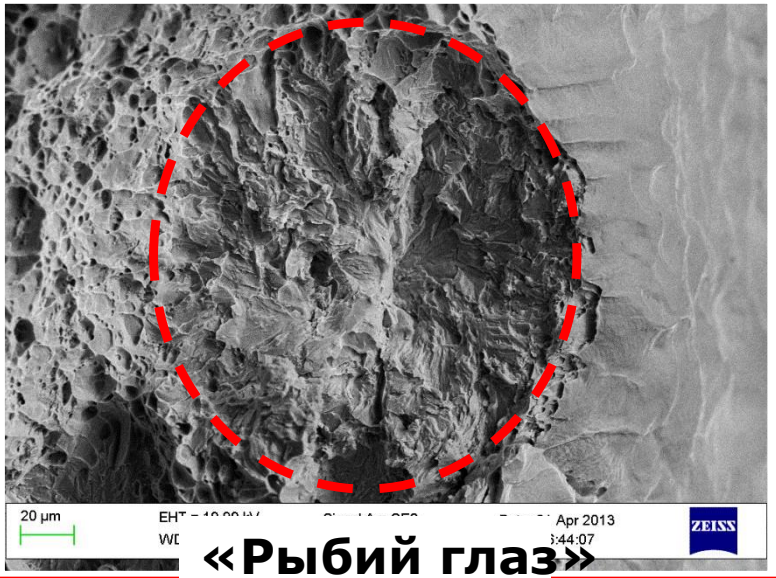
Без водорода



С водородом





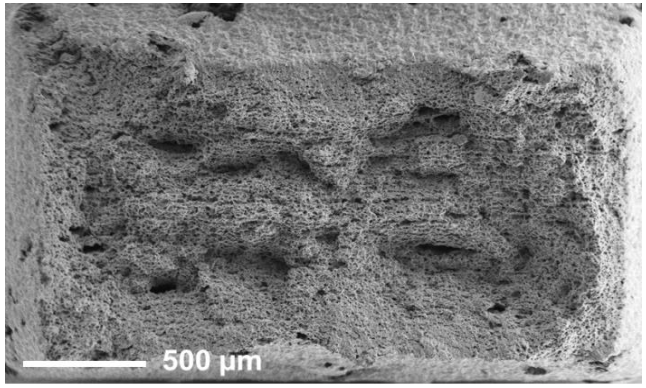


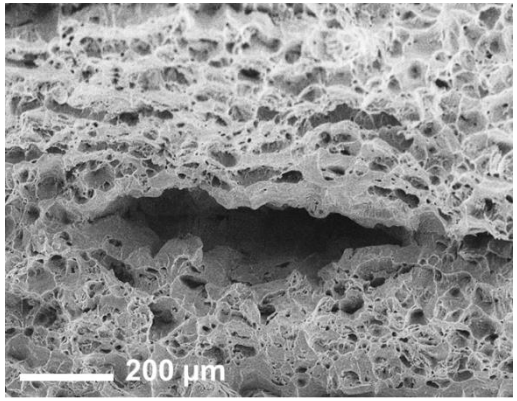
«Рыбий глаз»

Появление дефектов «рыбий глаз» не отразилось на поведении АЭ

Выяснение момента появления дефектов типа «рыбий глаз»

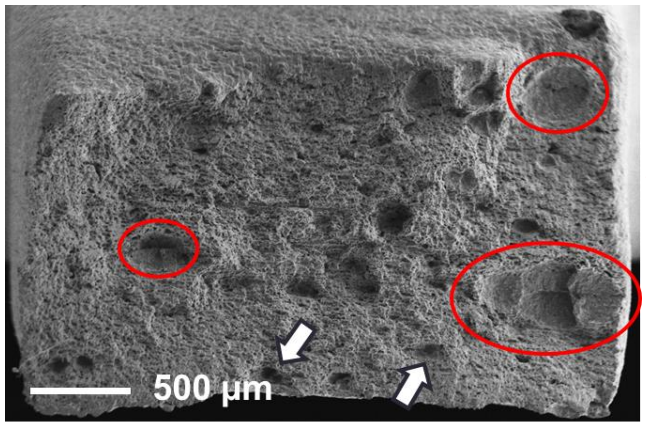
Наводороживание → Дегазация при 200 °С → Растяжение до разрушения

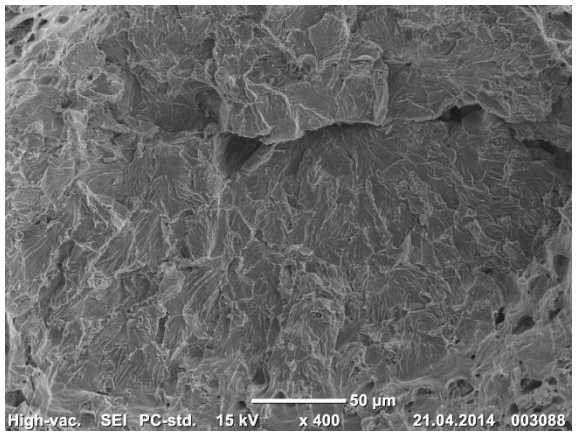




Излом полностью вязкий

Наводороживание → Растяжение до стадии деформационного упрочнения → Разгрузка → Дегазация при 200 °С → Растяжение до разрушения





Появились дефекты «рыбий глаз»

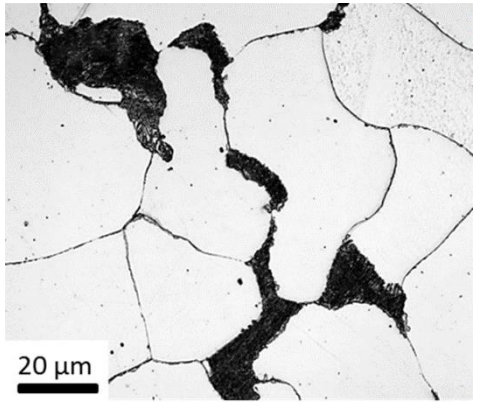
Появление дефектов «рыбий глаз» происходит непосредственно в процессе растяжения образца под действием диффузионно-подвижного водорода и, таким образом, является следствием водородо-ассистированного роста трещин. Данный процесс является слабым источником АЭ и, следовательно, не осуществляется по механизму скола

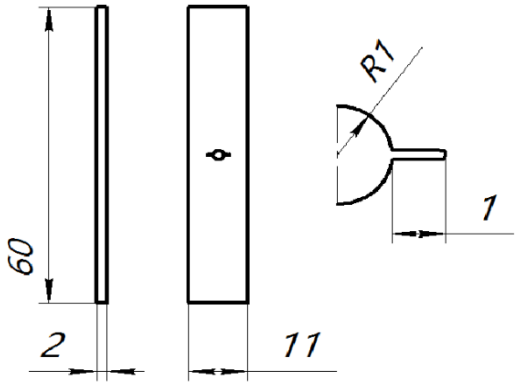
Merson E., Vinogradov A., Merson D.L. Application of acoustic emission method for investigation of hydrogen embrittlement mechanism in the low-carbon steel // J. Alloys Compd. 2015. Vol. 645, P. S460–S463.

Какой механизм образования квази-скола?

Горячекатаная низкоуглеродистая сталь **S235JR**

Wt. (%)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu
0,129	0,02	0,42	0,019	0,015	0,05	0,04	0,028	0,067





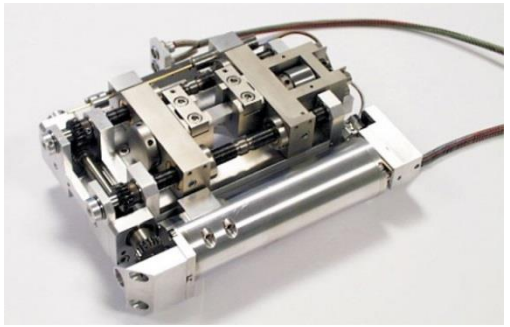
Образцы с центральным сквозным надрезом с феррито-перлитной структурой были получены при помощи:

(1) вырезки на электроэррозионном станке
(2) вакуумного отжига при 950 °C в течение 1 ч
(3) шлифовки
(4) механической полировки на 1 мкм суспензии
(5) электрополировки в области вокруг надреза

Электролитическое наводороживание

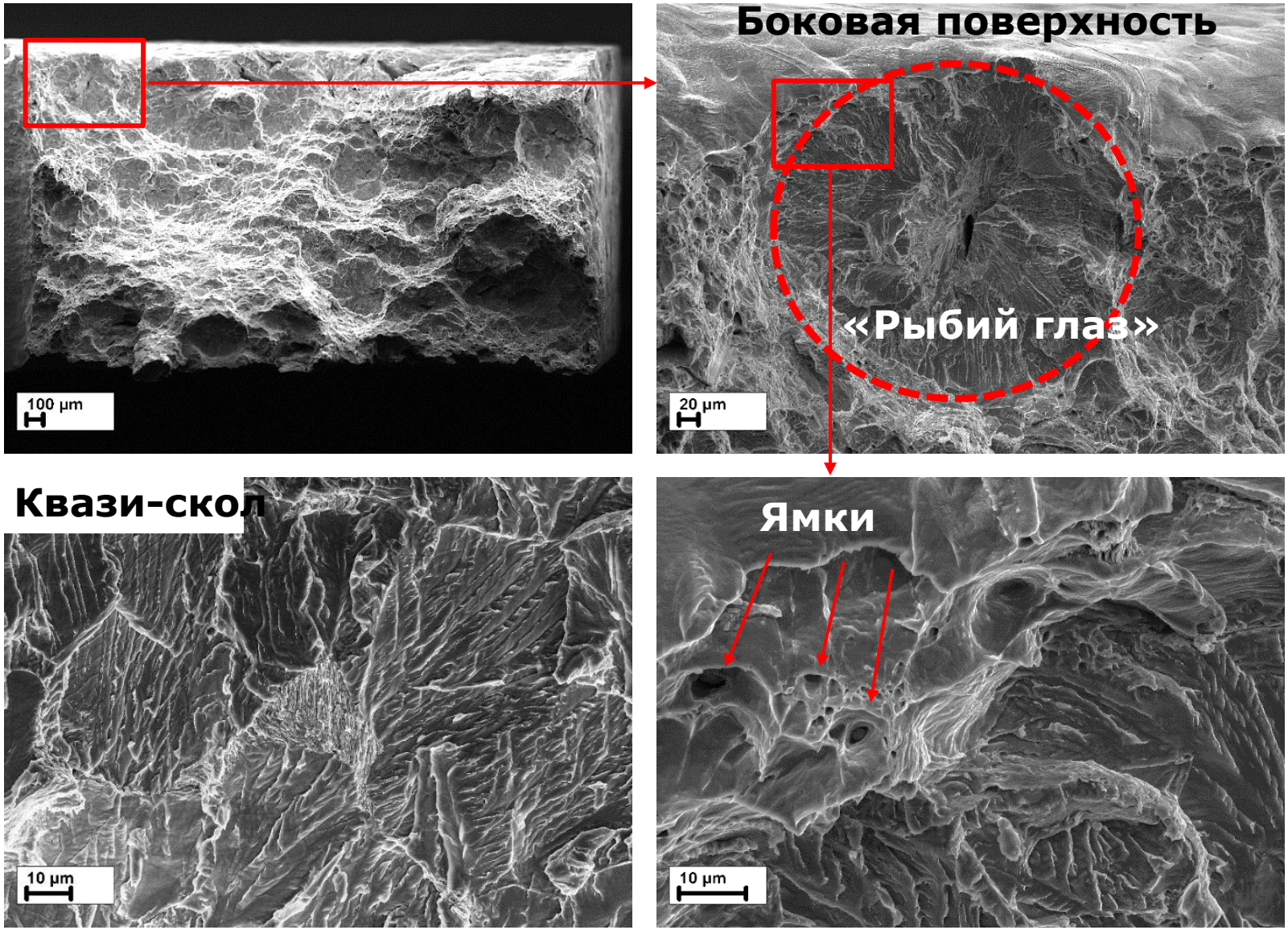
- Длительность: 1 час
- Плотность тока: 200 мА/см^2
- Электролит: 5% H_2SO_4 + 1.5 г/л тиомочевины

Испытание на растяжение и съемка в реальном времени в колонне СЭМ:





Испытание после ex-situ наводороживания

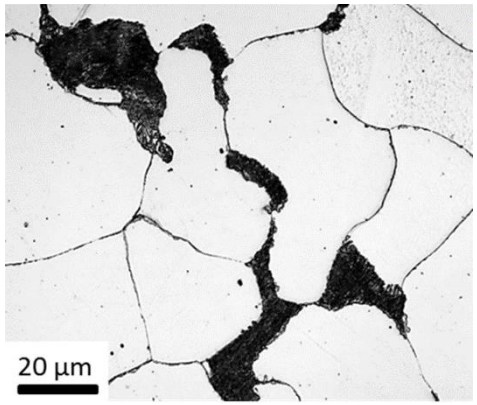


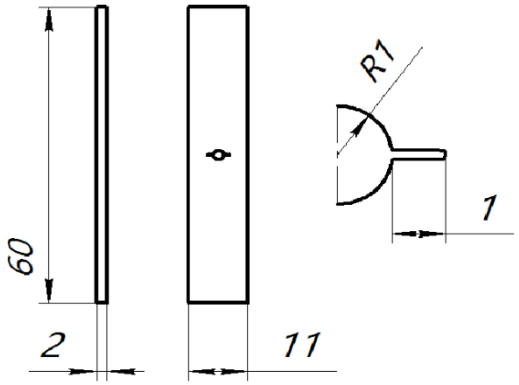
Между «рыбьим глазом» и боковой поверхностью образца всегда присутствует прослойка вязкого ямочного рельефа

Методика in-situ наводороживания

Горячекатаная низкоуглеродистая сталь **S235JR**

Wt. (%)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu
0,129	0,02	0,42	0,019	0,015	0,05	0,04	0,028	0,067

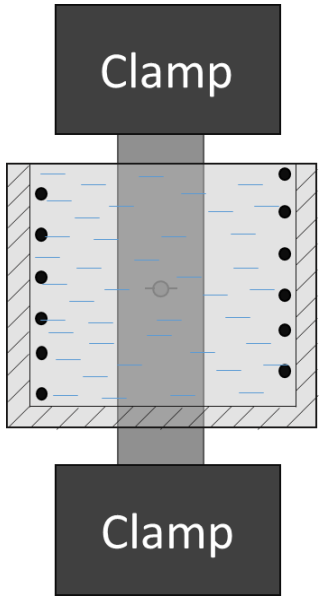




Образцы с центральным сквозным надрезом с феррито-перлитной структурой были получены при помощи:

(1) вырезки на электроэррозионном станке
(2) вакуумного отжига при 950 °C в течение 1 ч
(3) шлифовки
(4) механической полировки на 1 мкм суспензии
(5) электрополировки в области вокруг надреза

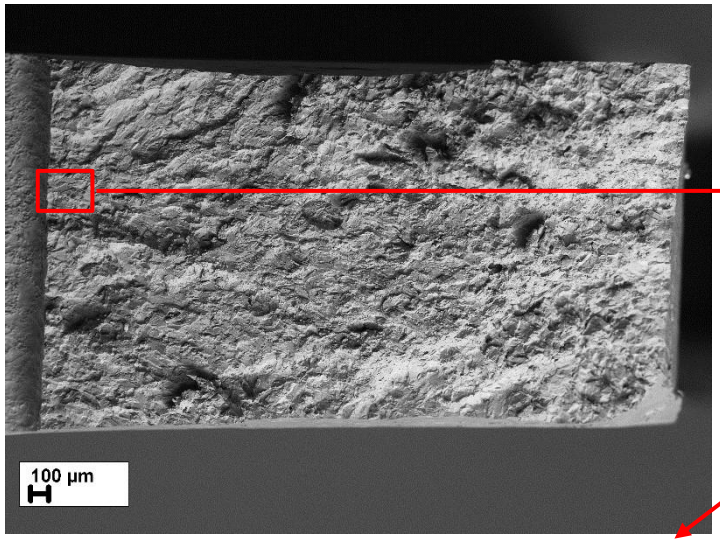
Электролитическое in-situ наводороживание

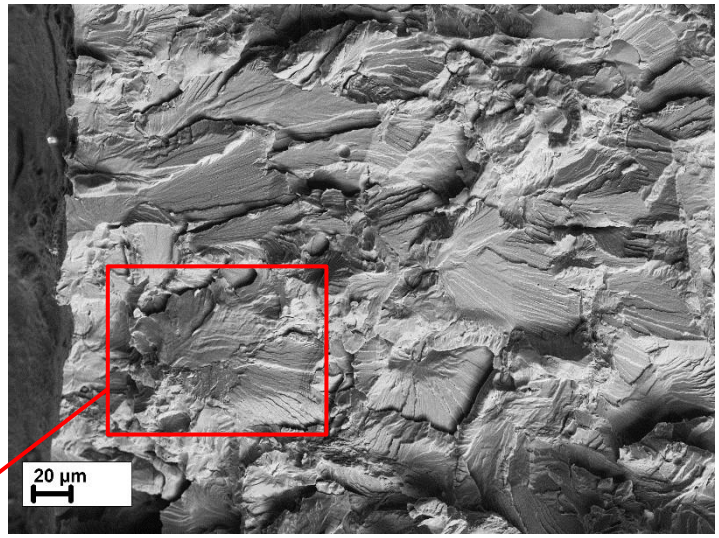


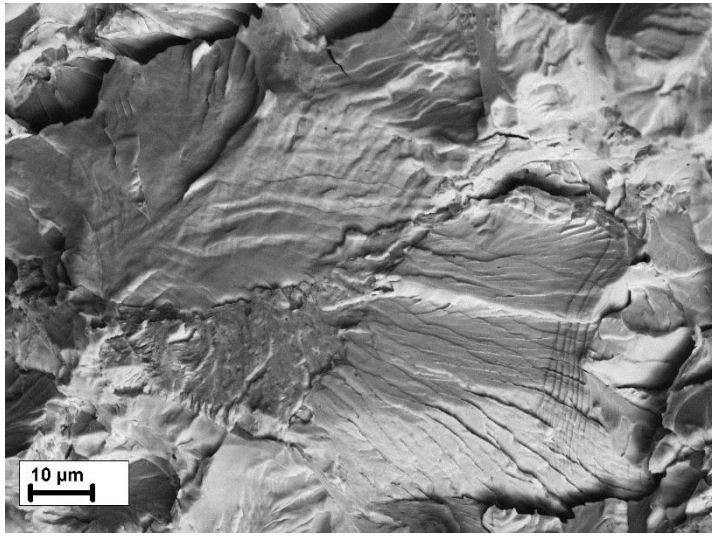
- Длительность: от начала испытания до разрушения образца
- Плотность тока: 5 мА/см^2
- Электролит: 5% H_2SO_4 + 1.5 г/л тиомочевина

Скорость деформирования: 0.1 мм/мин

Излом после испытания с in-situ наводораживанием

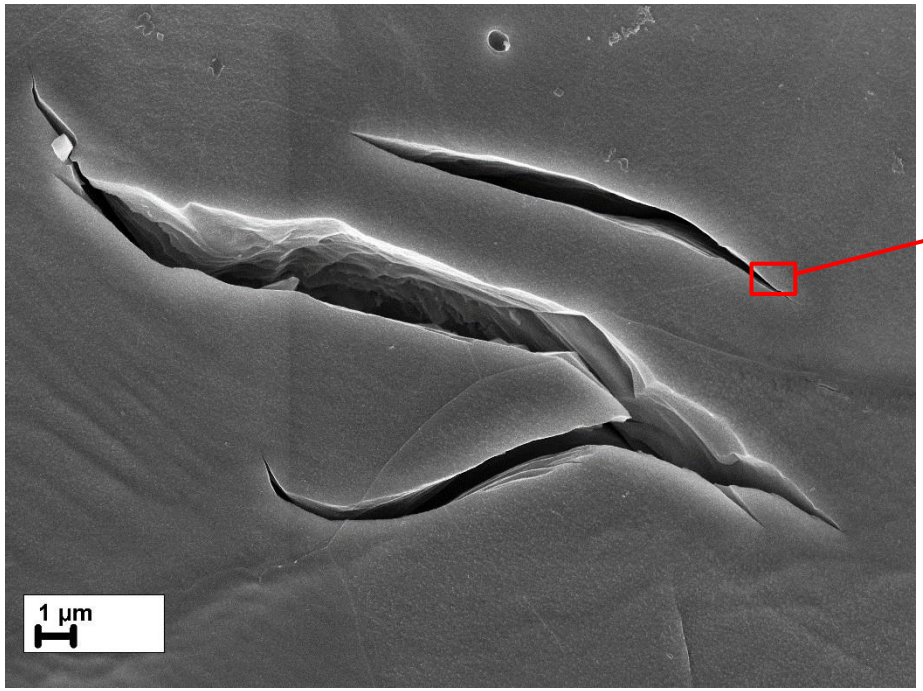


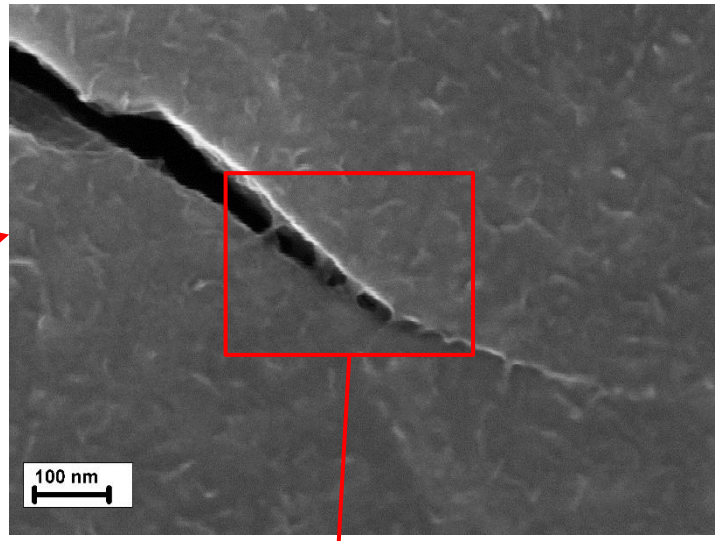


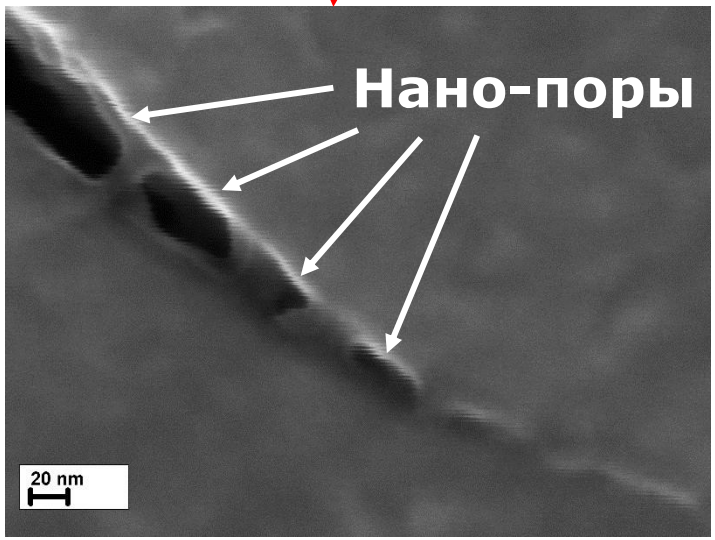


После испытания с in-situ наводораживанием вся поверхность излома имеет морфологию квази-скола. Ямок классического вязкого разрушения не обнаружено.

Трещины на поверхности образца, испытанного при in-situ наводороживании

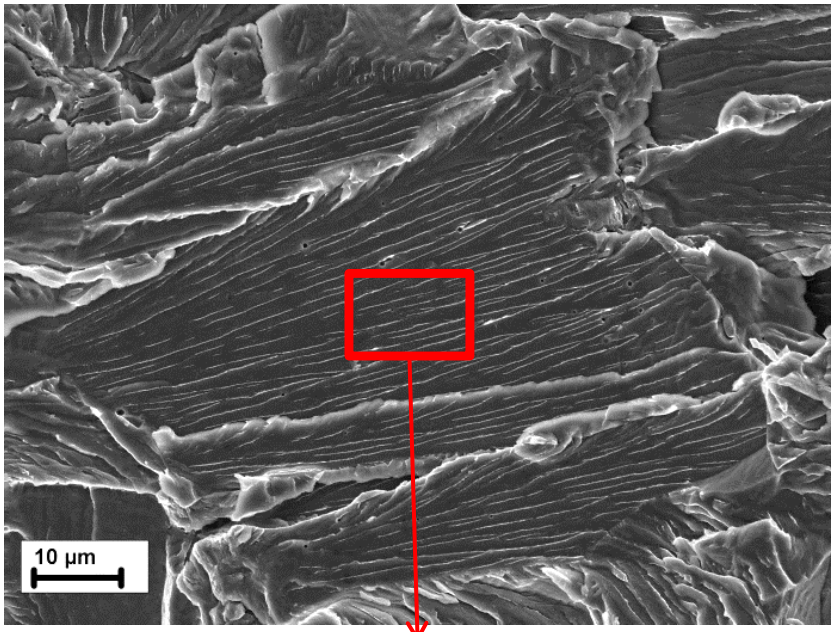


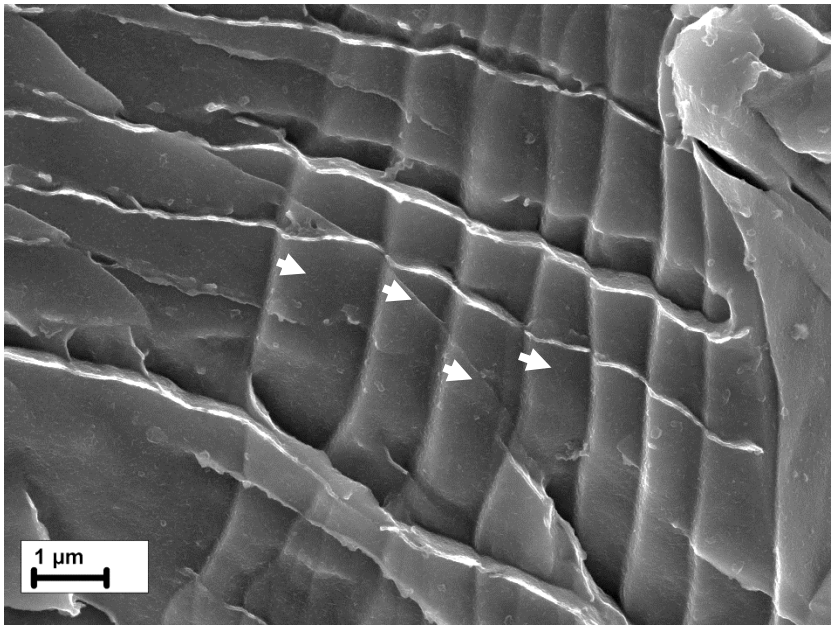


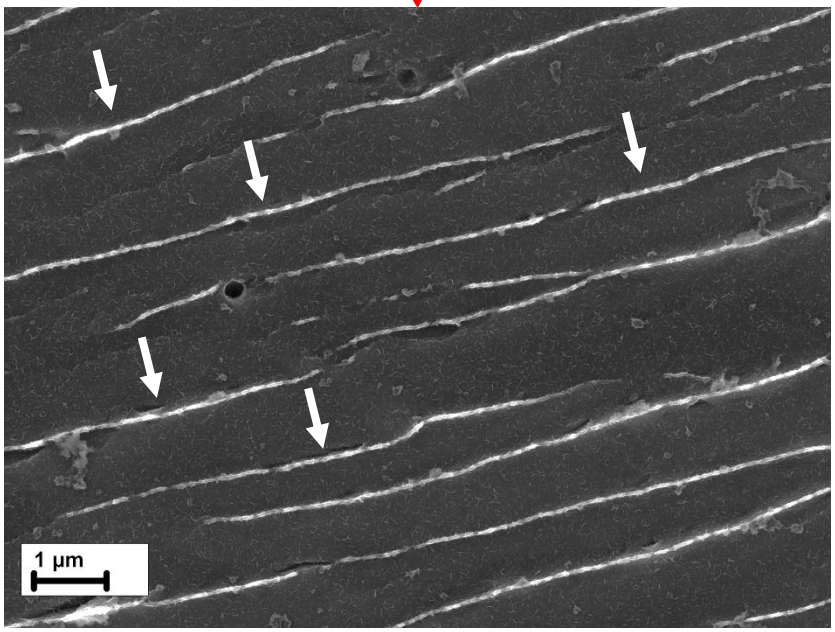


Процесс образования и слияния нано-пор играет важную роль в механизме роста водородных трещин КС в низкоуглеродистой стали

Морфология квазискола и ее элементы





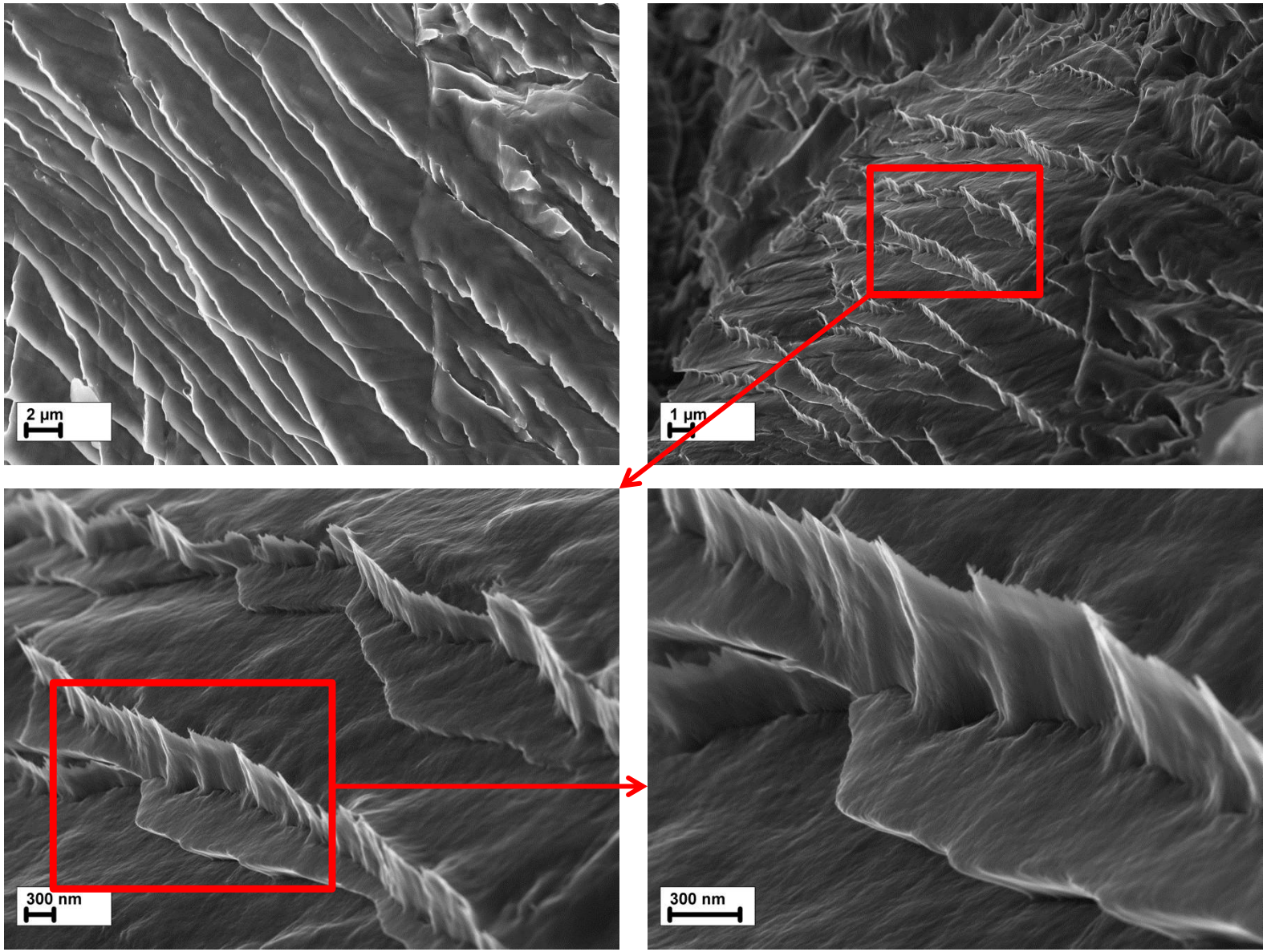


1. Гребни отрыва

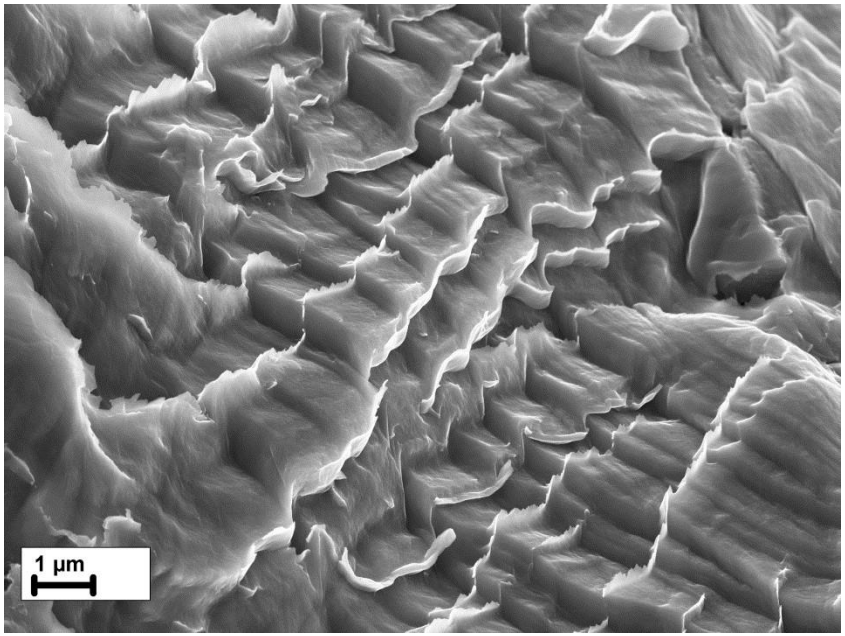
2. Поперечные к гребням полосы и ступеньки

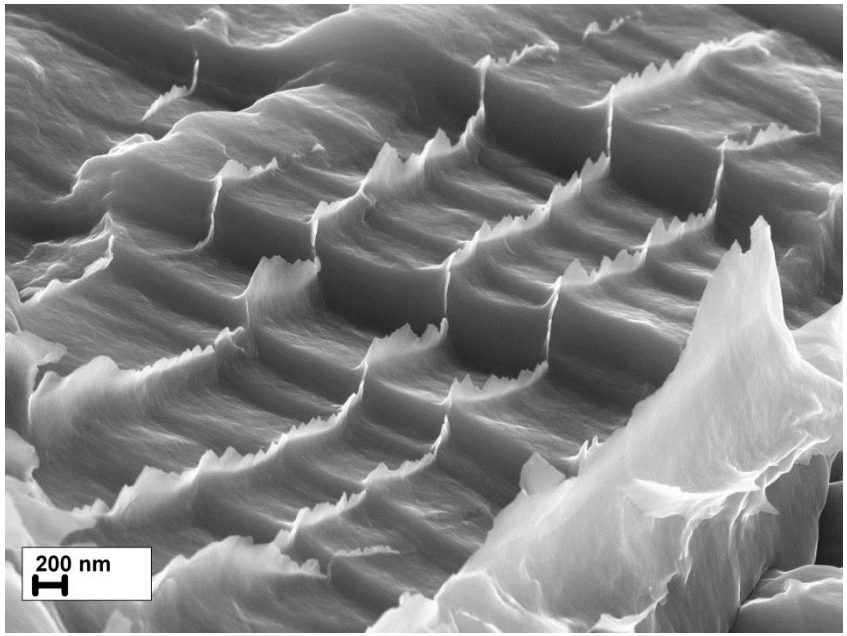
3. Относительно гладкие поверхности между гребнями и полосами

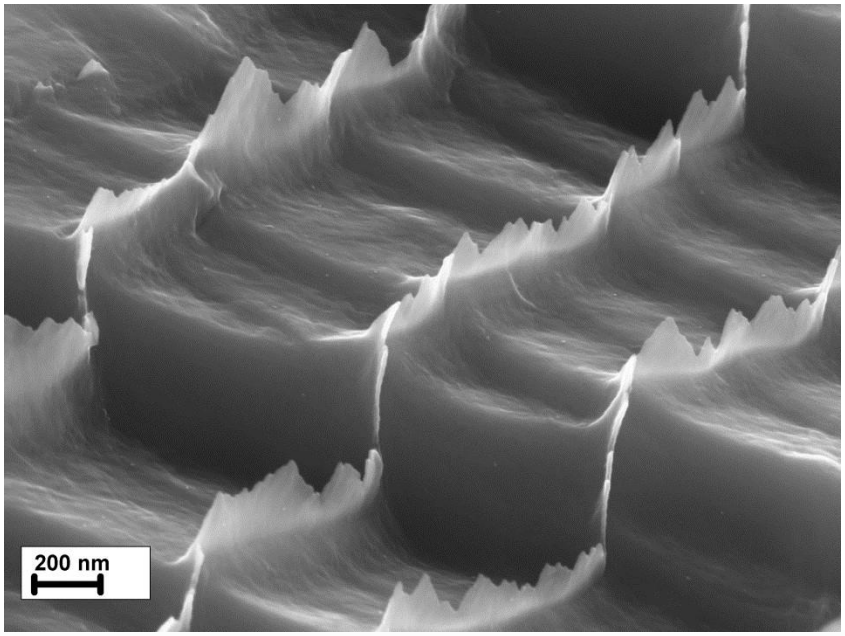
Гребни на поверхности квазискола

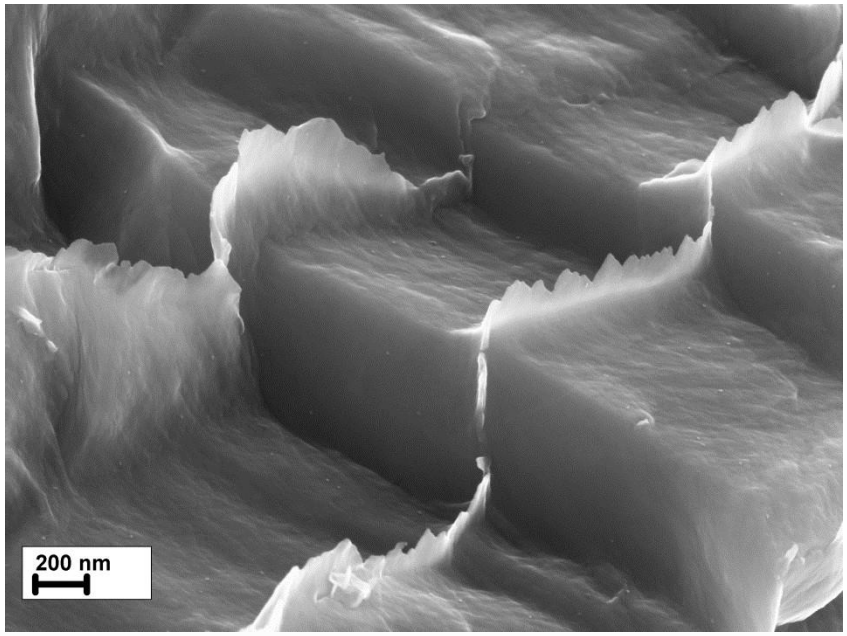


Гребни на поверхности квазискола

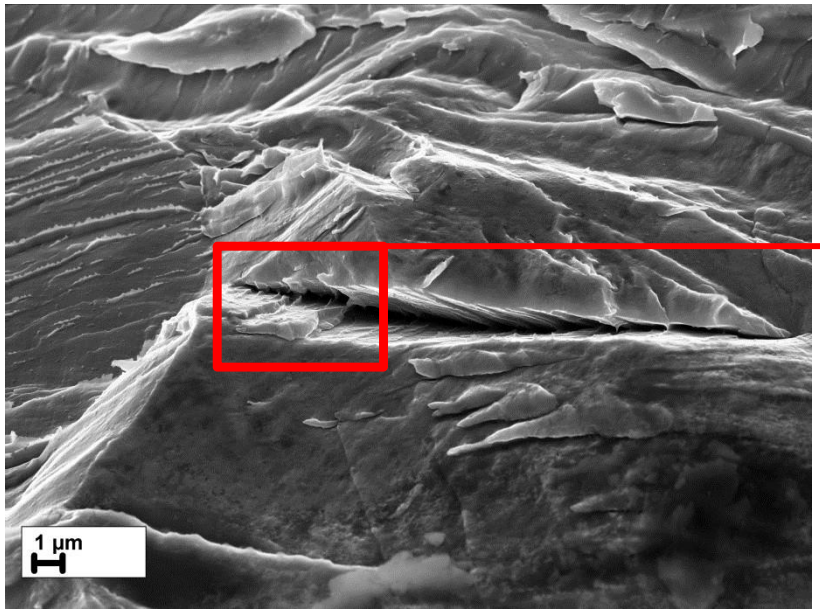


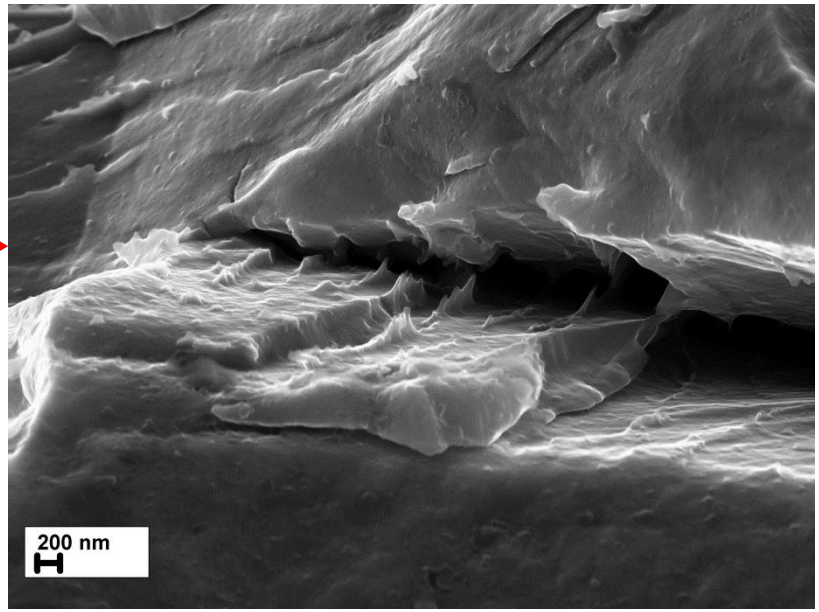


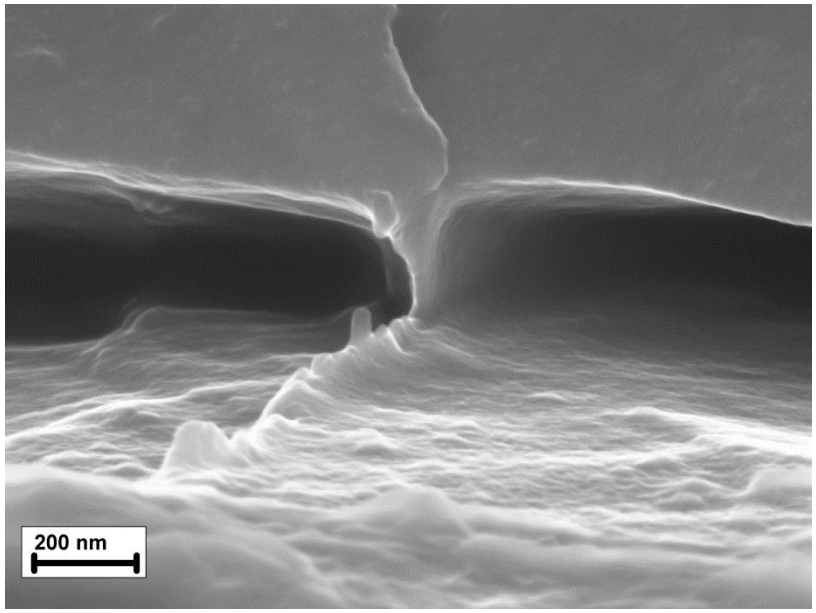


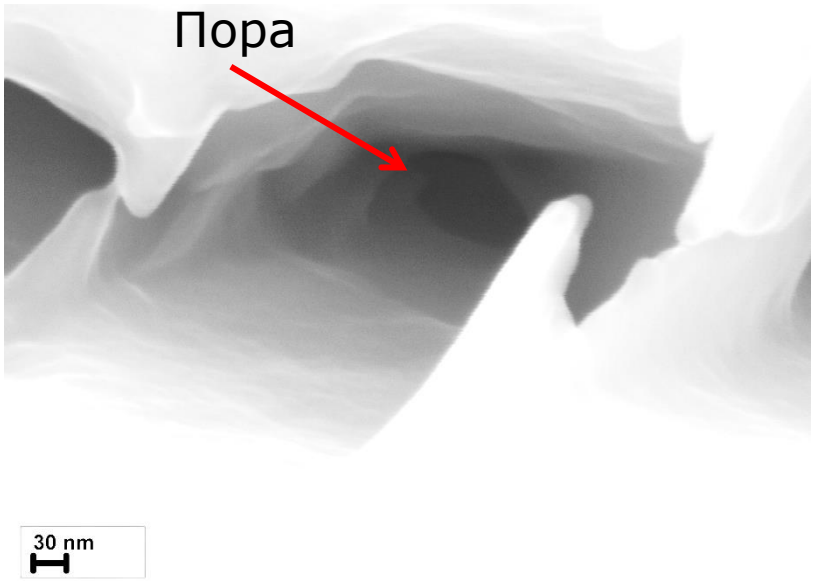


Формирование гребней на поверхности квазискола

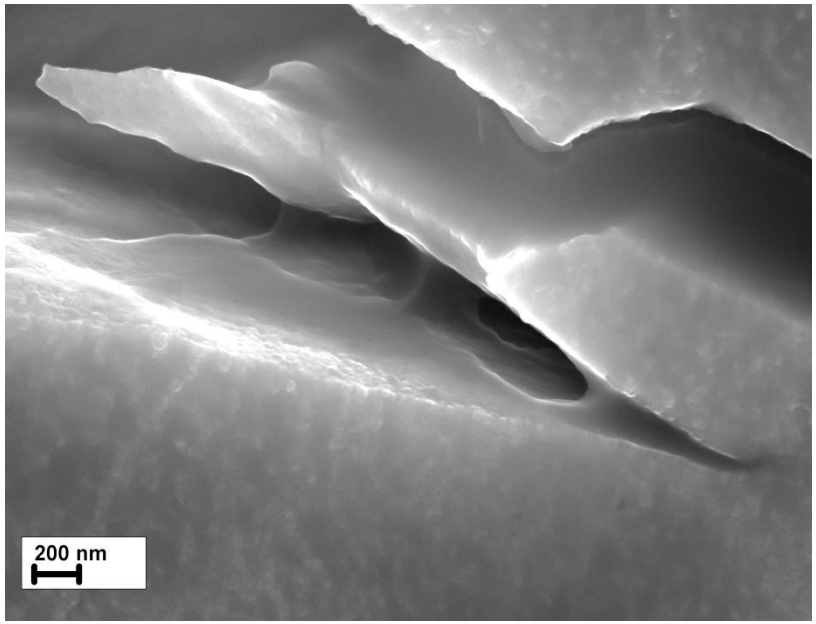


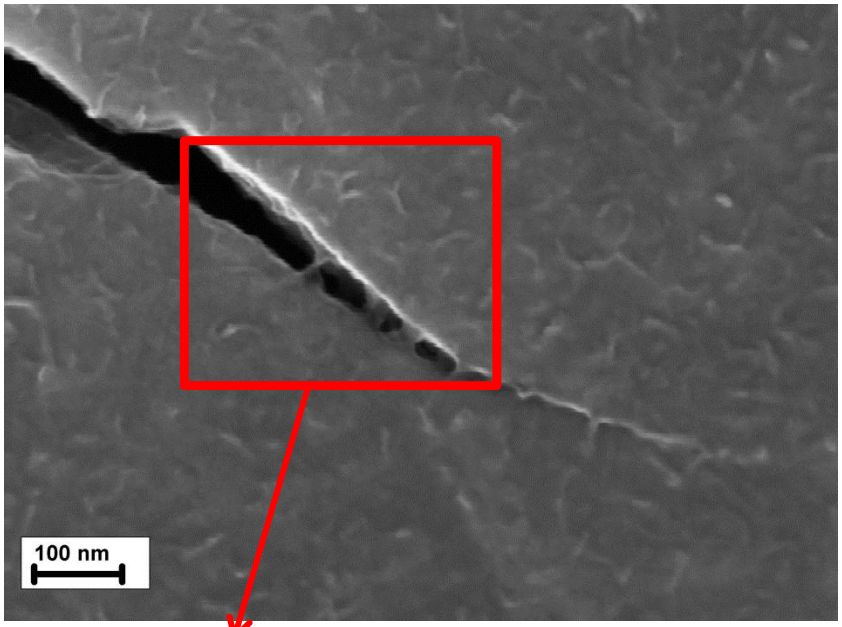


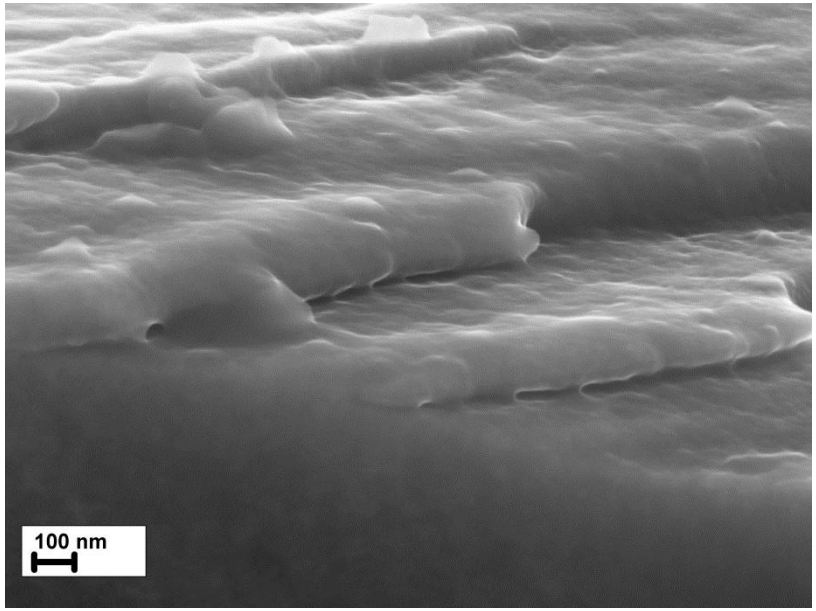




Формирование нанопор и гладких террас







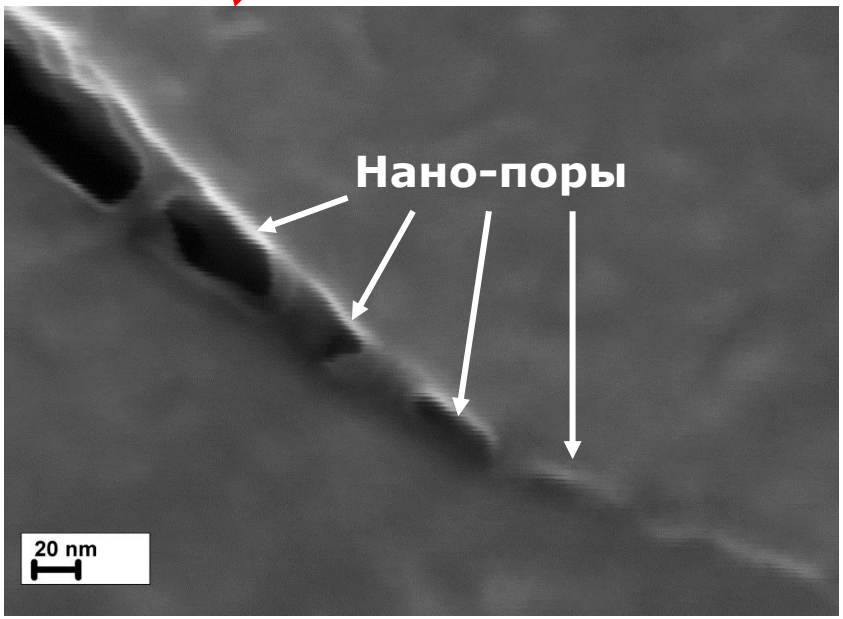
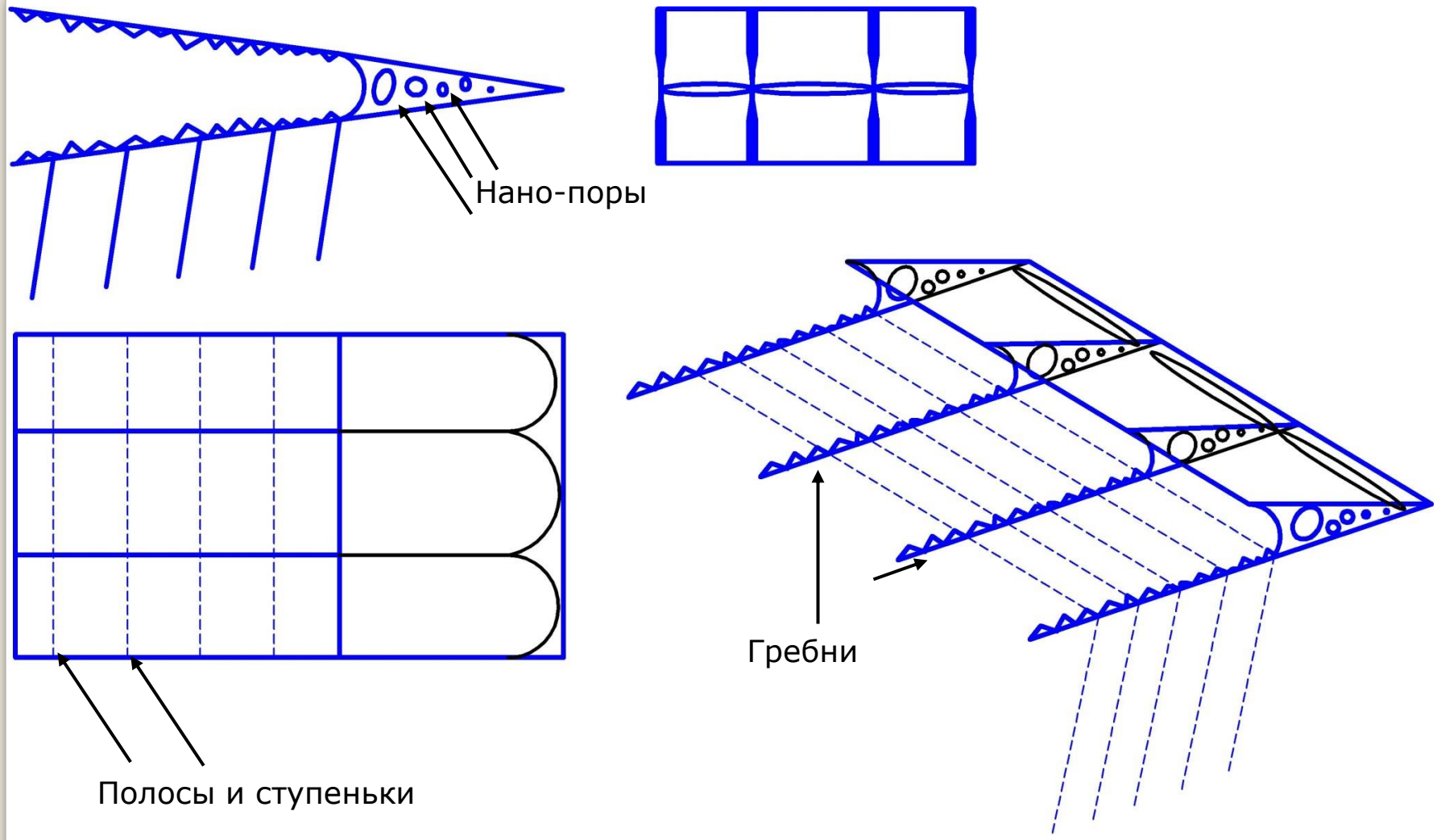
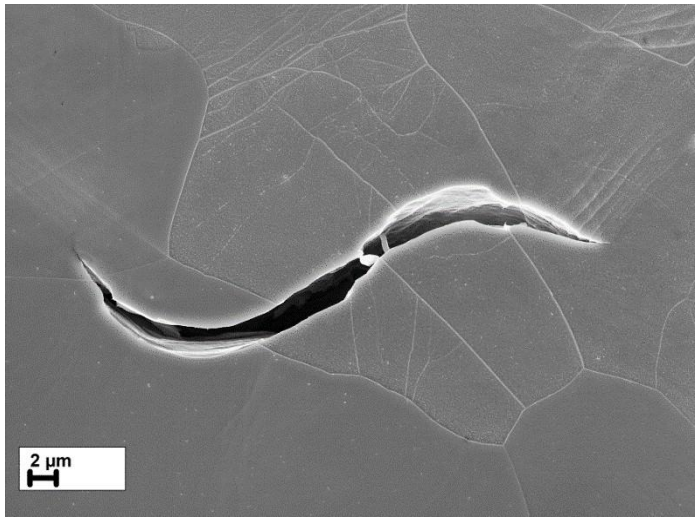


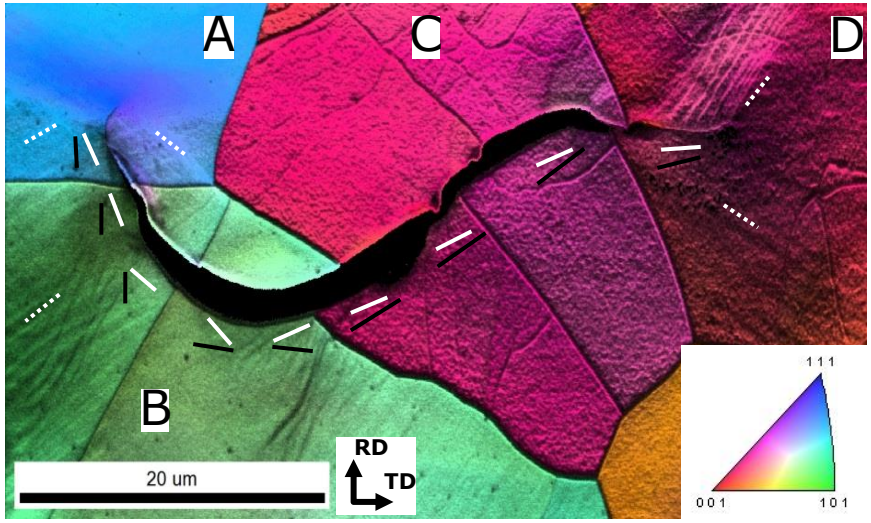
Схема формирования поверхности квазискола



Формирование поверхности квазискола происходит путем образования параллельных трубчатых пор, ориентированных вдоль направления роста трещины, их роста и последующего вязкого разрыва перемычек между ними, а также выхода полос скольжения на поверхность трещины по мере ее раскрытия

Влияние кристаллографии на путь трещин квазискола

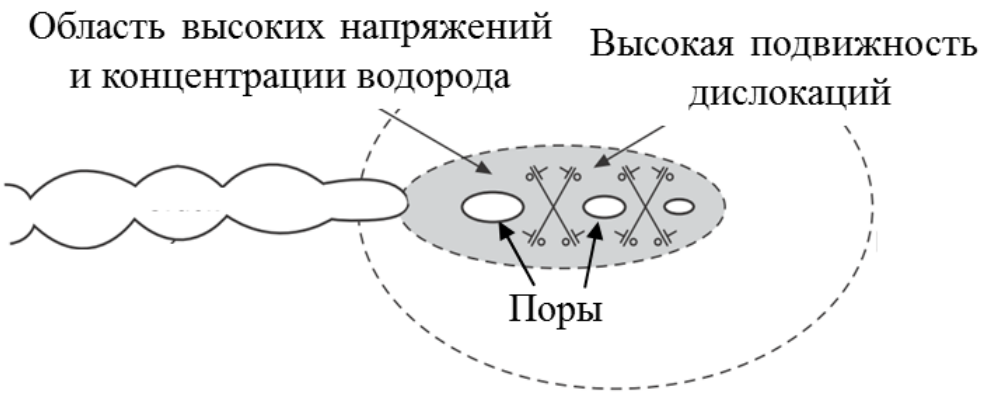




Путь водородо-ассистированных трещин квазискола может существенно отклоняться от кристаллографических плоскостей в пределах зерна феррита

Механизм вязкого разрушения

Hydrogen-enhanced localized plasticity (HELP)



Birnbaum H.K. et al. Mater. Sci. Eng. A. 1994. Vol. 176. P. 191–202.

Разрушение и акустическая эмиссия в вязких и малопластичных сталях в охрупченном водородом состояниях

Материалы

S235JR

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.140	0.022	0.463	0.015	0.011	0.089	0.037

1) Горячекатаная: $\sigma_т$=370 МПа, δ= 36%

2) Отожженная: $\sigma_т$=170 МПа, δ=45%

09Г2С

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.091	0.722	1.358	0.016	0.011	0.97	0.072

1) Горячекатаная: $\sigma_т$=350 МПа, δ= 36%

2) РКУП: $\sigma_т$=810 МПа, δ=12%

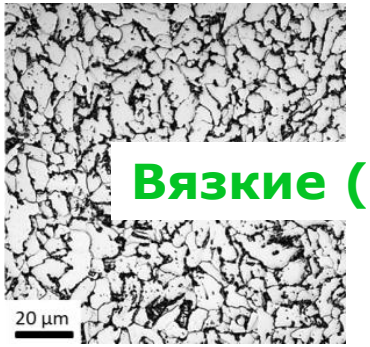
Сталь 70

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.71	0.23	0.60	0.015	0.004	0.02	0.03

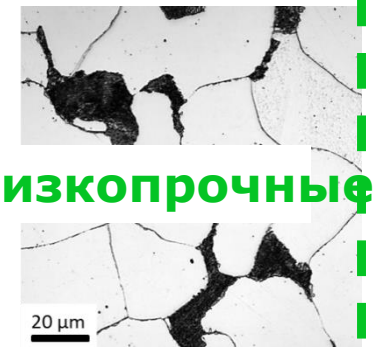
1) Отожженная: $\sigma_т$=320 МПа, δ= 22%

2) Закалка+отпуск: $\sigma_т$=1350 МПа, δ=13%

Горячекатаная

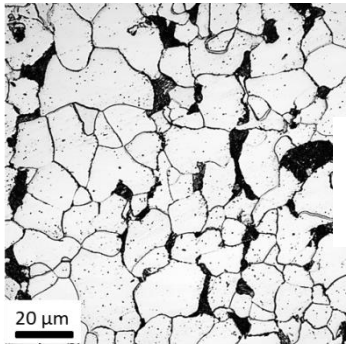


Отожженная

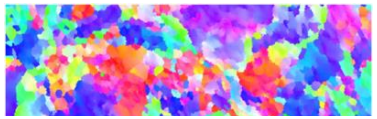


Вязкие (низкопрочные)

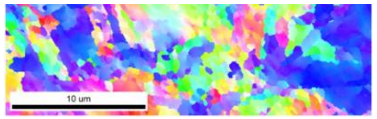
Горячекатаная



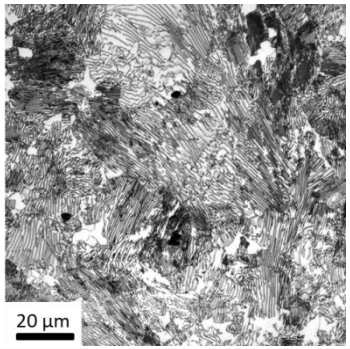
РКУП



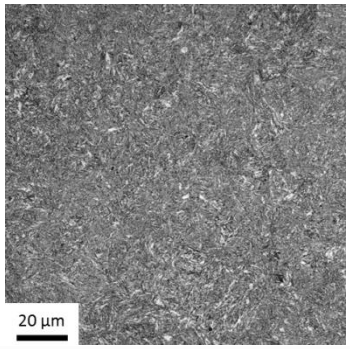
Хрупкие (высокопрочные)



Отожженная



Закалка+отпуск



Методы исследования

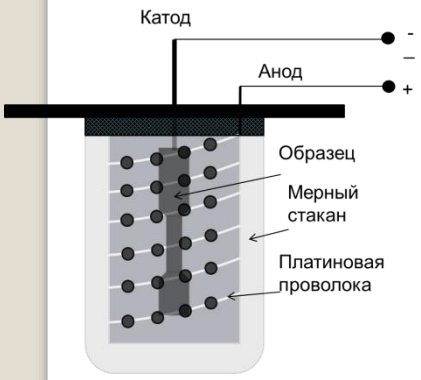
Наводороживание

Электролитическое

Электролит: 5%H_2SO_4 + 1,5 г/л $CS(NH_2)_2$,

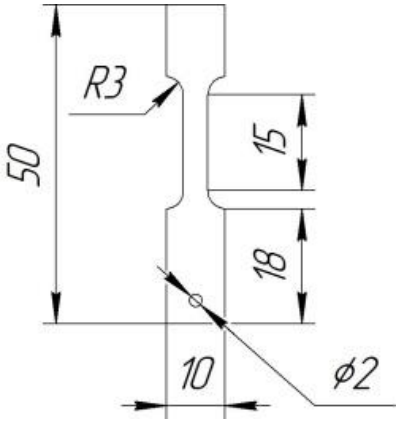
Длительность: 1 час

Плотность тока: 20-600 мА/см^2



Механические испытания

Одноосное растяжение
v = 4 мм/мин

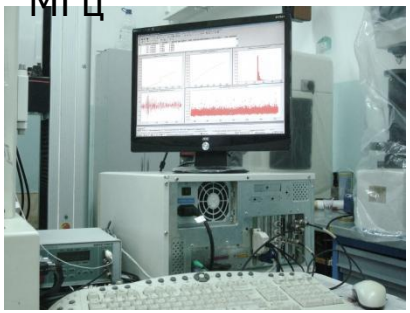




H50KT, Tinius Olsen

Регистрация АЭ

- беспороговая запись
- широкополосный пьезоэлектрический датчик Pico, 200-750 kHz (PAC)
- плата АЦП, *PCI-2, PAC*
- общее усиление 60 дБ
- частота дискретизации 2 МГц



АЭ система ЭЯ-2, ЛАЭС

Микроскопия

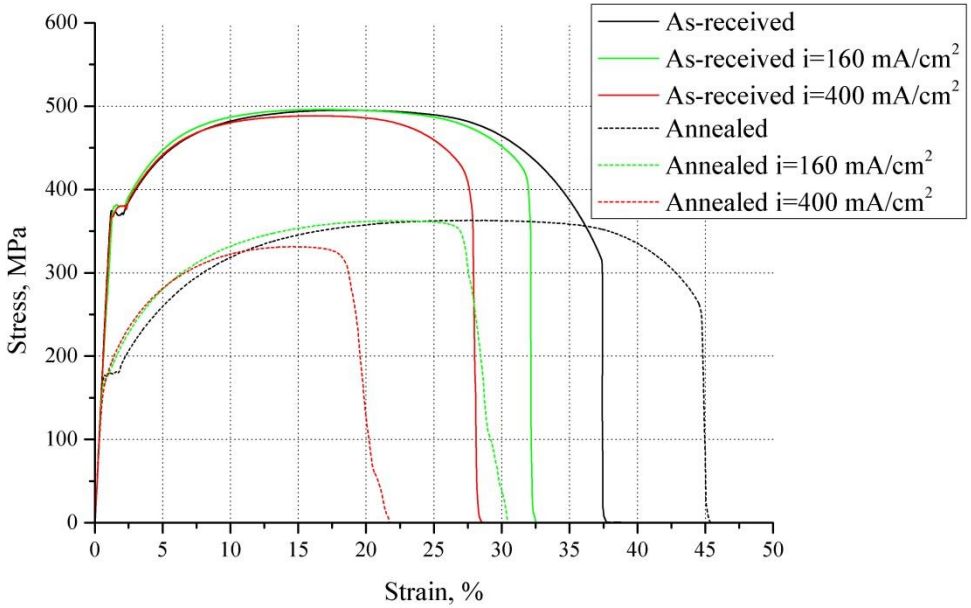
сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и EBSD анализ



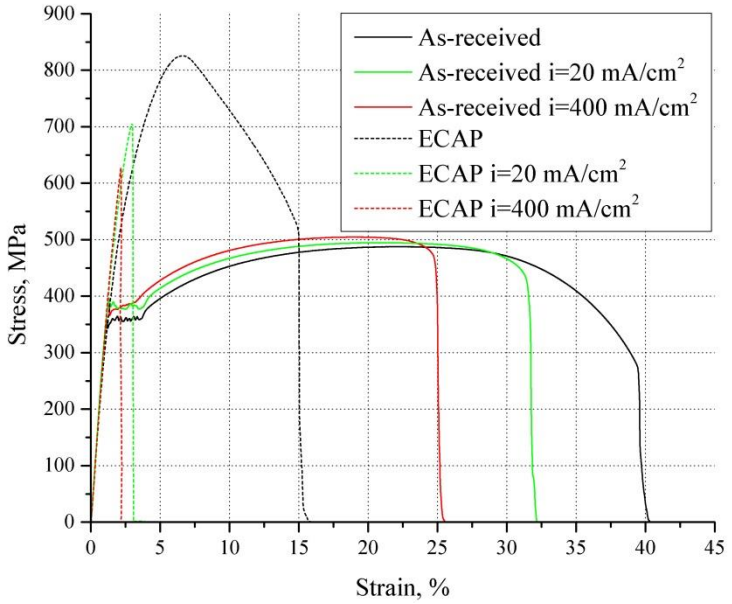
SIGMA, Zeiss

Влияние наводороживания на диаграммы растяжения

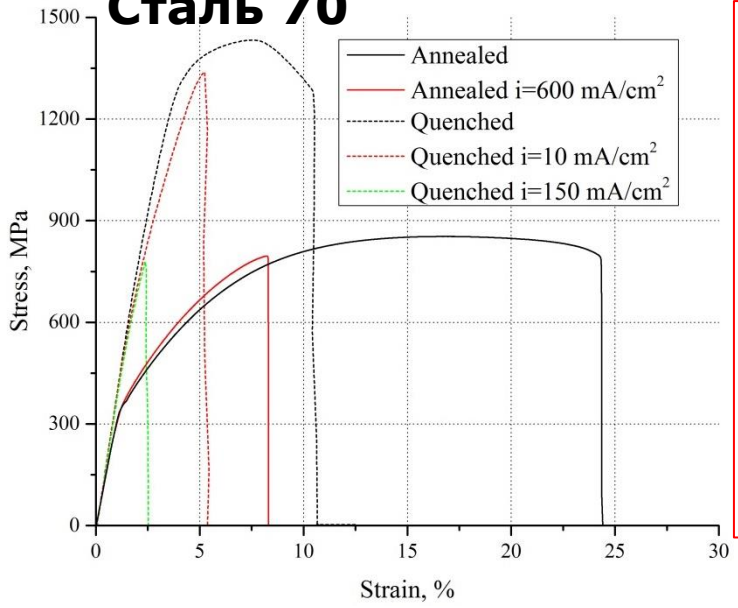
S235JR



09Г2С



Сталь 70

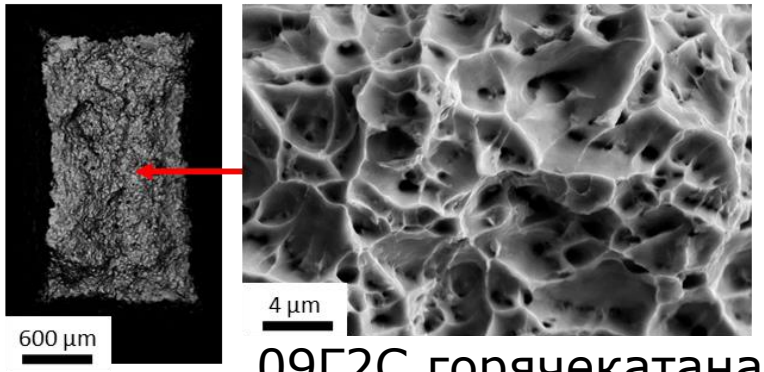


- Падение пластичности, вызванное наводороживанием усиливается с увеличением концентрации водорода

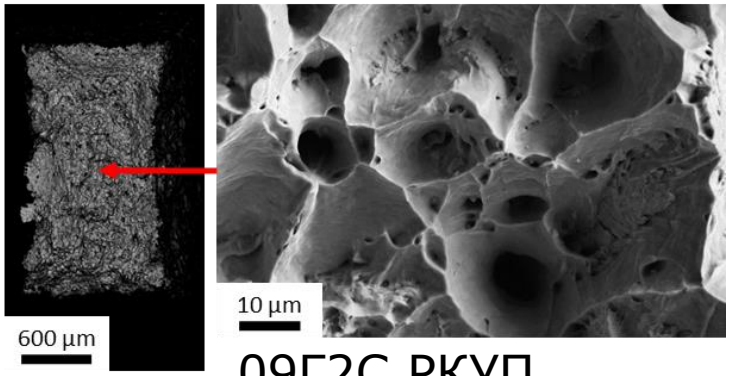
- **стали с исходно меньшей пластичностью (большей прочностью) после наводороживания разрушаются на более ранних стадиях деформации по сравнению с исходно вязкими сталями**

Фрактография (до наводороживания)

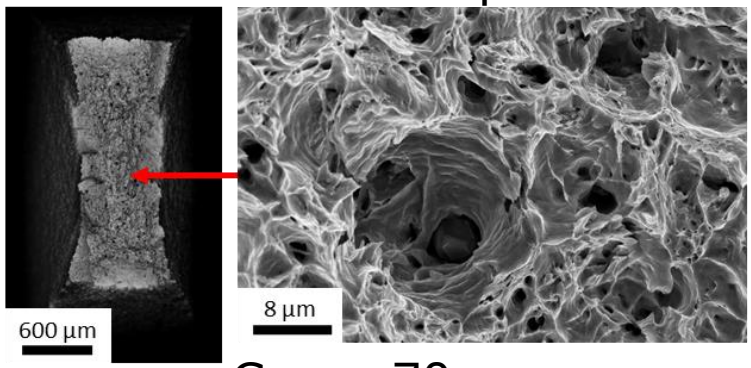
S235JR горячекатаная



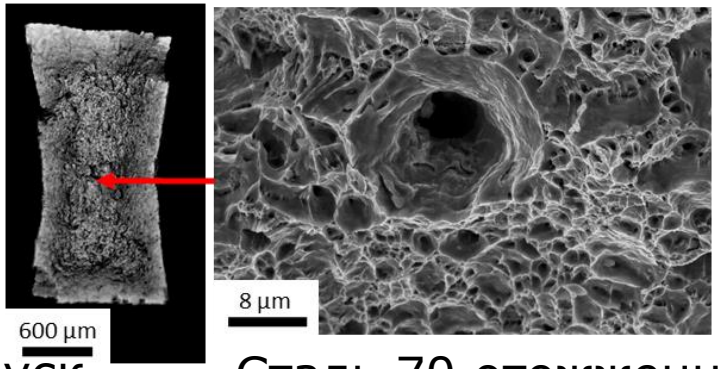
S235JR отожженная



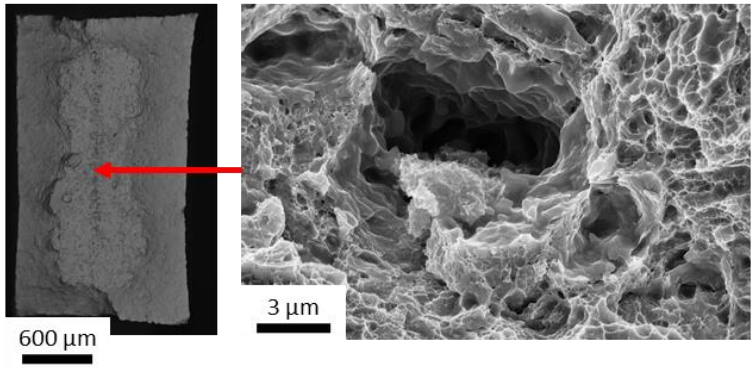
09Г2С горячекатаная



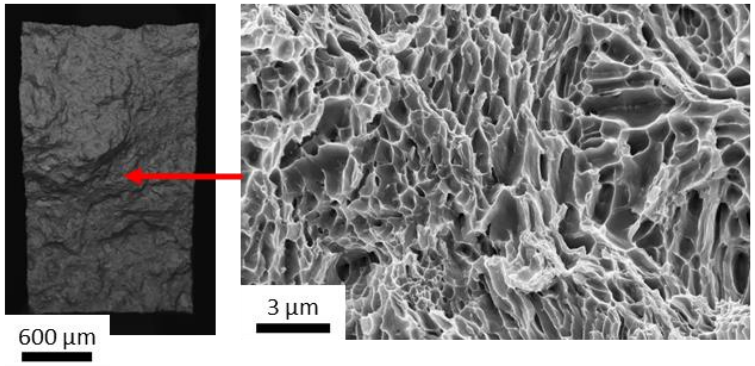
09Г2С РКУП



Сталь 70 закалка+отпуск



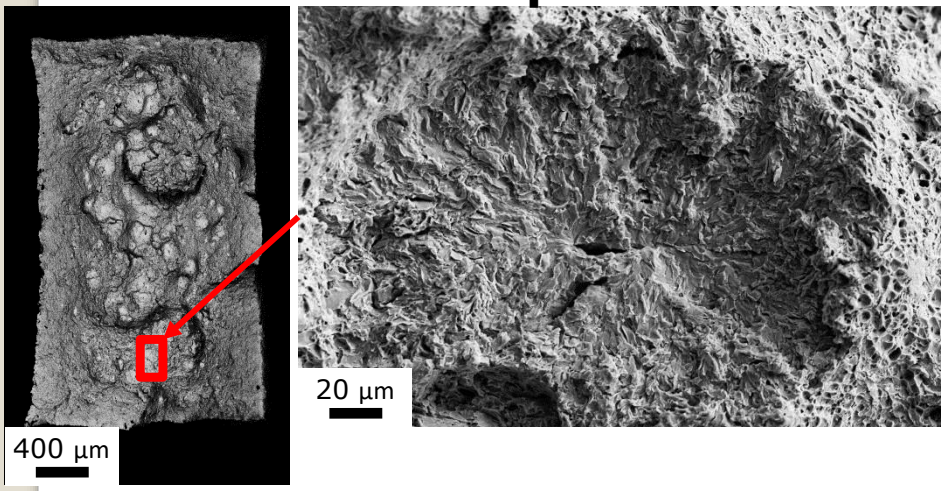
Сталь 70 отожженная



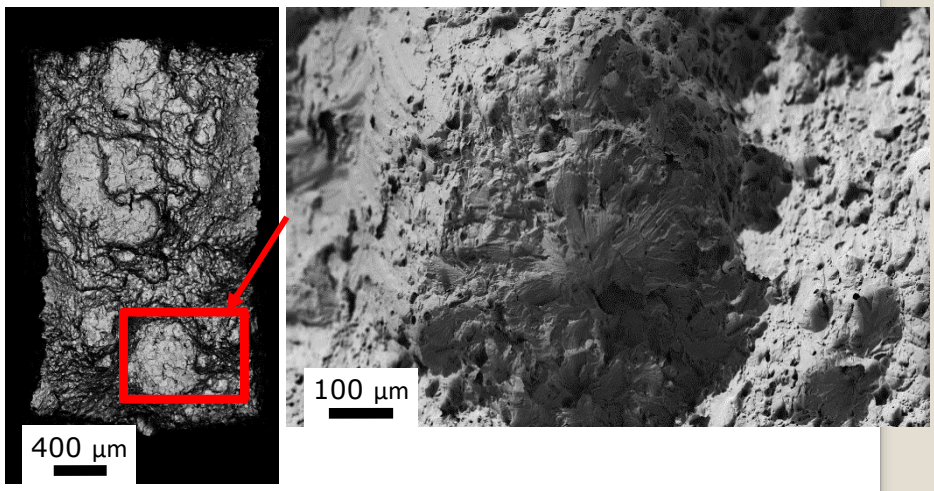
До наводороживания все стали имеют полностью вязкий излом

Влияние наводороживания на изломы вязких сталей

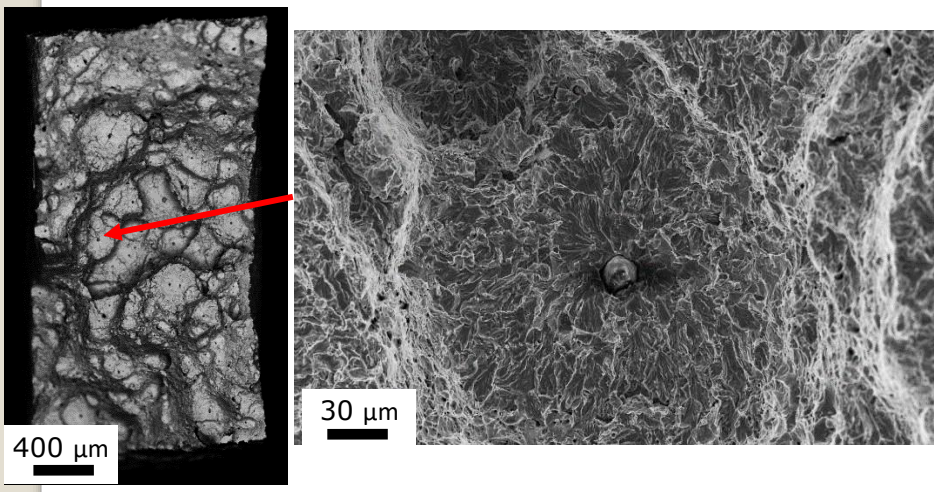
S235JR горячекатаная



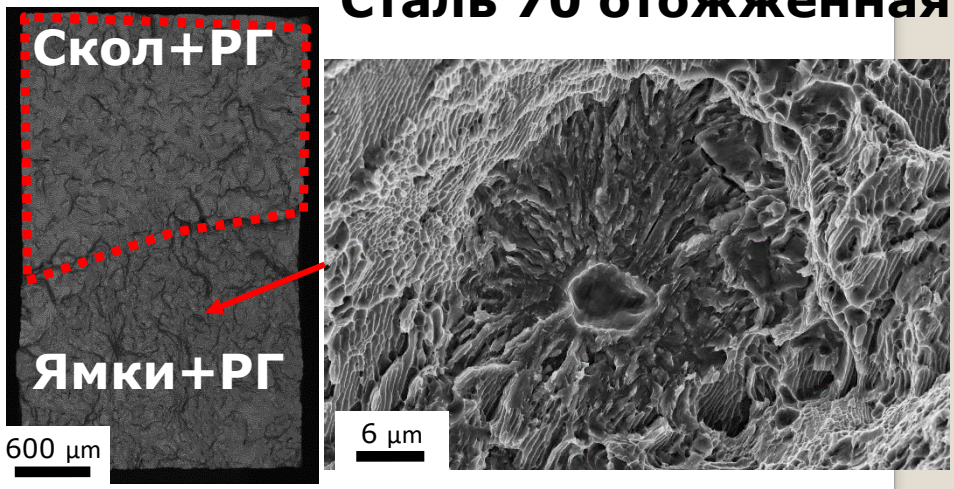
S235JR отожженная



09Г2С горячекатаная

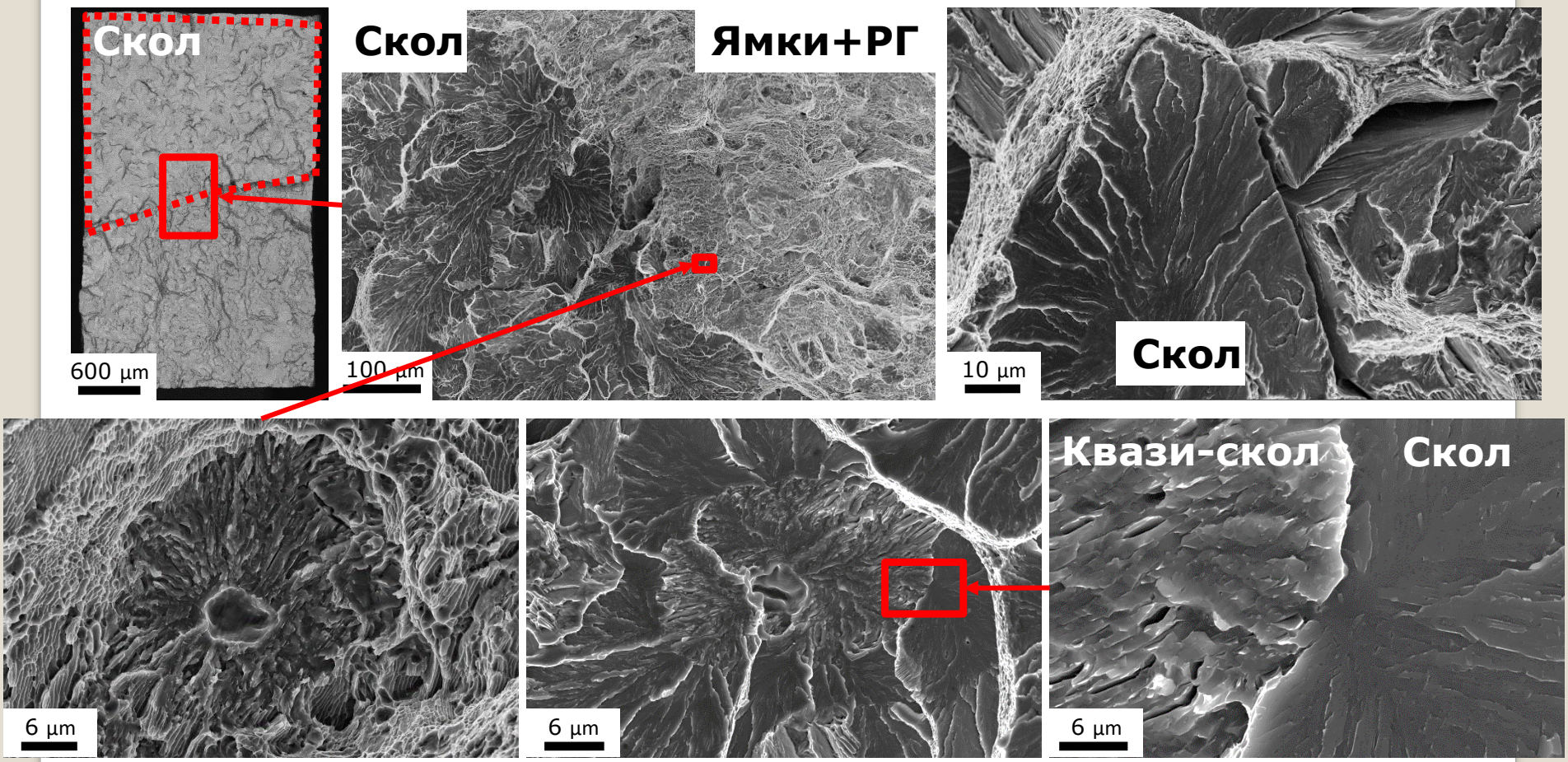


Сталь 70 отожженная



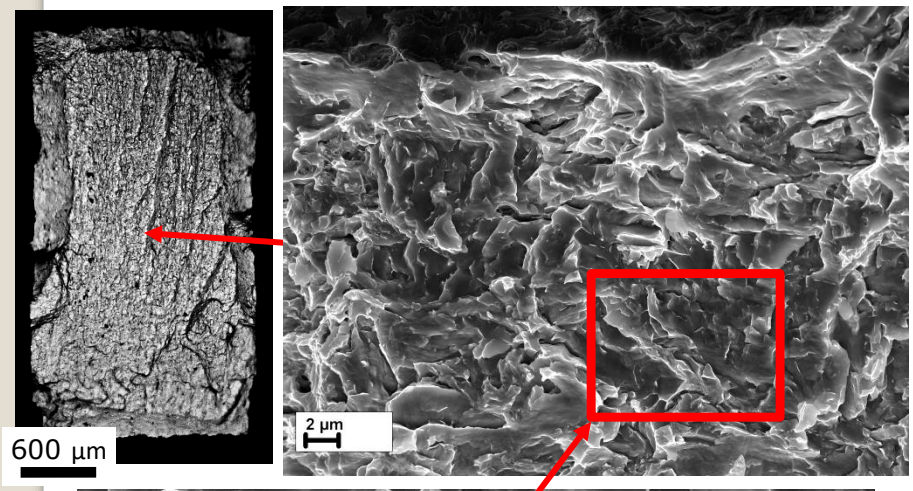
В изломах наводороженных низкопрочных сталей присутствуют дефекты «рыбий глаз»

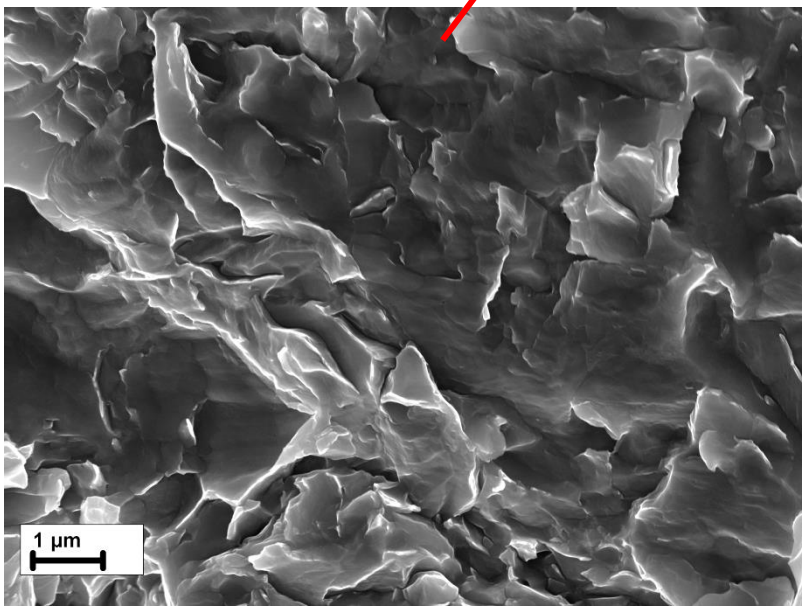
Излом отожженной стали 70



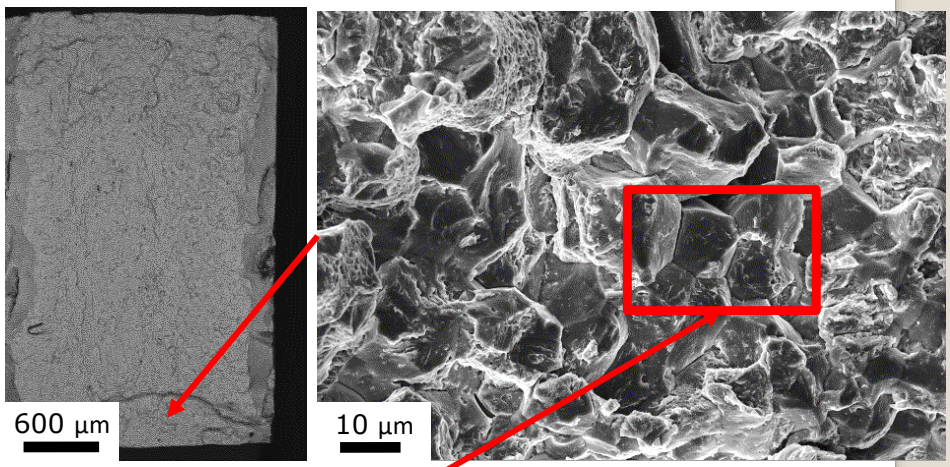
Влияние наводороживания на изломы высокопрочных сталей

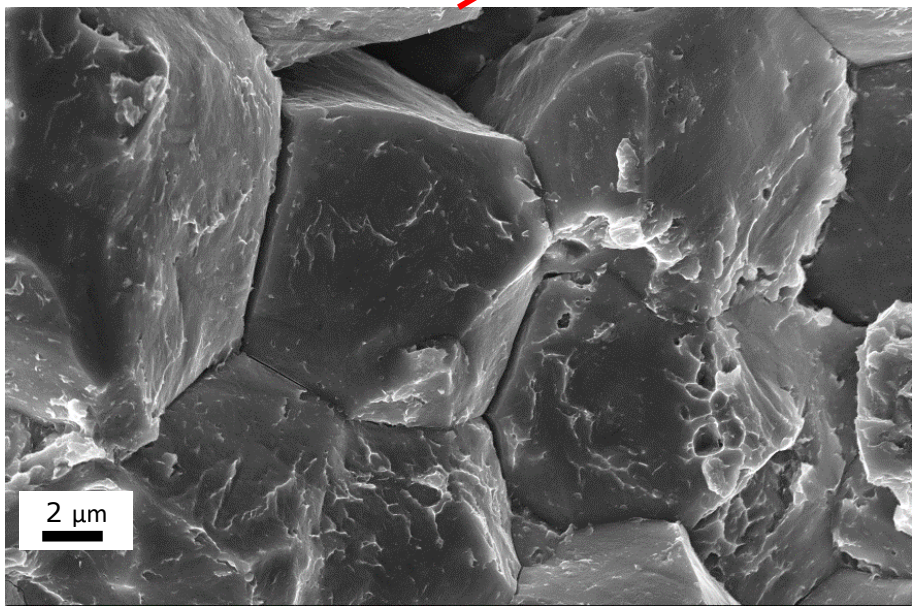
09Г2С РКУП



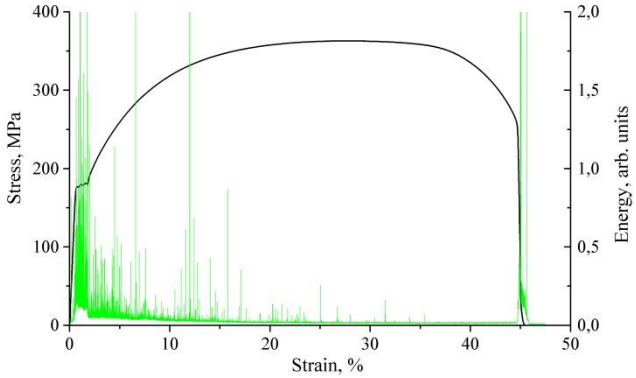
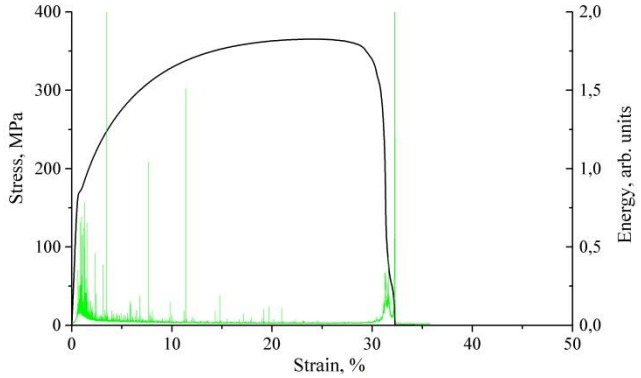
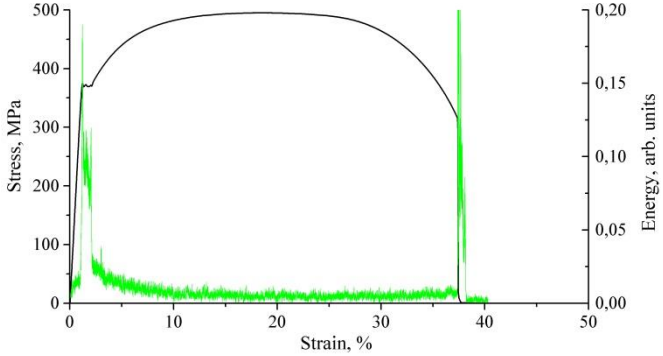
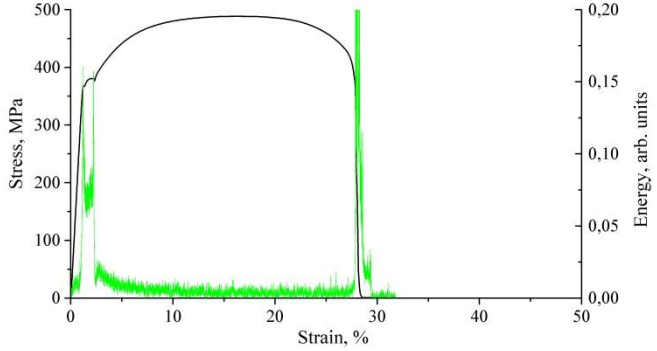
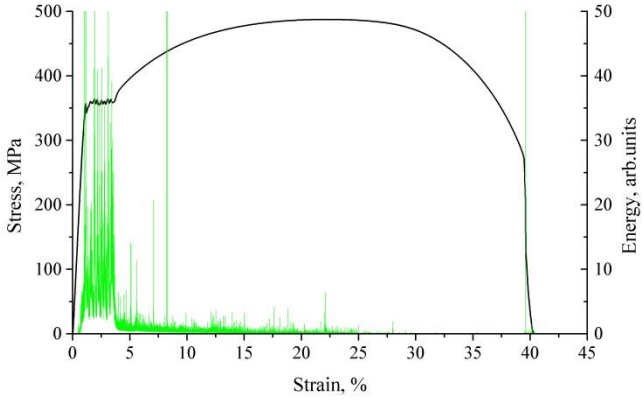
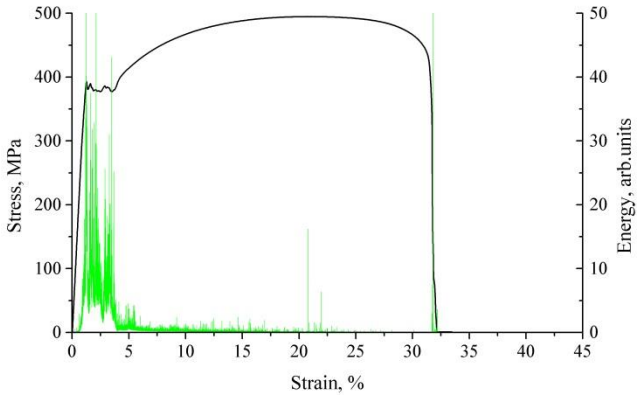


Сталь 70 Закалка+отпуск



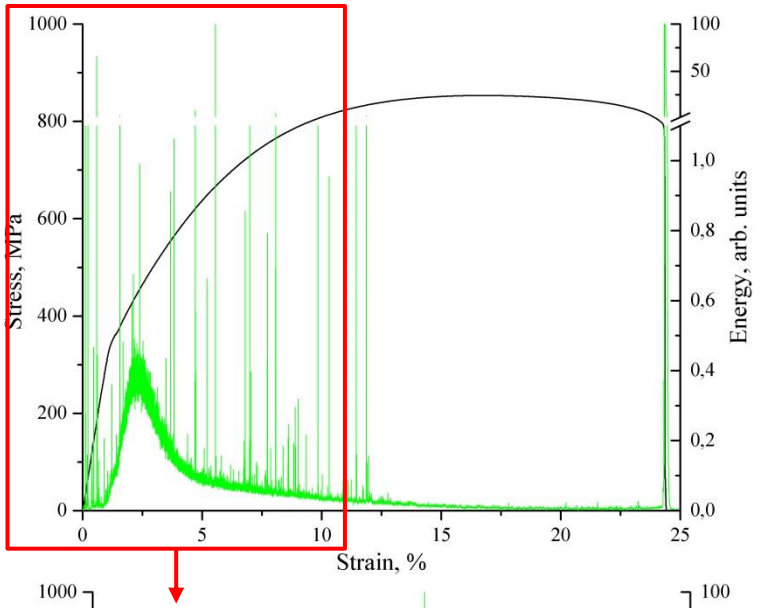


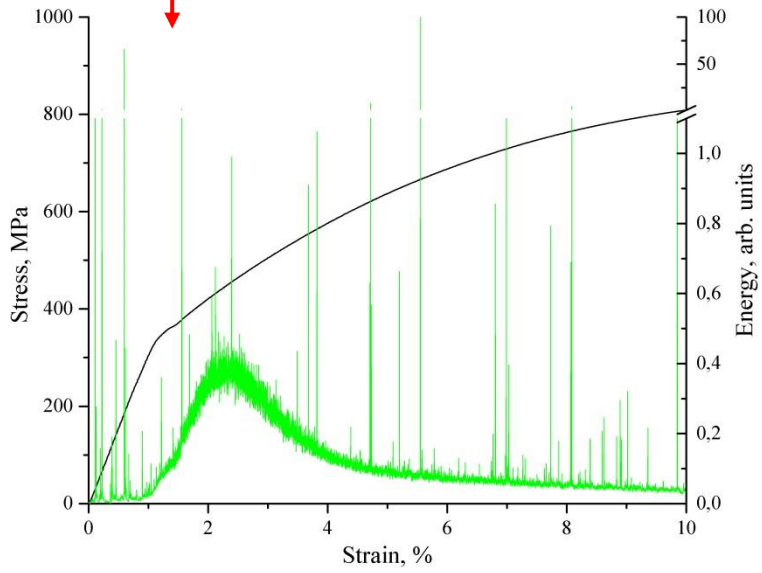
Влияние наводороживания на АЭ в вязких сталях

	До наводороживания	После наводороживания
S235JR отожженная		
S235JR горячекатаная		
09G2S горячекатаная		

Влияние наводороживания на АЭ в вязких сталях (отожженная сталь 70)

До наводороживания

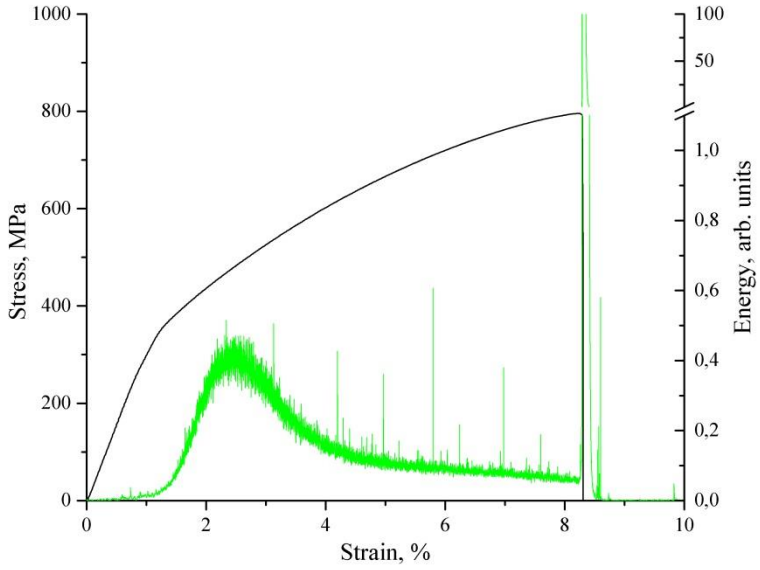




- наводороживание вязких сталей, либо не влияет на поведение АЭ, либо приводит к небольшому снижению энергии АЭ

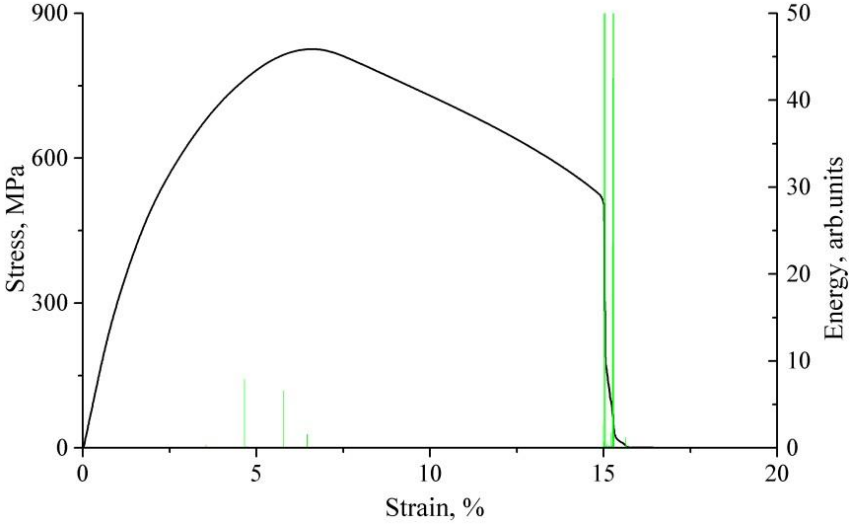
- **рост дефектов «рыбий глаз» во всех вязких сталях не сопровождается интенсивной АЭ**

После наводороживания

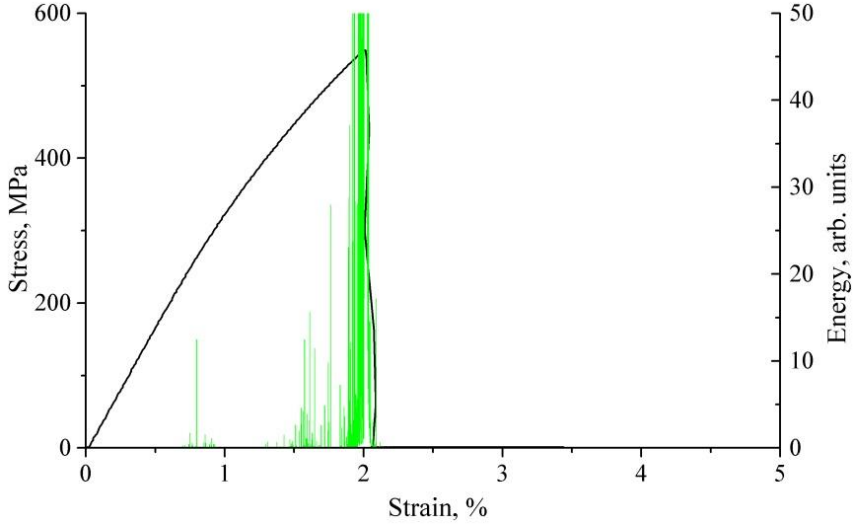


Влияние наводороживания на АЭ в хрупких сталях (09Г2С после РКУП)

До наводороживания



После наводороживания

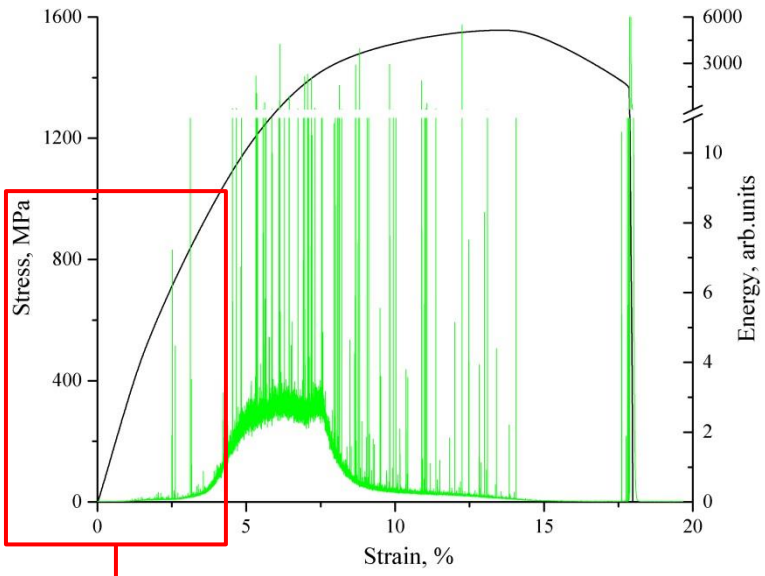


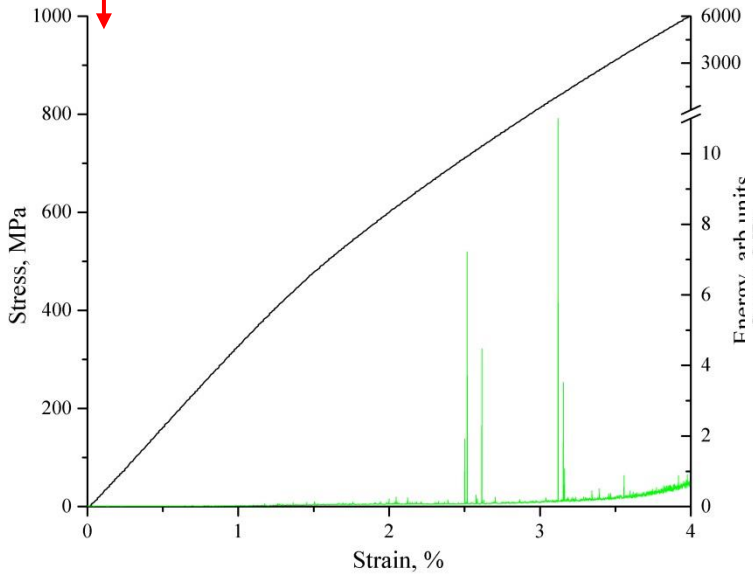
	Горячая прокатка		РКУП	
	Без водорода	После наводороживания	Без водорода	После наводороживания
ΣE_{AE}, arb. units	4.1± 1.6	4.1± 0.7	0.0022± 0.0002	90.3± 28.6

- наводороживание приводит к существенному увеличению интенсивности и суммарной энергии АЭ

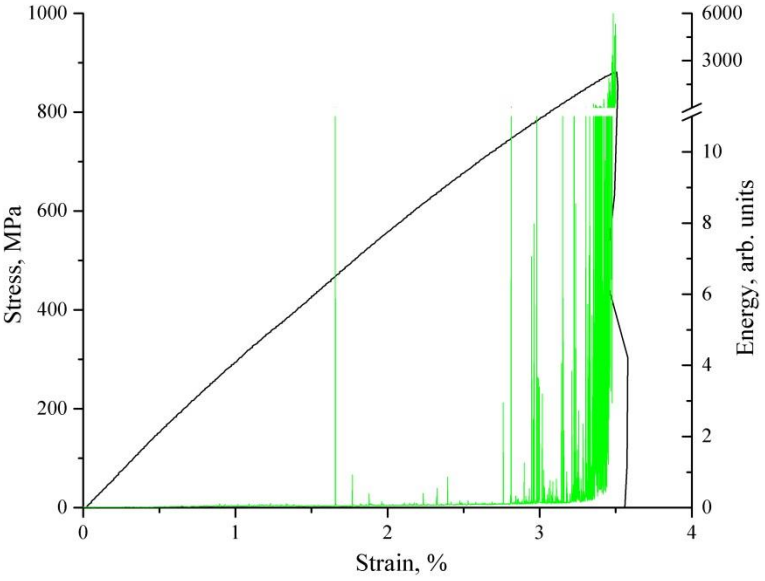
Merson E.D., Myagkikh P.N., Klevtsov G.V., Merson D.L., Vinogradov A. Effect of fracture mode on acoustic emission behavior in the hydrogen embrittled low-alloy steel // Eng. Fract. Mech. 2019. Vol. 210. pp. 342–357.

До наводороживания





После наводороживания



ВЫВОДЫ

Установлено существование двух различных механизмов водородо-ассистированного роста трещин в сплавах системы железо-углерод:

1) рост трещин по первому механизму реализуется в относительно малопрочных вязких сталях и осуществляется путем слияния нанопор, образование и рост которых стимулируется и ускоряется под действием диффузионно-подвижного водорода. Данный процесс не сопровождается интенсивной АЭ и приводит к формированию поверхности разрушения псевдо-скола, отличающейся существенной кривизной и наличием параллельных эквидистантных гребней отрыва с относительно плоскими террасами между ними.

2) Рост трещин по второму механизму реализуется в высокопрочных малопластичных сталях и осуществляется путем хрупкого отрыва вдоль кристаллографических плоскостей, межзеренных мало- или большеугловых границ, ослабленных водородом. Данный процесс сопровождается интенсивной АЭ и приводит к формированию классического межзеренного рельефа, фасеток скола или квази-скола.

Благодарю за внимание!

Контактная информация:

Мерсон Дмитрий Львович,
д.ф.-м.н., профессор, директор НИИПТ
(8482) 449-303; d.merson@tltsu.ru