



ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ
ФАКТОРОВ НА СТОЙКОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ ТРУБНЫХ
СТАЛЕЙ ПРОТИВ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ**

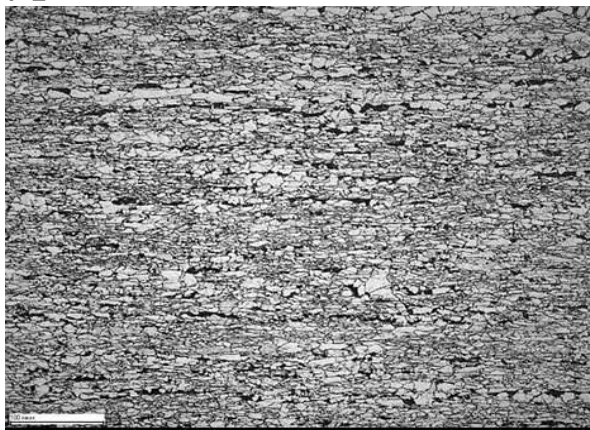
докладчик:

Удод Кирилл Анатольевич

Руководитель работы:

Родионова Ирина Гавриловна, д.т.н.

Современные трубопроводы, по сравнению с традиционными, характеризуются повышенным рабочим давлением (10-20 вместо 7,5 МПа). Повышение рабочего давления для сохранения равной надежности с традиционными МГ требует существенного увеличения толщины стенки труб (до 50 мм), что приводит к росту как металлоемкости, так и росту требований к качественным показателям, а именно: повышению прочности, ударной вязкости, хладостойкости и свариваемости. Увеличение толщины стенки трубы усложняет выполнение этих требований. Достижение высоких требований по прочностным характеристикам и ударной вязкости возможно лишь при переходе от традиционной для трубных сталей феррито-перлитной структуры к более мелкой феррито-бейнитной структуре.

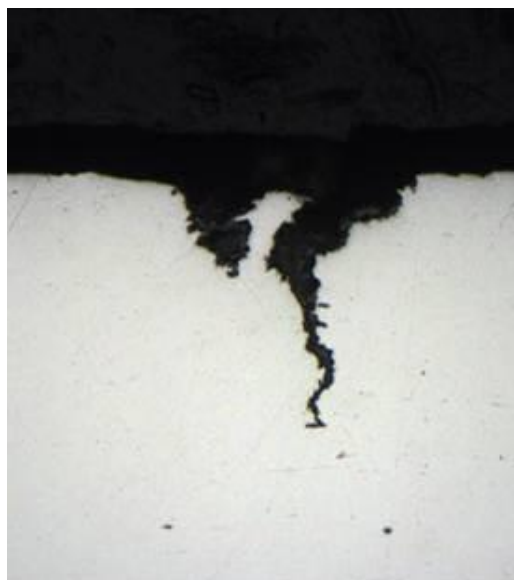
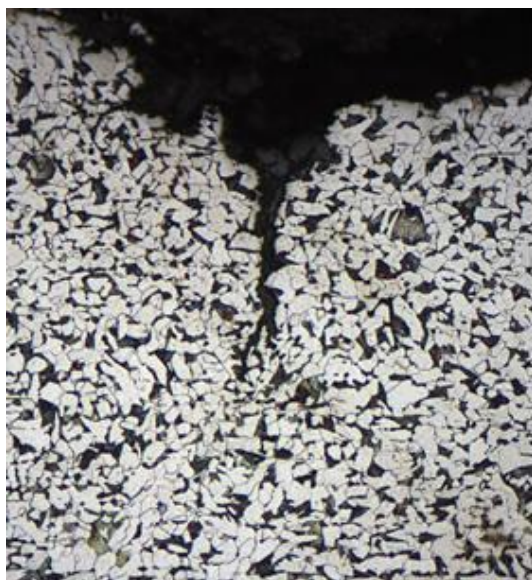


1020×12,9, Раб. Давление 7,48
Мпа, срок экспл. 29 лет



Современный прокат класса
прочности X80

Исследование образцов газопроводных труб после отказа. Зарождение трещин КРН – на очагах локальной коррозии



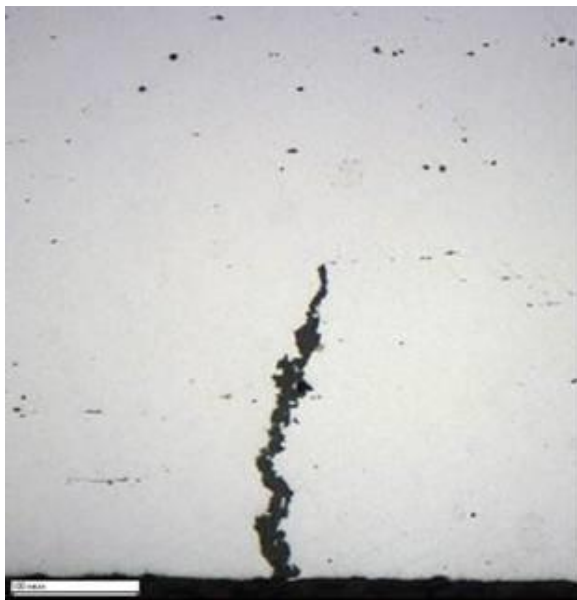
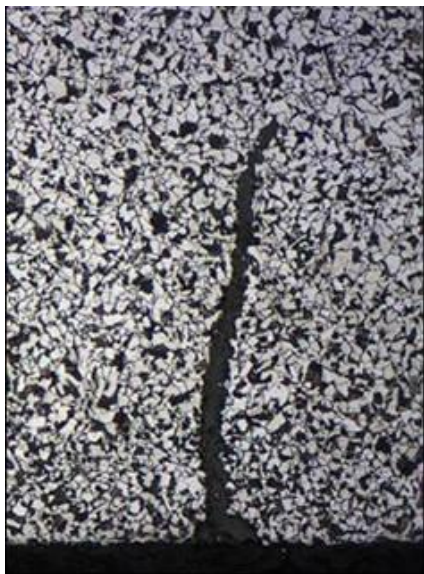
720×8,0

Раб. Давление 5,4 Мпа

Причина отказа: дефект
недопуст. глубины

Срок экспл: 26 лет

Покрытие: пленочное



1220×14,2

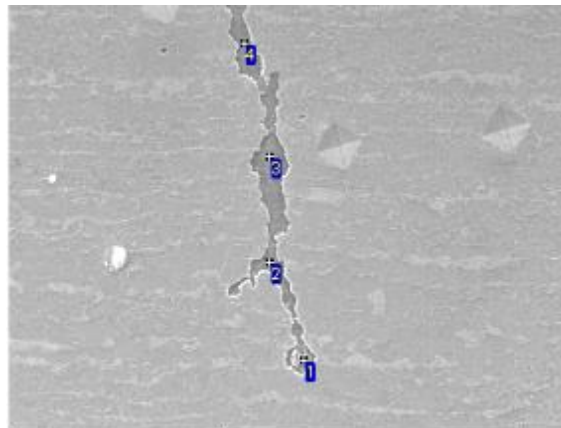
Раб. Давление 5,4 Мпа

Причина отказа: дефект
недопуст. глубины

Срок экспл: 16 лет

Покрытие: пленочное

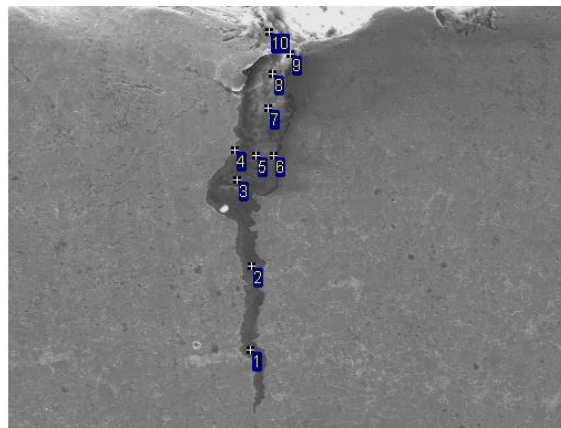
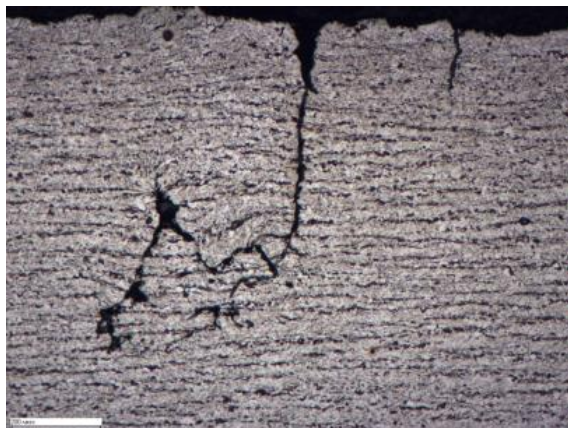
1020x16 мм, раб. Давление 7,5 МПа. Срок экпл. 33 года. Покрытие повреждено, под покрытием влага и отложения продуктов коррозии. Коррозионные повреждения в виде язв глубиной до 1 мм. ТПД – колонии трещин параллельно оси трубы. Предпослед. диагностика 2008г.: Дефектов КРН не выявлено. Последняя диагностика: 05.2013, выявлены ТПД, Махглуб.- 3 мм



№	O	Na	Al	Si	S	K	Ca	Mn
1	23.67			0.93	0.30			0.46
2	36.56	0.40		0.69		0.27		0.25
3	35.24		0.50	0.37		0.17	0.15	0.30
4	33.19		0.20	0.27				

Кроме сульфидов в осадке продуктов коррозии присутствуют Mg, Na, K и Ca – элементы, которые входят в состав почвенных электролитов

1420x17,5 мм, раб. Давление 7,5 МПа. Срок экпл. 33 года. Покрытие повреждено, под покрытием влага и отложения продуктов коррозии. ТПД сопутствуют коррозионные дефекты. ТПД – колонии трещин параллельно оси трубы. Предпол. Диагностика 2010г.: 2010 г, Коррозионные дефекты и дефекты св.швов. Последн. Диагностика: 09.2013, выявлены ТПД, Махглуб.- 1,5 мм



№	O	Na	Si	P	S	K	Ca	Mn
1	46.83				0.29		0.25	0.44
2	44.45	0.47	0.15		0.41	0.22	0.50	1.10
3	42.68			0.20	0.26	0.27	0.26	1.28
4	37.97		0.24			0.14	0.21	1.29
5	39.81		0.16				0.68	1.26
6	41.25			0.33			0.82	1.29
7	40.94			0.19	0.26	0.23	0.70	1.68
8	23.27		0.39		0.45		1.01	1.87
9	11.60	0.91	0.72	0.27	0.34		0.60	1.63
10	29.58		0.81		0.24	0.27	0.34	0.78

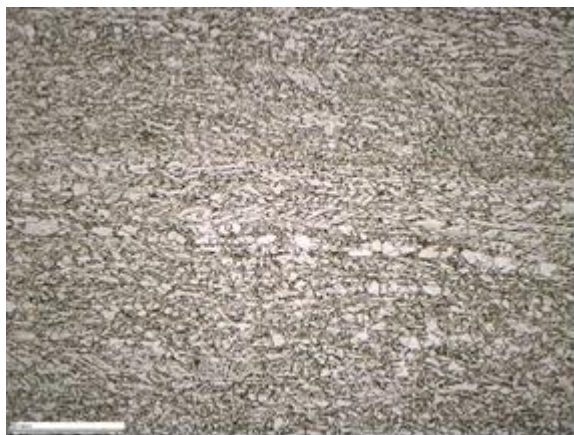
Высокое содержание серы может быть связано с развитием разрушения с участием сероводорода, что подтверждает возможность наводороживания стали в процессе локального анодного растворения

Определение металлургических и металлографических факторов исследованных сталей

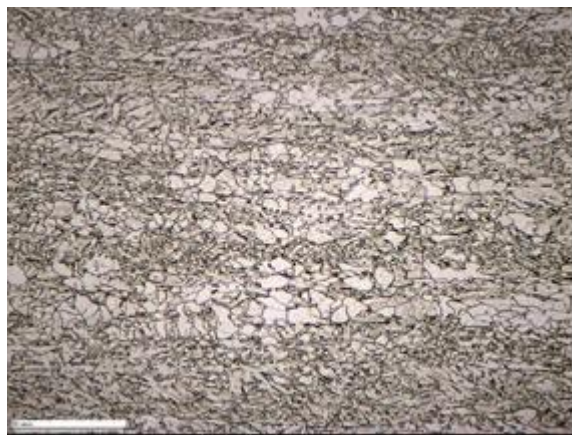
Результаты определения химического состава исследуемых сталей

№	Класс	Содержание элементов, масс. %												
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V	Nb
1	K60	0,079	0,23	1,8	0,009	0,002	0,017	0,18	0,24	0,26	0,03	0,012	-	0,027
2	K65	0,061	0,26	1,54	0,009	0,002	0,017	0,19	0,16	0,105	0,037	0,017	0,05	0,049
3	K60	0,093	0,26	1,61	0,009	0,002	0,039	0,034	-	0,06	0,037	0,016	0,08	0,04
4	K65	0,057	0,21	1,65	0,009	0,003	0,21	0,23	0,22	0,076	0,042	0,017	0,025	0,067
5	K60	0,066	0,24	1,54	0,008	0,002	0,022	0,19	0,14	0,10	0,037	0,015	0,05	0,045
6	K65	0,055	0,23	1,63	0,008	0,002	0,20	0,23	0,22	0,057	0,045	0,021	0,025	0,056

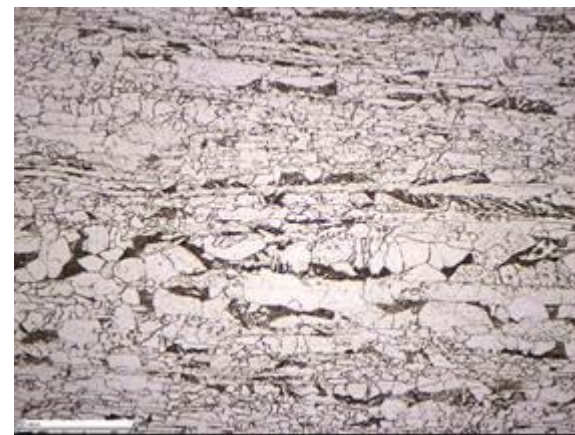
Исследование микроструктуры сталей по ГОСТ 5639



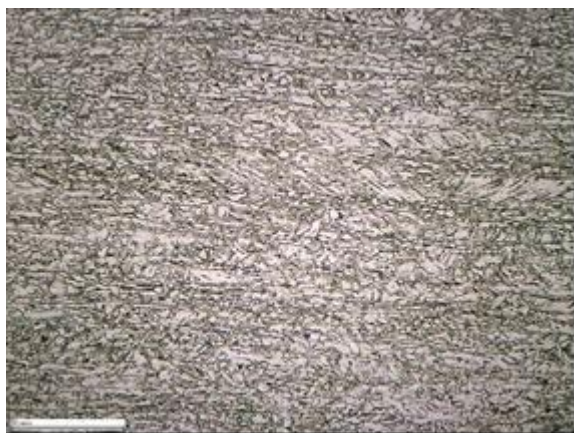
а) Образец №1, К60



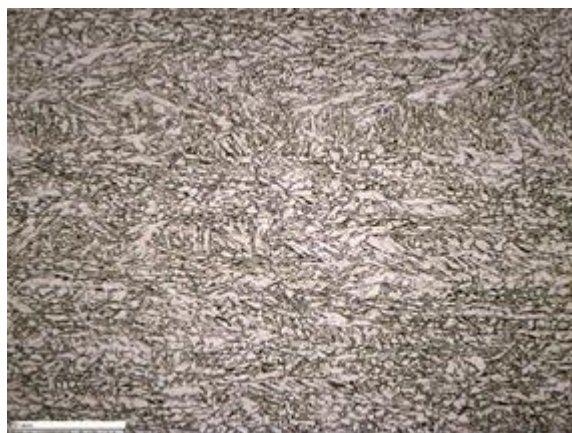
б) Образец №2, К65



в) Образец №3, К60



г) Образец №4, К65



д) Образец №5, К60



е) Образец №6, К65

Исследование сталей на загрязненность неметаллическими включениями

Результаты определения загрязненности сталей неметаллическими включениями по ГОСТ 1778

№	С	ОТ	ОС	СН	СП	СХ
1	0	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	1а
3	0	1	0	0	0	0
4	0	1	0	2а	0	0
5	0	3	0	2б	0	1а
6	0	3	0	2а	0	0

С – сульфиды

ОТ – оксиды точечные

ОС – оксиды строчечные

СН – силикаты недеформирующиеся

СП – силикаты пластичные

СХ – силикаты хрупкие

Результаты определения содержания коррозионно-активных неметаллических включений (КАНВ)

№ образца	Рабочая поверхность		Осевая зона	
	КАНВ ₁ , вкл./мм ²	КАНВ ₂ , вкл./мм ²	КАНВ ₁ , вкл./мм ²	КАНВ ₂ , вкл./мм ²
1	2,2	4,0	0,9	4,6
2	4,0	5,1	5,1	1,2
3	3,0	2,4	0,7	2,5
4	4,2	2,0	5,3	1,5
5	2,5	1,2	3,6	1,1
6	4,3	1,3	2,7	1,7

КАНВ₁ - оксиды на основе алюмината кальция

КАНВ₂ – сульфиды сложного состава

Указанные включения оказывают существенное влияние на стойкость стали против электрохимической коррозии в водных хлорсодержащих, в том числе, в нефтепромысловых средах, грунтовом электролите. Впервые отрицательное влияние КАНВ на стойкость против локальной коррозии было установлено применительно для труб нефтепромысловых трубопроводов

Электрохимические исследования сталей по «Методике определения стойкости углеродистых и низколегированных сталей против локальной коррозии», разработанной ФГУП «ЦНИИчермет им.И.П.Бардина»

Номер образца	$E_{акт}$ (при $i=0$ мА/см ²), [mV]	i , (при $E = -300$ mV), [мА/см ²]	i_{max} , [мА/см ²]	E (при i_{max}), [mV]	Класс стойкости	КАНВ ₁ , вкл./мм ²	КАНВ ₂ , вкл./мм ²	Число циклов до зарождения трещин $N_{тр}$, шт
1	-398	9,46	9,46	-300	3	2,2	4,0	52750
2	-405	9,09	9,09	-300	3	4,0	5,1	56000
3	-442	10,22	10,22	-300	3	3,0	2,4	37975
4	-410	10,22	10,22	-300	3	4,2	2,0	50000
5	-376	7,44	8,68	-320	3	2,5	1,2	57200
6	-408	7,18	7,27	-309	3	4,3	1,3	66900

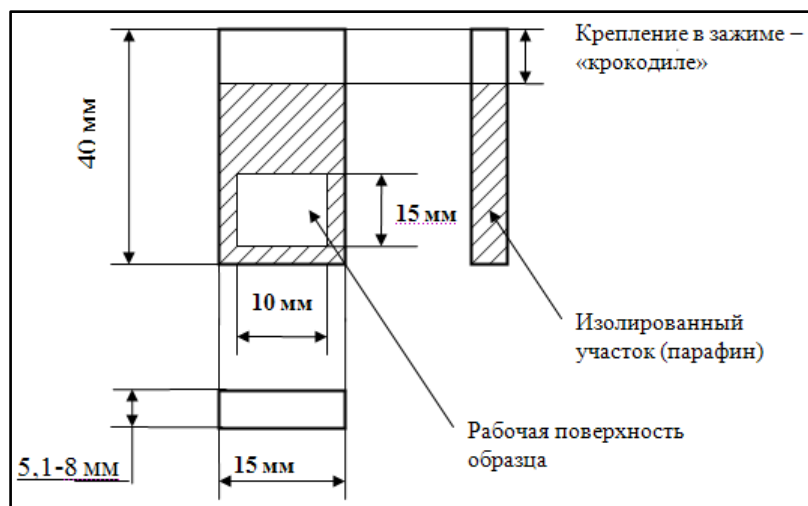
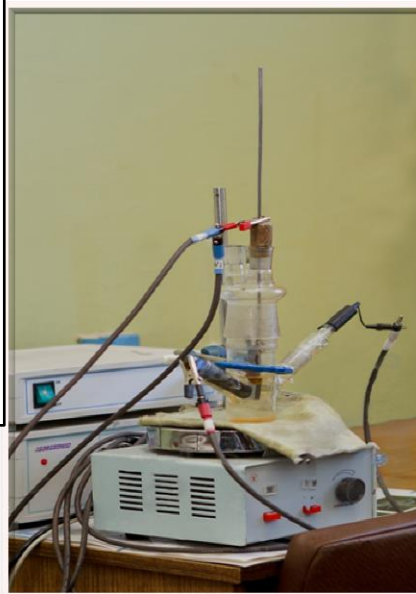


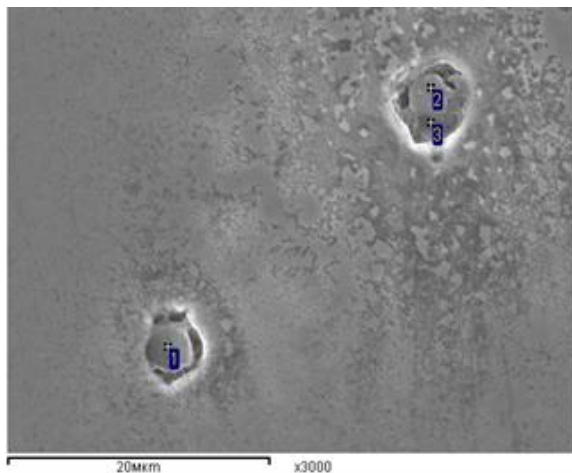
Схема образца для электрохимического измерения

Вид электрохимической ячейки в сборе



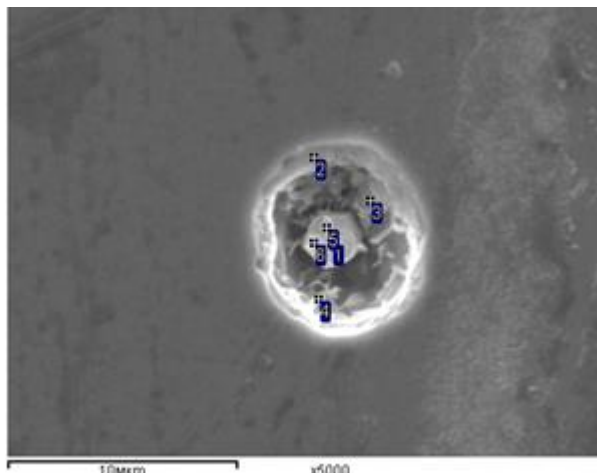
Образец до и после электрохимического измерения

Результаты энергодисперсионного исследования очагов локальной коррозии после испытаний по скорректированному вариант электрохимической методики



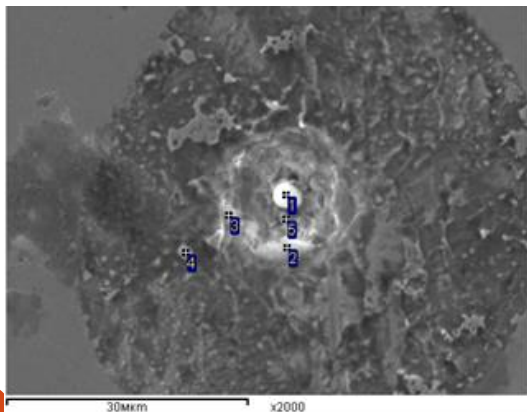
Спектр	O	Mg	Al	S	Ca
1	36.72	0.41	21.34	1.78	18.49
2	33.94	0.29	19.36	1.48	14.76
3	9.89		2.04	1.37	1.12

Образец №1



Спектр	O	Mg	Al	S	Ca
1	26.27	0.70	10.17	10.46	16.2
2	6.72		0.78	0.94	1.13
3	8.91		0.29	1.45	1.14
4	1.83	0.21	0.41	0.73	0.80
5	30.38	1.58	11.23	8.13	12.2
6	24.41	4.41	13.72	3.06	5.43

Образец №3



Образец №4

Спектр	O	Na	Mg	Al	S	Ca
1	28.32		0.57	8.00	11.73	14.45
2	21.39	0.95	0.48	0.25	0.42	0.16
3	10.72			0.75	0.83	0.21
4	2.25					
5	13.07	0.39		0.55	1.68	0.24

Скорректированный вариант методики, позволяющий фиксировать начальную стадию развития коррозионных процессов, включал:

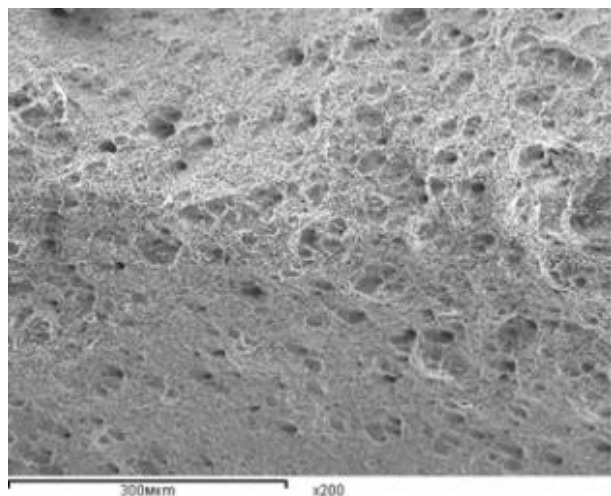
- потенциостатическую выдержку металлографического шлифа в модельной коррозионной среде в течение 5 мин, начиная от потенциала -700 мВ с шагом 5-10 мВ в сторону положительных значений, до потенциала, при котором появляется анодный ток, свидетельствующий о начале протекания коррозионных процессов.
- исследование состояния поверхности шлифа на оптическом и сканирующем электронном микроскопах с выявлением элементов структуры, на которых (или вблизи которых) начинают формироваться первые очаги коррозии,
- определение химического состава неблагоприятных элементов структуры микрорентгеноспектральным или энергодисперсионным анализом.

Исследование влияния металлургических, металлографических факторов на склонность стали насыщаться водородом при взаимодействии с почвенным электролитом

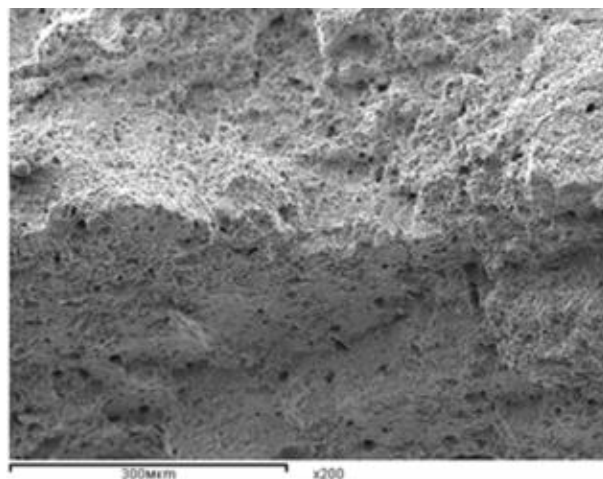
Способ наводороживания: при циклических испытаниях по методике ОАО «Газпром» в коррозионной среде (раствор NS_4)

Исходное состояние

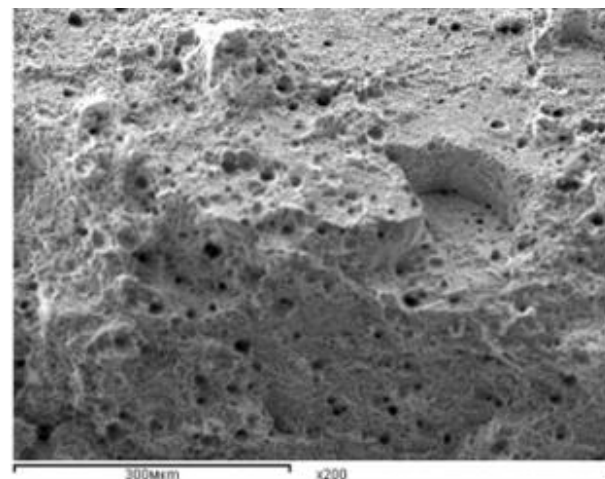
После наводороживания в среде раствор NS_4



Образец №4



Образец №3

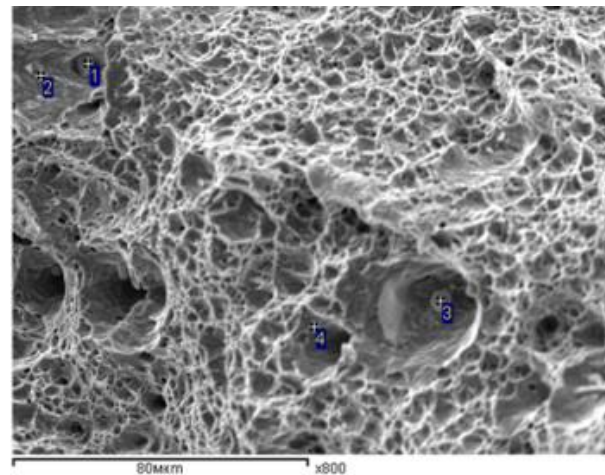
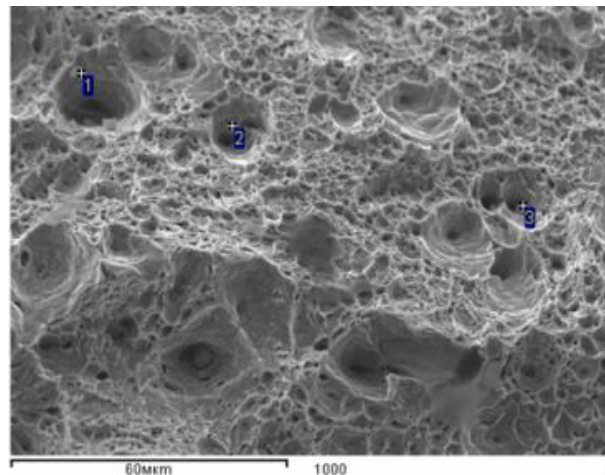
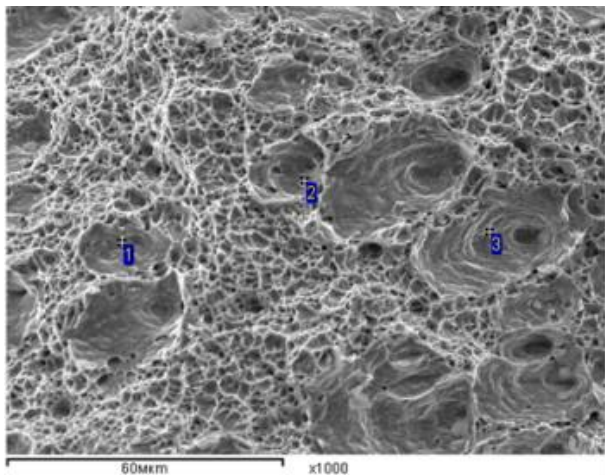


Образец №4

Исследование изломов образцов сталей после наводороживания для обнаружения ловушек водорода

Исходное состояние

После наводороживания в среде раствор NS_4



№	Mg	Al	S	Ca	Mn
1	1.19	1.13	16.19	2.50	23.28
2	0.85	2.71	20.81	4.54	25.17
3	0.00	1.30	0.00	0.55	18.44

№	Mg	Al	S	Ca	Mn
1	0.46	0.00	30.91	15.33	28.53
2	0.00	0.00	0.30	5.30	35.94
3	0.00	0.00	14.08	7.4	17.26

№	Mg	S	Ca	Mn
1	0.00	1.88	20.84	27.76
2	0.85	17.74	19.25	16.10
3	0.00	35.60	29.80	17.81
4	1.44	26.23	7.93	32.06

Образец №4

Образец №4

Образец №3

Комплексные включения с повышенным содержанием сульфида марганца, в том числе

КАНВ, являются эффективными ловушками поступающего в сталь водорода

Выводы

- ❑ По результатам исследования образцов труб с дефектами КРН подтверждена взаимосвязь появления трещин КРН с локальной коррозией при контакте металла с почвенным электролитом
- ❑ Показано, что наряду с факторами, определяющими влияние на КРН напряженного состояния, состава и концентрации грунтового электролита, существенным фактором, определяющим возможность зарождения коррозионно-механических трещин на поверхности труб при взаимодействии с почвенным электролитом, является наличие в металле коррозионно-активных неметаллических включений (КАНВ).
- ❑ Развитие КРН современных труб сталей по механизму водородного охрупчивания вызывают:
 - ✓Повышенное содержание выделений сульфида марганца;
 - ✓Содержание КАНВ1 (особенно, при значении плотности КАНВ >5 вкл/мм²);
 - ✓повышенная загрязненность стали традиционными неметаллическими включениями (более 2 балла).

Спасибо за внимание!