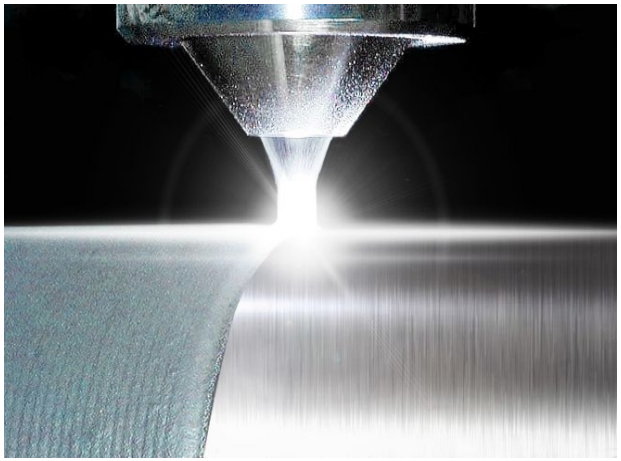
ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПЛАВОК НАНОСИМЫХ НА ДЕТАЛИ УСТЬЕВОГО И ФОНТАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЗОНАХ К1, К2, К3

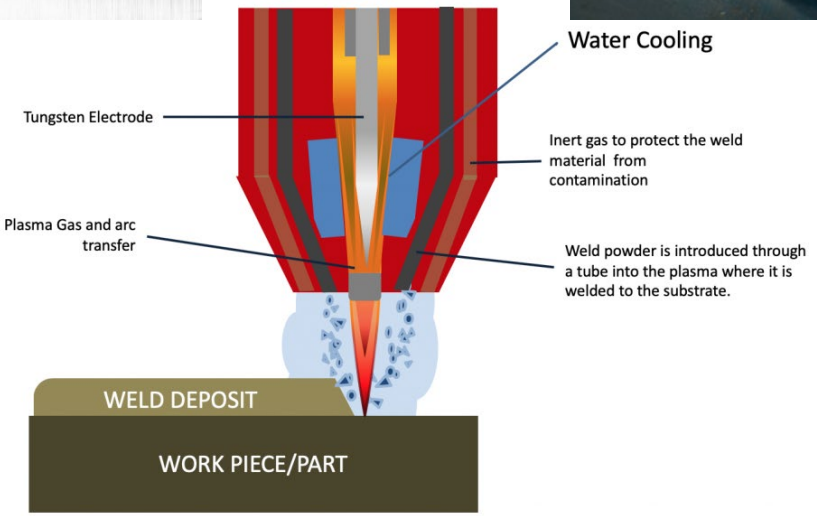
Докладчик:
Ведущий инженер отдела исследования металлопродукции
ООО «ИТ-Сервис»
Гукин Антон Евгеньевич

Виды исследуемых наплавок

ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА (PTA - Plasma Transferred Arc)





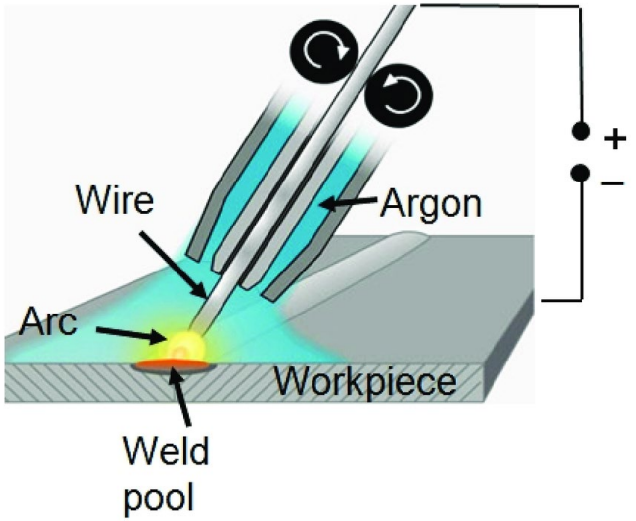


Виды исследуемых наплавок

Автоматическая аргонодуговая наплавка плавящимся электродом (MIG - Metal Inert Gas)







Химический состав

Химический состав применяемых наплавок

Образец	Содержание элементов, масс.%													
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	B	Nb+Ta	Al	Co
ПР-НХ16СР3	0,60	3,11		0,003	0,010	15,14	осн				2,31			
Св-07Х25Н12Г2Т	0,10	0,51	1,65	0,008	0,023	23,20	12,9	0,17	0,14	0,65				
ER309LSI	0,02	0,76	2,07	0,011	0,012	23,60	13,6	0,03	0,04					
Св-06Х15Н60М15	0,04	0,47	1,77	0,004	0,001	14,46	Осн.	14,45						
ERNiCrMo-3	0,03	0,17	0,03	0,003	0,001	20,53	63,6	8,97		0,18		4,02	0,18	
Inconel 625	0,05	0,3	0,12	0,002	0,002	20,7	62,0	8,65		0,17		3,5	0,17	0,01

Химический состав применяемой основы

Образец	Содержание элементов, масс.%							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
F6NM	0,02	0,30	0,69	0,008	0,016	12,6	4,11	0,60
4130 Mod	0,29	0,26	0,74	0,003	0,005	1,03	0,37	0,17
30ХМА	0,33	0,22	0,45	0,007	0,008	0,86	0,14	0,18

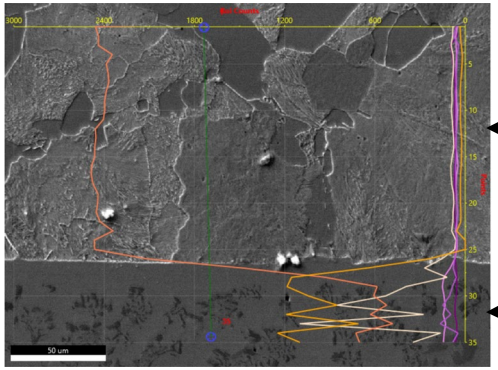
Критерии приемки

Критерии твердости по ISO 15156-2:
Основной металл и зона термического влияния для наплавленных сл
не более 250 HV или 22 HRC

Критерии твердости по ISO 15156-3:
Основной металл не более 23 HRC

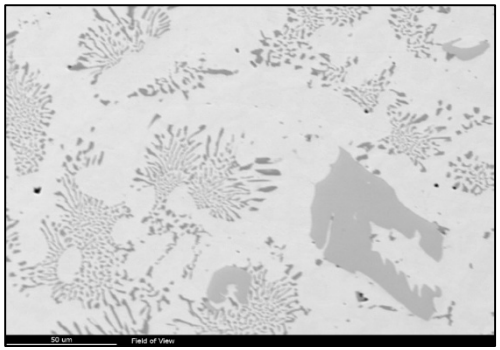
Критерии визуального контроля по ISO 15614-7:
- для коррозионностойкой наплавки трещины и другие линейные дес
не допускаются, поверхностные поры не допускаются;
- для износостойкой наплавки линейные дефекты не допускаются,
допускаются поверхностные поры не более 2 мм.

ПР-НХ16СР3 + 30ХМА



30ХМА

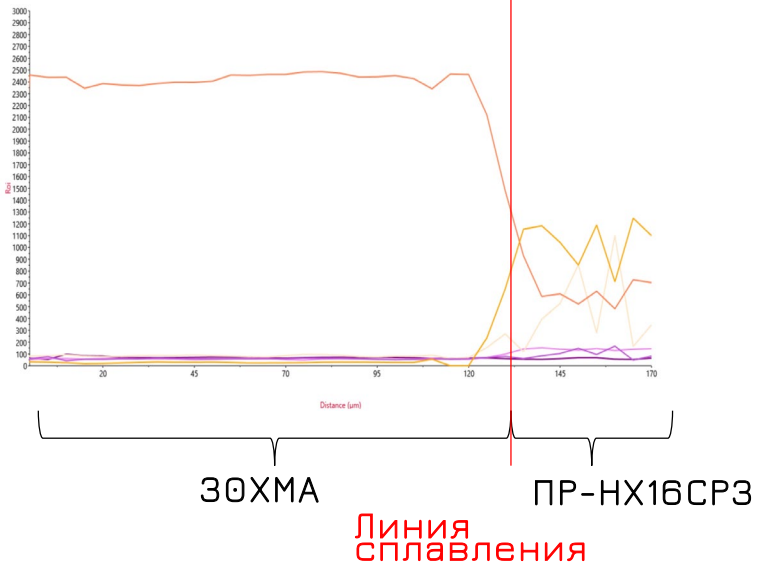
ПР-НХ16СР3



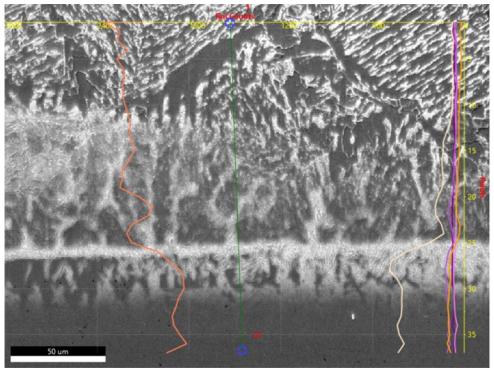
Микроструктура наплавки







07Х25Н12Г2Т + 30ХМА



30ХМА

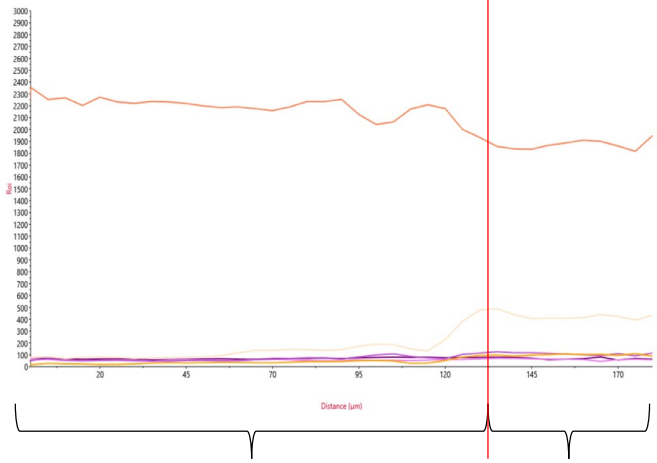
07Х25Н12Г2Т



Микроструктура наплавки





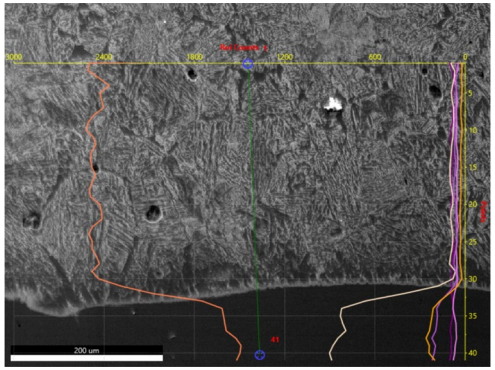


30ХМА

07Х25Н12Г2Т

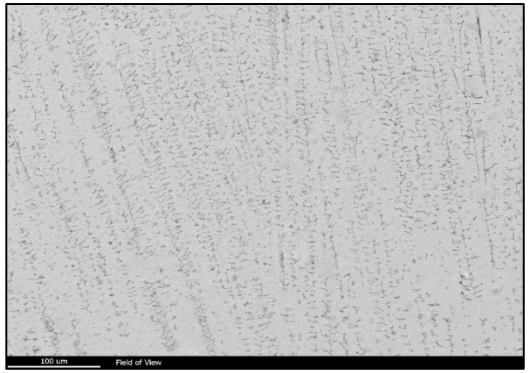
Линия сплавления

ER309LSI + 30ХМА



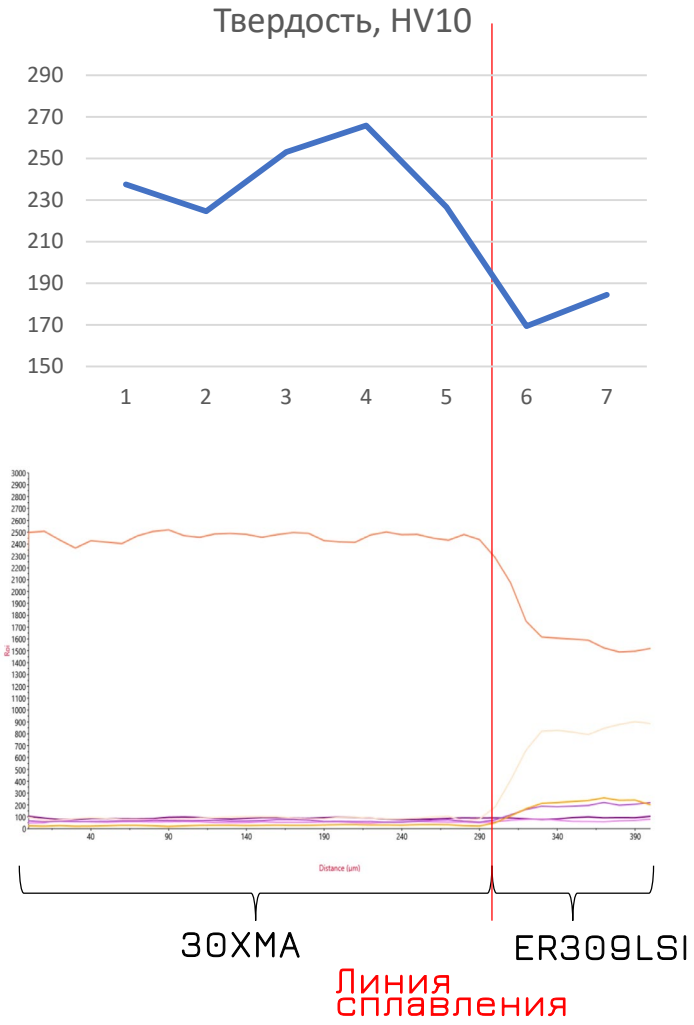
30ХМА

ER309LSI

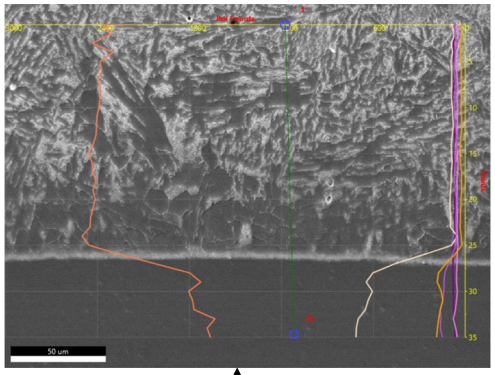


Микроструктура наплавки





06Х15Н60М15 + 30ХМА



30ХМА

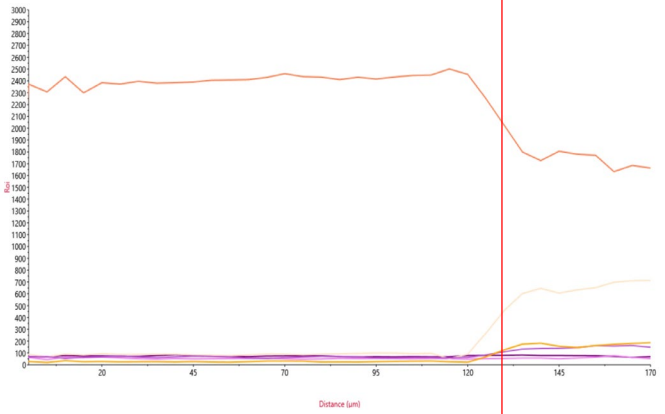
06Х15Н60М15



Микроструктура наплавки





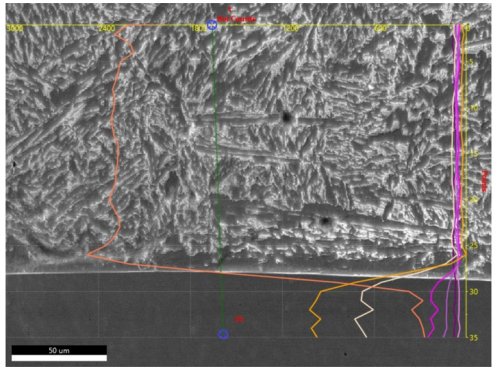


30ХМА

06Х15Н60М15

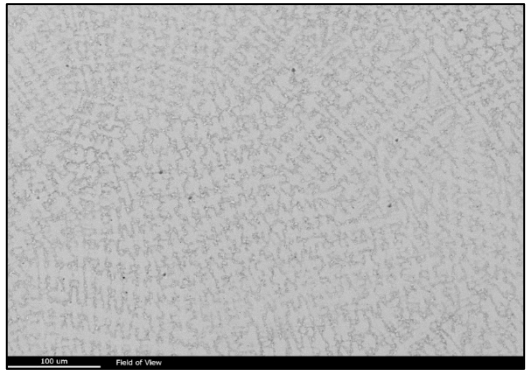
Линия сплавления

ERNiCrMo-3 + 30ХМА

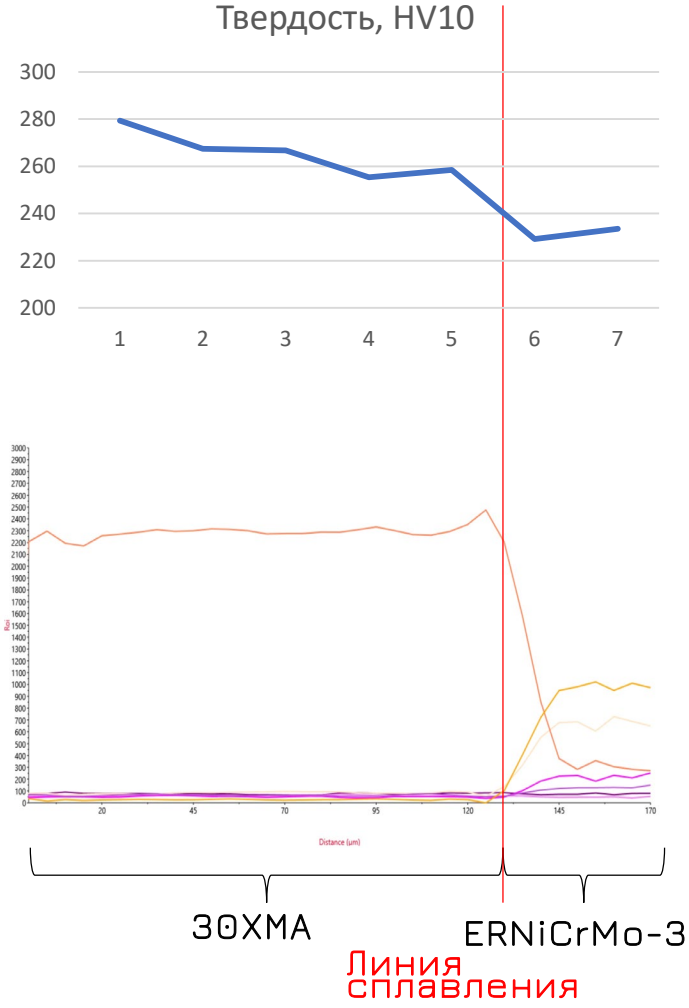


30ХМА

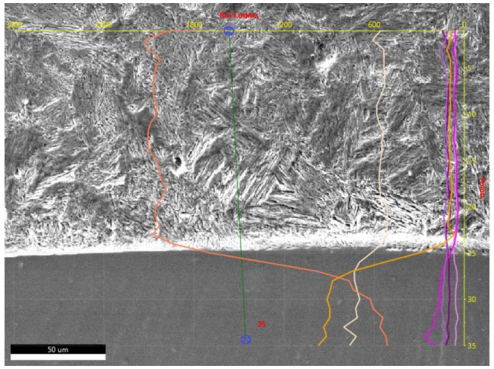
ERNiCrMo-3



Микроструктура наплавки

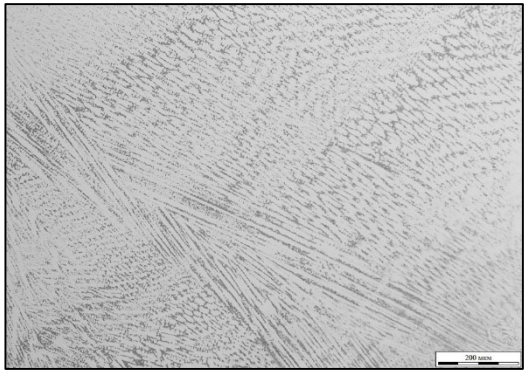


Inconel 625 + F6NM



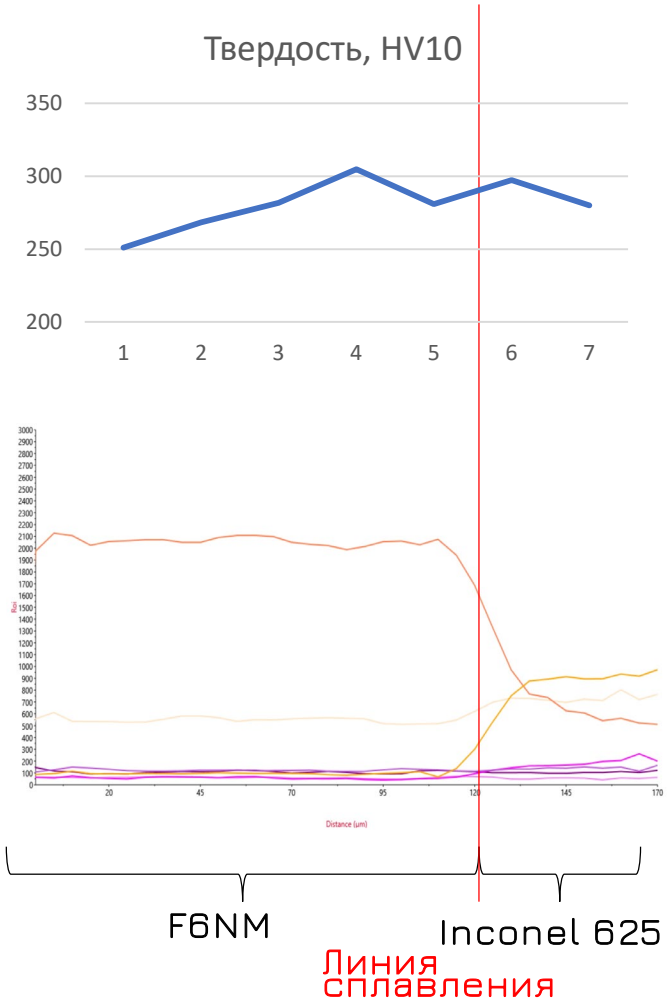
F6NM

Inconel 625

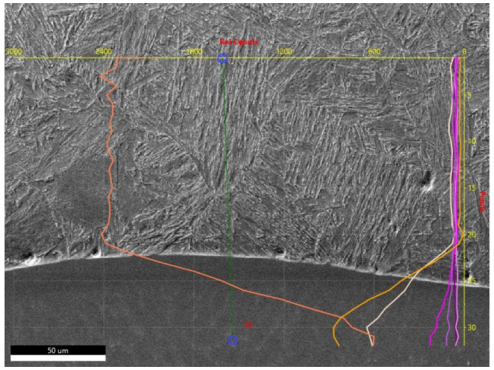


Микроструктура наплавки



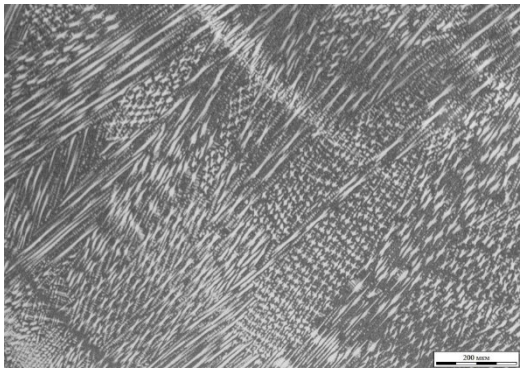


Inconel 625 + 4130 mod

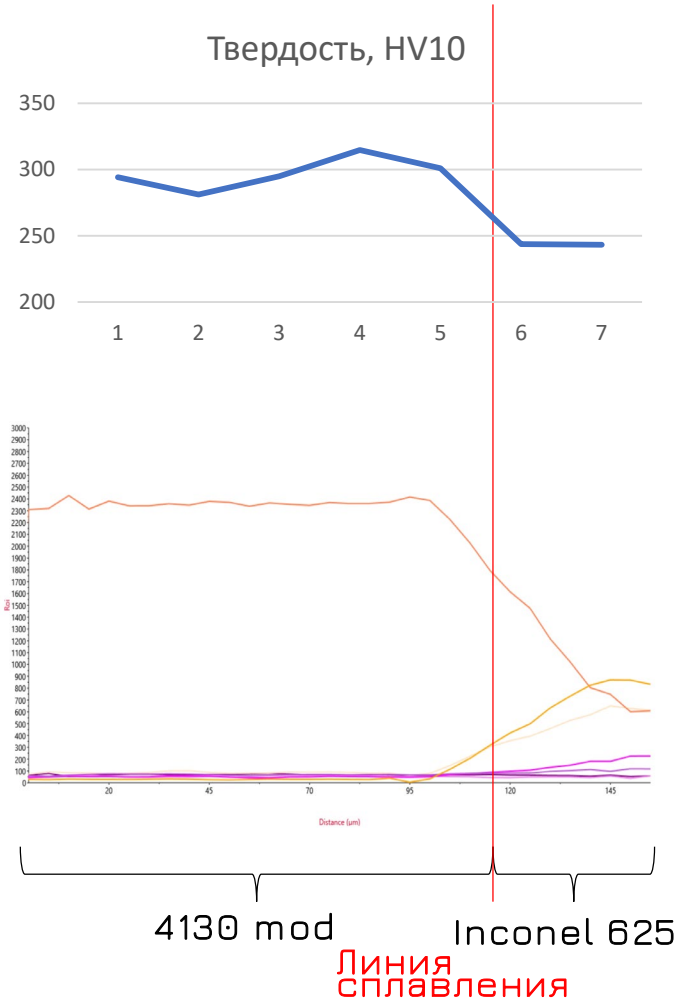


4130 mod

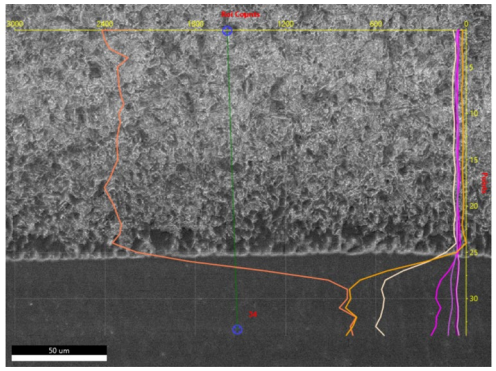
Inconel 625



Микроструктура наплавки

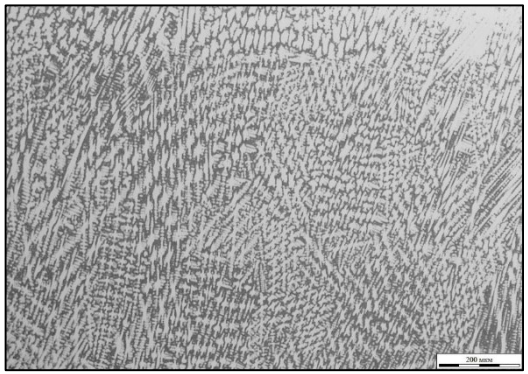


Inconel 625 + 4130 mod



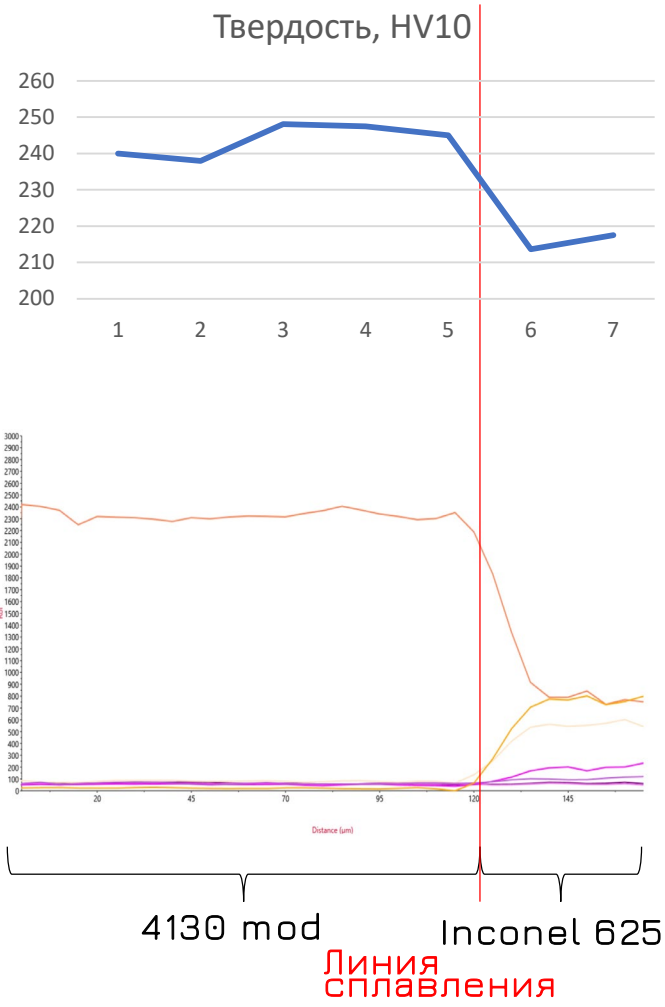
4130 mod

Inconel 625

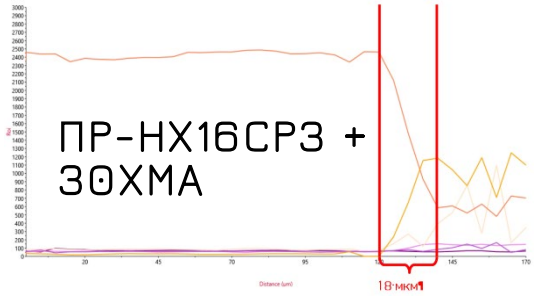


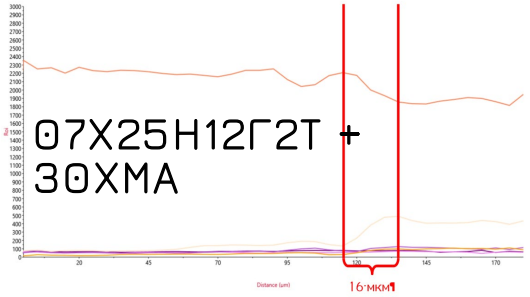
Микроструктура наплавки

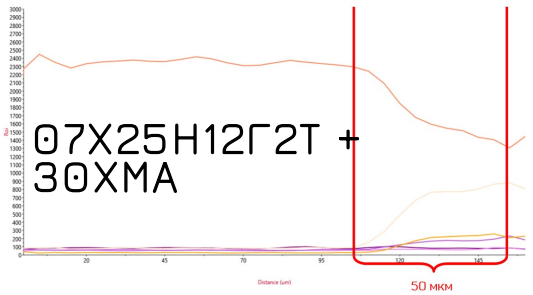


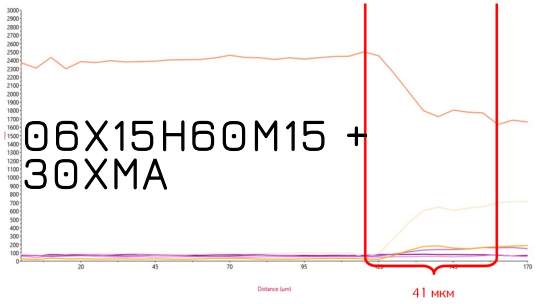


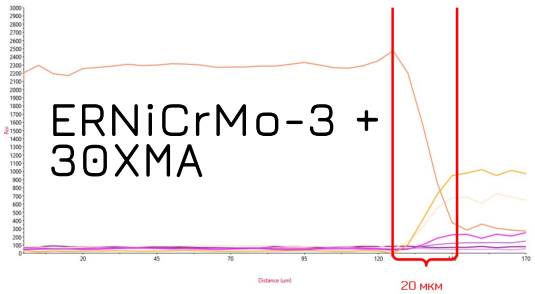
Ширина переходной зоны на наплавках

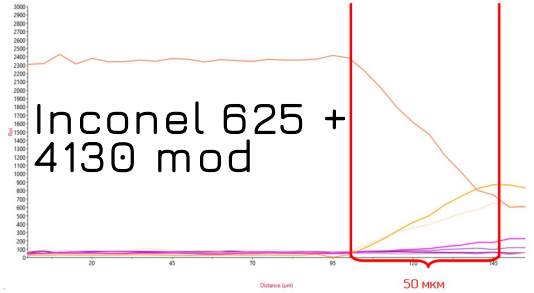


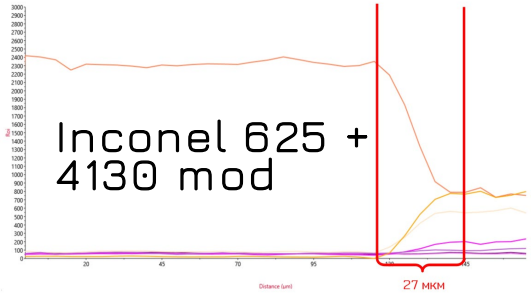












Выводы

- При наплавке разных материалов образуется переходная область ширина которой зависит от химического состава и технологии нанесения;
- Данная переходная область характеризуется промежуточным химическим составом и высокой твердостью;
- Микроструктура в большинстве случаев представлена мартенситом, характеризующимся хрупкостью.

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Оценка коррозии различных классов прочности на примере трубной стали 08Х1ГБФ

Ющук Вячеслав Васильевич

Аспирант 4 года обучения кафедры МиФП (НИТУ МИСИС)

Научный руководитель, к.т.н., доцент, заведующий НИЛ «ГНМ»

Комиссаров Александр Александрович

Место проведения: г. Самара (ИТ-Сервис)

Дата проведения: 03-04.09.2025 г.

Актуальность работы



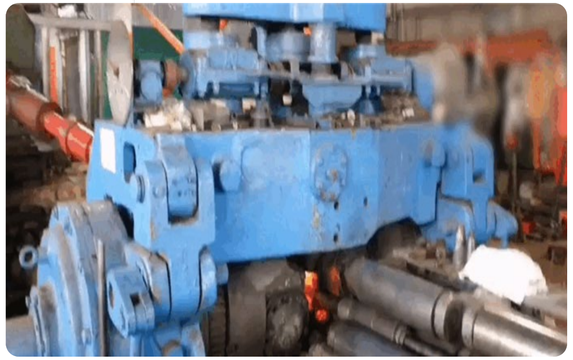


Коррозионное разрушение нефтегазопроводных и нарезных труб

Химический состав стали и технология производства

Химический состав лабораторной стали, массовая доля, %

Обозначение	Марка стали	C	Si	Mn	Легирующая система
Э1	08Х1ГБФ	0,08	0,23	0,72	Mn+Nb+V = 0,81



Процесс горячей винтовой прошивки на стане «МИСИС 130Д»



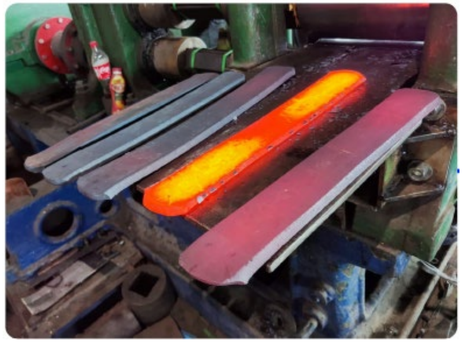
После горячей винтовой прошивки гильзы остывали на воздухе, а затем разрезались на сегменты



Нагревательная печь

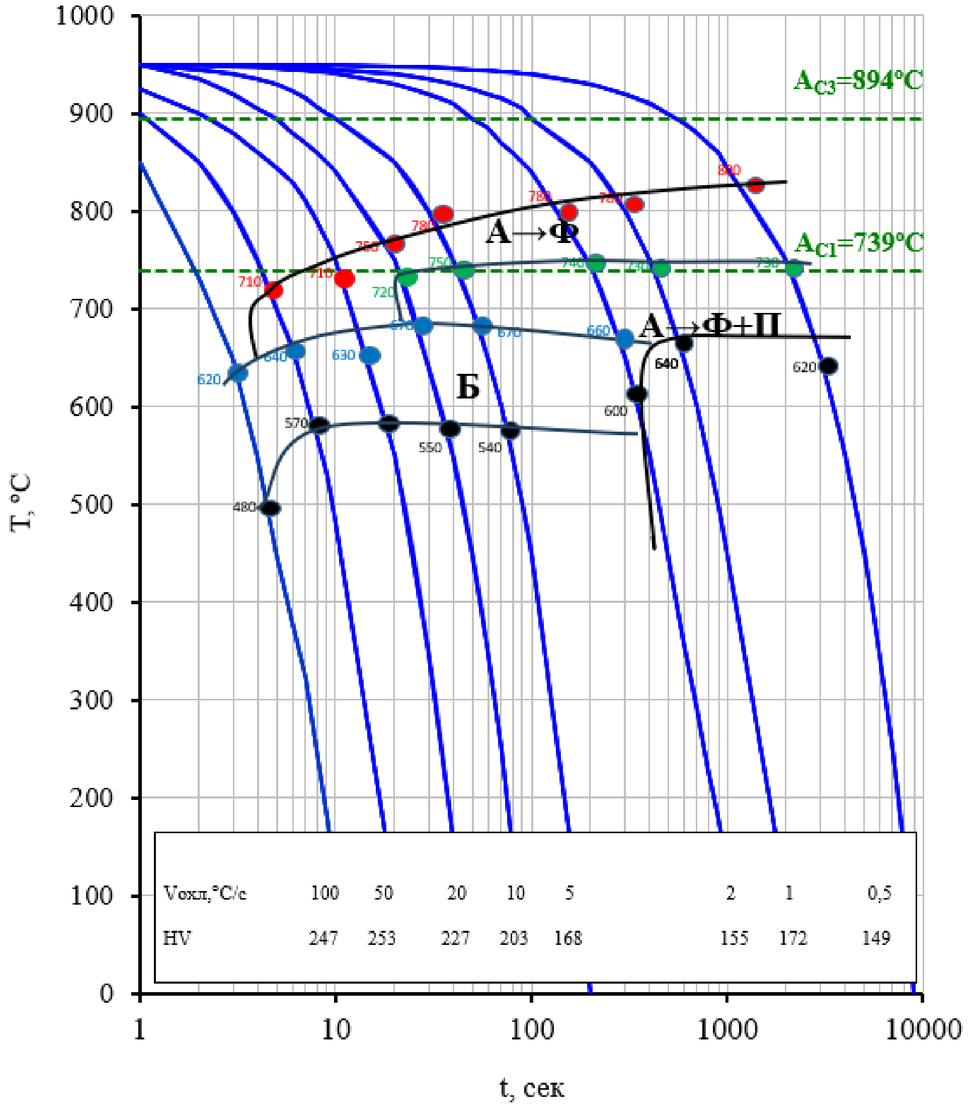


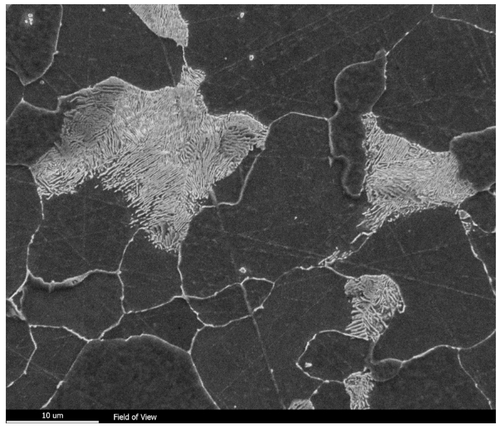
Универсальный стан продольной прокатки «ДУО-210»



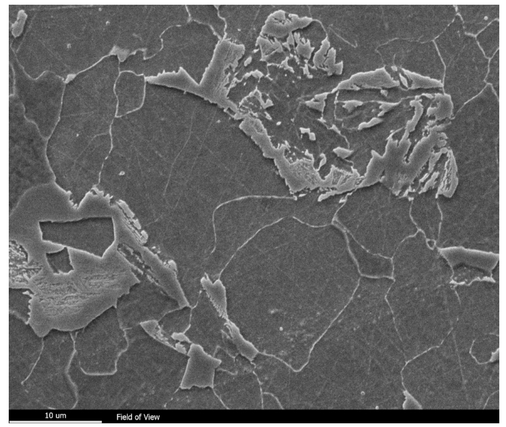
Образцы после прокатки

Внешний вид термокинетической диаграммы стали Э1 при непрерывном охлаждении

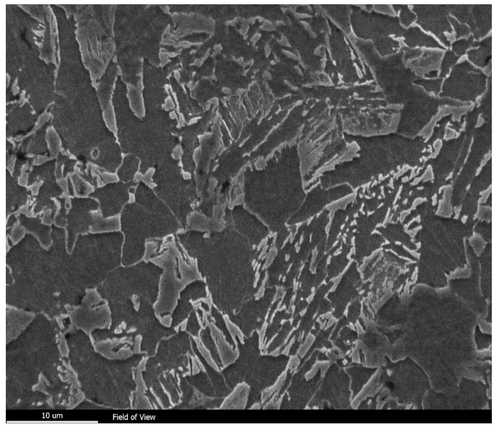




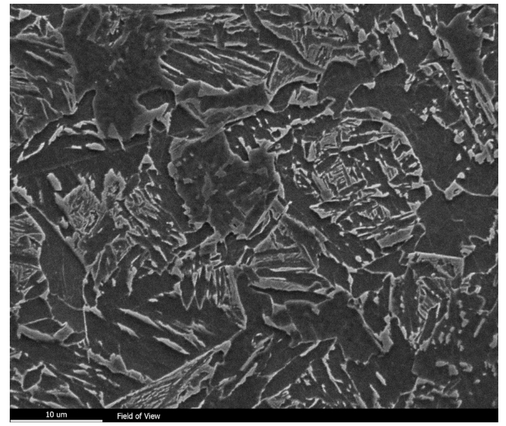
а)



б)



в)



г)

а – 0,5 °C/сек; б – 5 °C/сек; в – 20 °C/сек; г – 100 °C/сек;

Изображения микроструктуры стали Э1 при различных скоростях охлаждения при дилатометрическом исследовании, увеличение х5000

Результаты механических испытаний после различных режимов термической обработки

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Механические свойства стали после термической обработки

Образец	Вид ТО			*Предел текучести $\sigma_т$, МПа	*Предел прочности $\sigma_в$, МПа	*Относительное удлинение δ, %	*Ударная вязкость KCV^{-60}, Дж/см^2	*Микротвердость, HV
	Режим закалки		Температура отпуска, °С					
	Температура, °С	среда						
Э1 (A_{C3} = 894 °С, A_{C1} = 739 °С)	910	вода	550 (L80)	644	733	16	236	248
			600 (K60)	611	696	18	244	241
			650 (K60)	499	600	20	307	225
Нормируемые значения для классов прочности			K60	460-578	590-708	≥20	-	≤250**
			L80	552-655	≥655	≥11	-	≤255***

Примечание: *минимальное получаемое значение, **Требования ПАО «Газпром», ***Требования НК «Роснефть»

Методика коррозионных испытаний в многокомпонентной среде



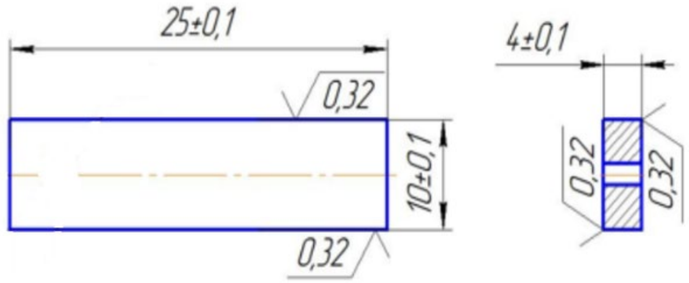




Установка для проведения коррозионных испытаний в многокомпонентной среде, содержащей CO_2 и H_2S

Параметры проведения коррозионных испытаний

Время испытания: 240 ч.
Среда испытания: CO_2 и H_2S
Давление газа: 0,5/0,5 атм.; 0,9/0,1 атм.
$T_{исп}$: 50 °C
Модельные растворы: 5, 25%-ый раствор NaCl дистиллированной воды, насыщенный газовой баллонной смесью CO_2 и H_2S



Геометрические характеристики образцов

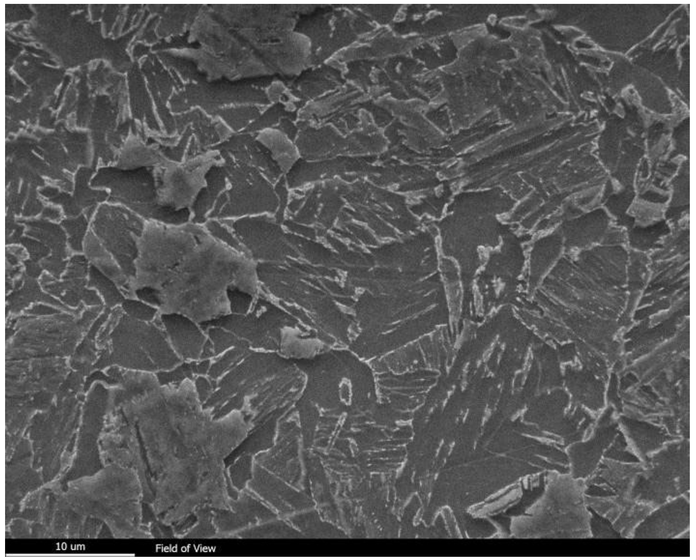
Результаты коррозионных испытаний в многокомпонентной среде

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

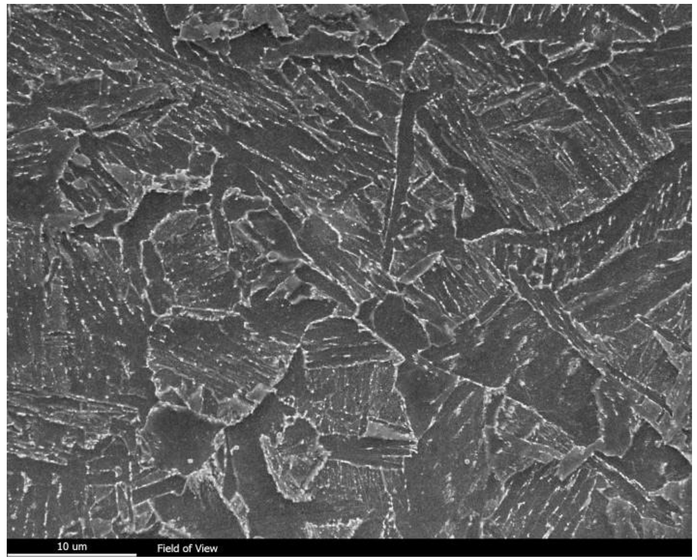
Результаты коррозионных испытаний стали Э1 после различных режимов термической обработки

Режим термической обработки	Условия испытания	Скорость коррозии, мм/год	Параметры среды	
			T, °C	pH
закалка + отпуск 550	5%NaCl Рпарц. CO_2 0,5 атм. + Рпарц. H_2S 0,5 атм.	0,16	50	4,23-4,76
закалка + отпуск 600		0,18		
закалка + отпуск 650		0,17		
закалка + отпуск 550	25%NaCl Рпарц. CO_2 0,5 атм. + Рпарц. H_2S 0,5 атм.	0,06	50	4,61-4,53
закалка + отпуск 600		0,05		
закалка + отпуск 650		0,06		
закалка + отпуск 550	5%NaCl Рпарц. CO_2 0,9 атм. + Рпарц. H_2S 0,1 атм.	0,30	50	3,85-5,08
закалка + отпуск 600		0,29		
закалка + отпуск 650		0,30		
закалка + отпуск 550	25%NaCl Рпарц. CO_2 0,9 атм. + Рпарц. H_2S 0,1 атм.	0,11	50	4,03-4,81
закалка + отпуск 600		0,11		
закалка + отпуск 650		0,12		

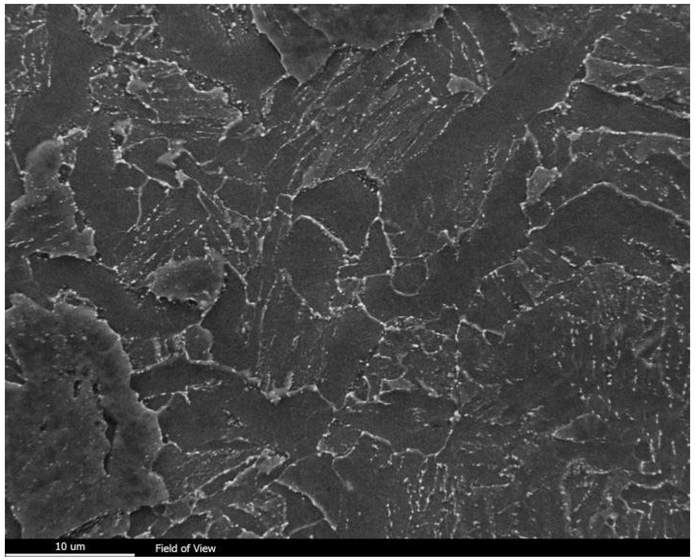
Микроструктура сталей после различных режимов термической обработки



Отпуск 550 °С



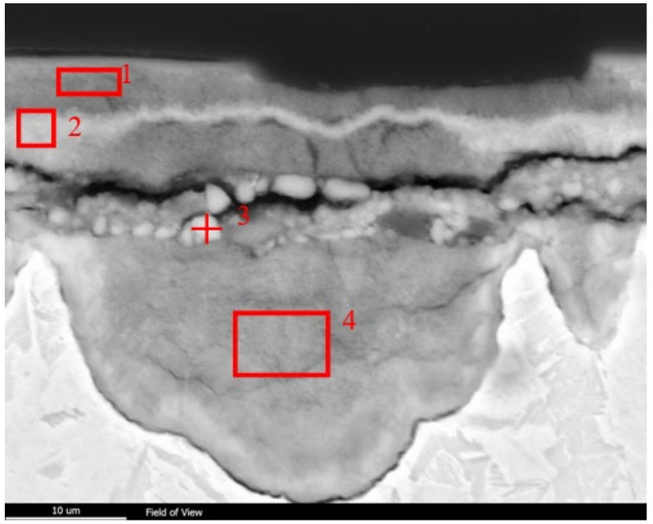
Отпуск 600 °С



Отпуск 650 °С

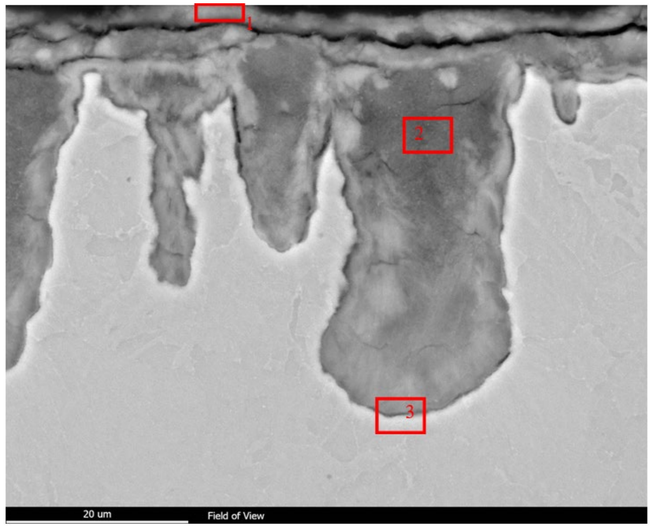
Изображение микроструктур после закалки и отпуска при различных температурах, увеличение x5000

Анализ продуктов коррозии после испытаний в многокомпонентной среде CO_2+H_2S



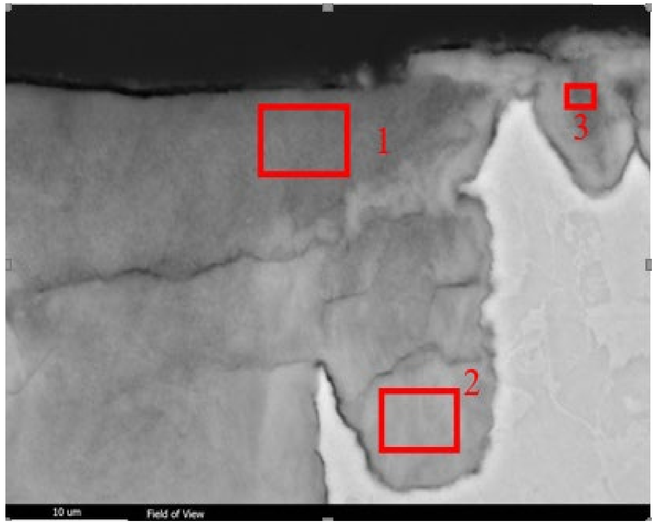
№ п/п	C	O	S	Cr	Mn	Fe
1	21,84	3,68	17,06	3,60	-	53,92
2	6,38	2,68	22,53	2,71	-	65,70
3	5,95	3,96	22,50	2,81	0,47	64,31
4	4,06	2,64	23,00	2,23	-	68,07

Отпуск 550 °C



№ п/п	C	O	S	Cl	Cr	Fe
1	40,39	02,33	14,88	01,01	00,51	40,88
2	06,06	01,97	20,49	-	04,10	67,38
3	01,89	02,11	23,45	-	01,98	70,57

Отпуск 600 °C

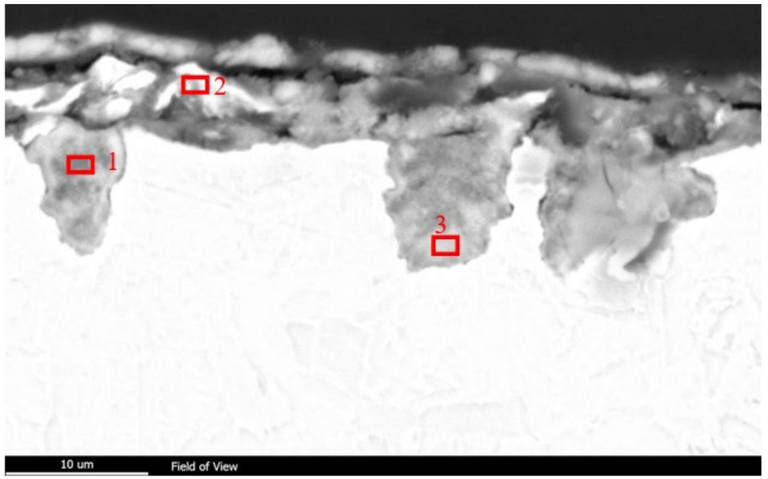


№ п/п	C	O	S	K	Cr	Mn	Fe
1	17,25	03,38	18,90	00,69	03,86	00,30	55,63
2	01,73	02,32	24,06	-	01,93	-	69,95
3	10,31	02,19	21,25	00,91	02,71	00,27	62,35

Отпуск 650 °C

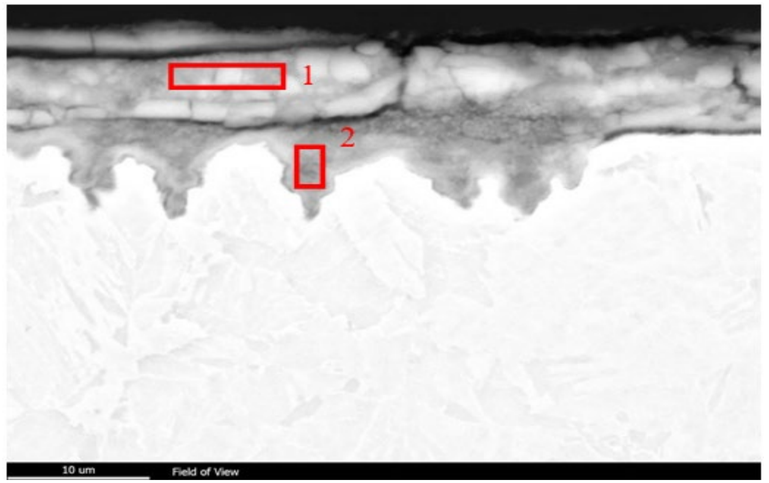
Многокомпонентная среда - 5% NaCl, Рпарц. CO_2 0,5 атм. + Рпарц. H_2S 0,5 атм.

Анализ продуктов коррозии после испытаний в многокомпонентной среде CO_2+H_2S



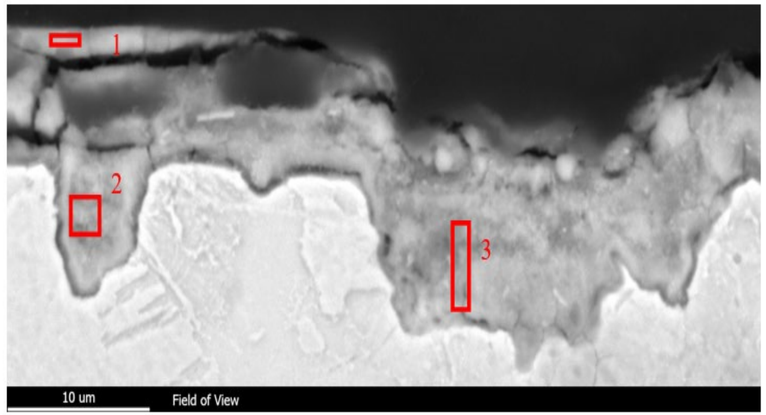
№ п/п	C	O	Si	S	Cr	Mn	Fe
1	9,88	7,61	-	26,28	1,09	-	55,14
2	8,97	4,85	0,31	3,88	1,32	0,71	79,97
3	4,73	6,00	-	25,54	1,04	0,4	62,29

Отпуск 550 °C



№ п/п	C	O	S	Cr	Fe
1	10,86	4,12	21,96	2,16	60,89
2	2,42	1,91	19,06	1,21	75,40

Отпуск 600 °C

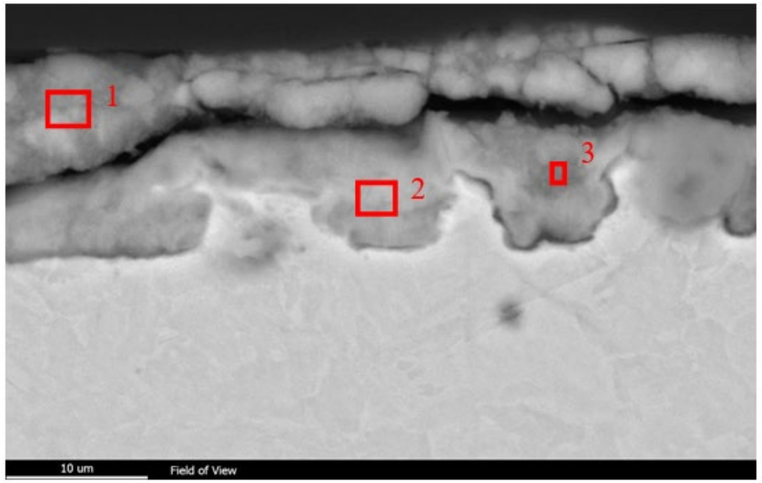


№ п/п	C	O	Si	S	Cr	Fe
1	47,30	6,76	-	15,21	1,09	29,63
2	8,53	7,58	-	28,69	1,15	54,06
3	13,63	8,97	0,53	19,50	1,08	56,29

Отпуск 650 °C

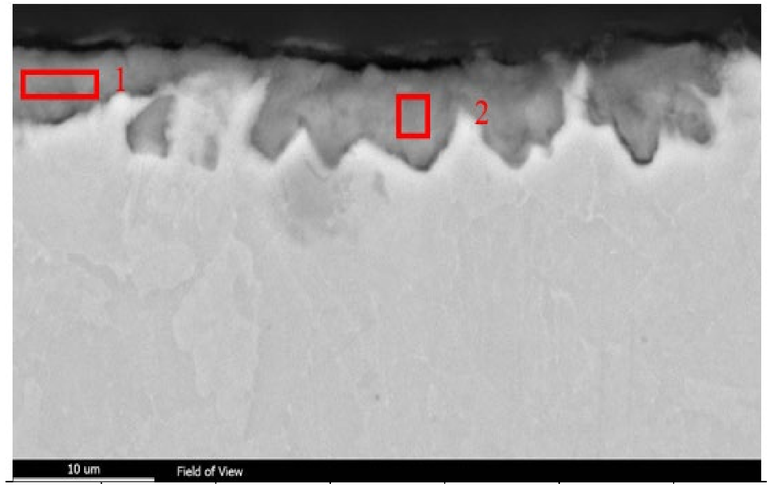
Многокомпонентная среда - 25% NaCl, Рпарц. CO_2 0,5 атм. + Рпарц. H_2S 0,5 атм.

Анализ продуктов коррозии после испытаний в многокомпонентной среде CO_2+H_2S



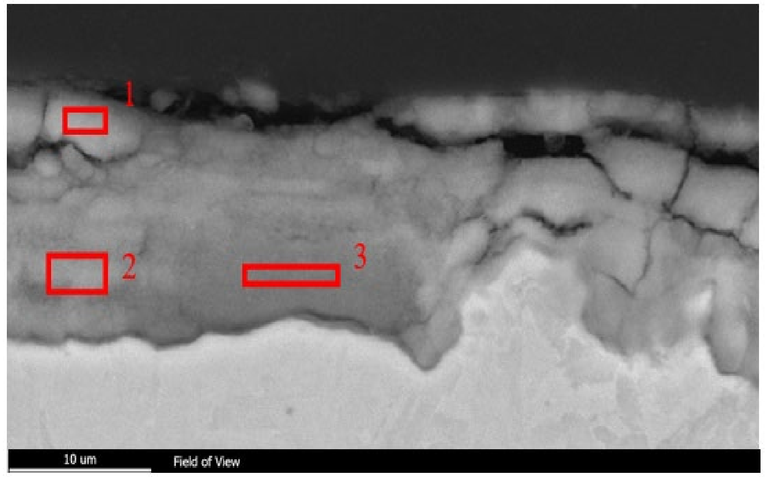
№ п/п	C	O	S	Cr	Mn	Fe
1	17,37	2,85	19,04	2,32	0,29	58,13
2	4,66	2,30	18,83	1,84	0,55	71,82
3	5,16	2,77	22,72	2,07	-	67,28

Отпуск 550 °C



№ п/п	C	O	S	Cr	Mn	Fe
1	24,09	2,71	15,96	1,88	0,26	55,10
2	19,63	2,40	14,31	1,96	0,28	61,42

Отпуск 600 °C

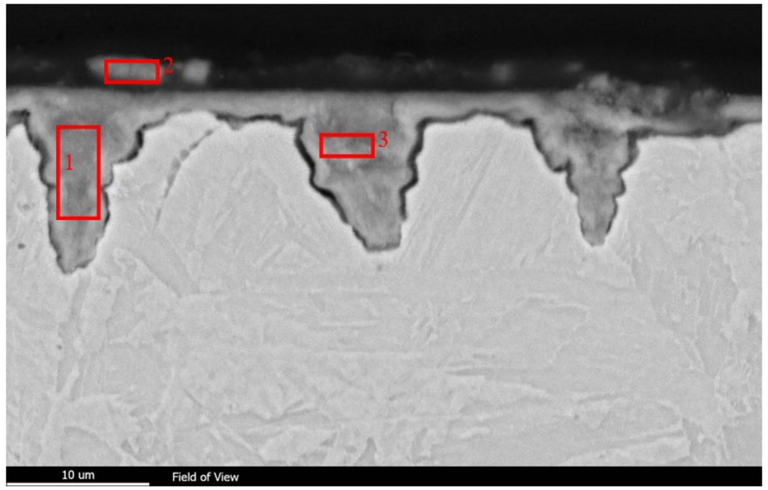


№ п/п	C	O	S	K	Cr	Mn	Fe
1	9,47	3,24	21,60	-	3,12	0,46	62,12
2	2,85	3,53	15,41	0,55	2,01	-	75,67
3	1,94	-	1,01	-	1,33	0,98	94,75

Отпуск 650 °C

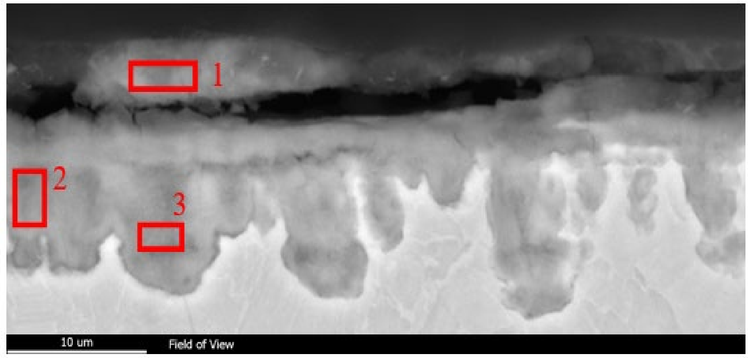
Многокомпонентная среда - 5% NaCl, Рпарц. CO_2 0,9 атм. + Рпарц. H_2S 0,1 атм.

Анализ продуктов коррозии после испытаний в многокомпонентной среде CO_2+H_2S



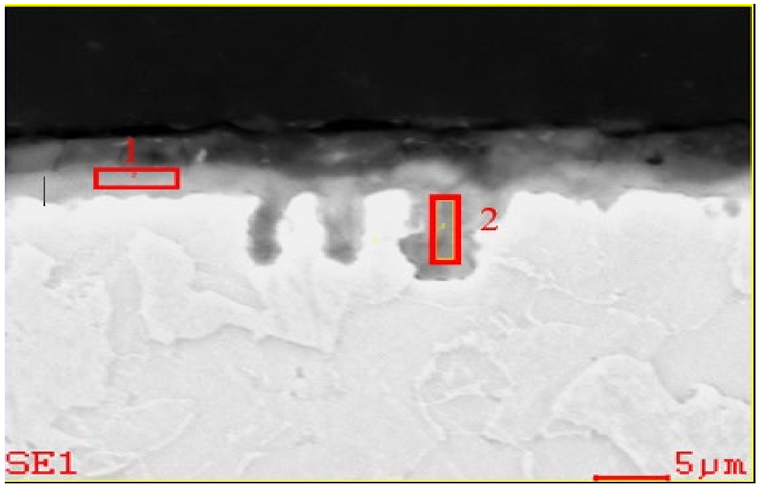
№ п/п	C	O	Na	S	Cl	K	Cr	Mn	Fe
1	10,66	06,83	01,55	28,29	-	00,81	02,17	-	49,69
2	69,23	22,79	-	02,86	00,67	-	-	-	04,45
3	06,28	06,45	-	29,03	-	-	02,09	-	56,15

Отпуск 550 °C



№ п/п	C	O	S	Cr	Mn	Fe
1	14,46	6,71	12,69	11,24	0,42	64,48
2	5,44	3,89	18,64	1,75	0,35	69,93
3	4,07	3,37	18,27	2,27	0,38	71,65

Отпуск 600 °C



№ п/п	C	O	S	Cr	Mn	Fe
1	12,23	5,68	16,53	1,24	0,59	63,73
2	5,48	2,87	18,34	1,67	0,61	71,03

Отпуск 650 °C

Многокомпонентная среда - 25% NaCl, Рпарц. CO_2 0,9 атм. + Рпарц. H_2S 0,1 атм.

Промышленное внедрение







Технологическая линия индустриального партнера по производству бесшовной трубы из стали Э1 диаметром 114 мм и толщиной стенки 8 мм

Механические свойства бесшовной горячекатаной трубы Э1 (НИТУ МИСИС и индустриальный партнер)

№ п/п	Вид ТО			Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Ударная вязкость KCV^{-60}, Дж/см^2	Твердость, HV
	Режим закалки		Температура отпуска, °С					
	Температура, °С	среда						
Э1 (НИТУ МИСИС)	910	вода	720	488	570	21	326	186
Э1 (индустриальный партнер)	910	Вода	720	476	587	30	358	184
Класс прочности К56				355 – 473	510 – 630	более 20	-	–

Выводы

1. При проведении анализа основных нормативных документов ведущих нефтегазовых компаний Российской Федерации и аналитического литературного был сформирован перспективный химический состав с содержанием хрома 1 % с дополнительным легированием сильными карбидообразующими элементами, которые были изготовлены с применением технологического лабораторного оборудования – прошивного стана МИСИС-130Д и стана продольной прокатки ДУО-210 на площадке НИТУ МИСИС.

2. Для исследуемой стали предложены режимы термической обработки, которые позволяют получить различные классы прочности для изготовления бесшовных нефтегазопроводных и нарезных труб.

3. Ведущим механизмом коррозии в средах, содержащих CO_2 и H_2S одновременно является равномерная сульфидная коррозия, в результате которой на поверхности образца формируется защитная сульфидная пленка, снижающая скорость коррозии. Малые добавки H_2S в модельную среду подавляют процесс углекислотной коррозии.

4. Повышение минерализации модельной среды с 5% до 25% NaCl привело к резкому падению скорости коррозии для всех исследуемых условий.

5. Скорость общей коррозии в сложных CO_2 и H_2S-содержащих многокомпонентных средах практически не зависит от температурного режима отпуска объемной термической обработки.

6. На основании сформированных металловедческих и технологических концепций в НИТУ МИСИС на производственной площадке индустриального партнера была изготовлена бесшовная нефтегазопроводная труба 114х8 мм – на этом основании можно сделать вывод о том, что лабораторный комплекс технологического оборудования НИТУ МИСИС позволяет обеспечить высокую сходимость разрабатываемых технологий изготовления бесшовных труб с промышленными условиями.

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Спасибо за внимание!

Работа была выполнена в рамках комплексного проекта по теме «Разработка и внедрение комплексных технологий производства бесшовных труб из сталей нового поколения с управляемой коррозионной стойкостью при осложненных условиях эксплуатации для топливно-энергетического комплекса Российской Федерации» в рамках Соглашения №075-11-2023-011 от 10.02.2023 г. по постановлению Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г.

Выражаю благодарность сотрудникам коллектива:
ИТЦ Выксунского завода ОМК,
кафедре ОМД НИТУ МИСИС,
а также НИЛ «ГНМ» НИТУ МИСИС.

ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Повышение эксплуатационных свойств нефтепромысловых труб на основе использования бейнитных структур.

Выбойщик М.А.
vma63vma@yandex.ru

Тольятти
2025

Введение.

Бейниты по сравнению с другими видами структур сталей (феррит, перлит, феррито-перлит, сорбит, мартенсит и др.) обеспечивает сочетание более высоких значений прочности и пластичности.

Таблица 1. Механические свойства после улучшения (зернистый перлит) и изотермической закалки (бейнит).

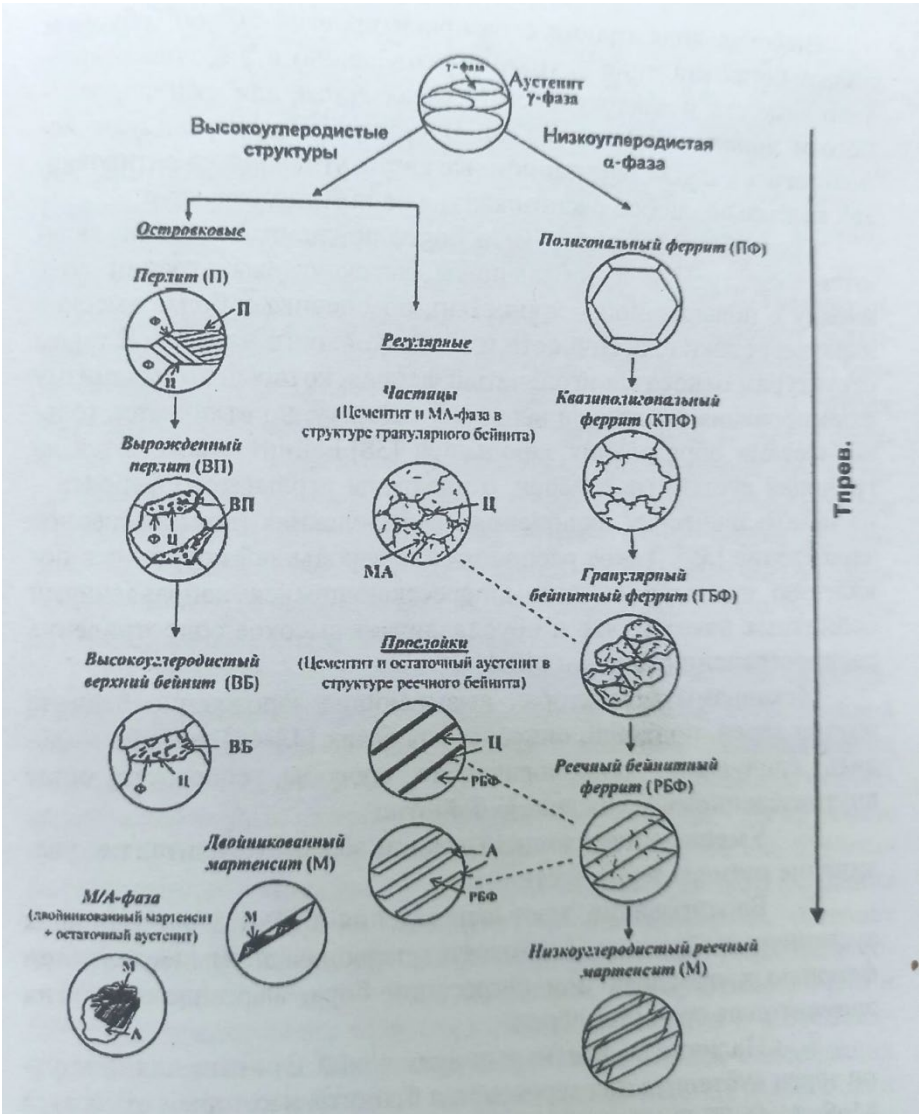
Режимы термообработки	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	KCU, МДж/м 2
Сталь 30ХГС				
Закалка в масло + отпуск 540 С	1100	850	11	0,45
Изотермическая закалка, выдержка 330 С селитра	1650	1300	20	0,6
Сталь 40ХСНМА				
Закалка в масло + отпуск 550 С	11320	1230	12	05
Изотермическая закалка, выдержка 45 мин. 300 С	1400	1200	19	0,92

Решение вопросов:

1. Формирование бейнитных структур.
2. Обеспечение коррозионной стойкости бейнитных структур в нефтепромысловых средах.

Формирование бейнитных структур.

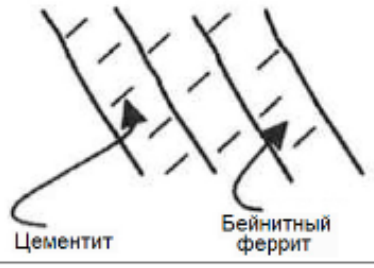
Бейнит является наиболее сложной микроструктурой стали, поскольку формируется двумя механизмами превращения аустенита: диффузионный (перлитный) и сдвиговый (мартенситный).



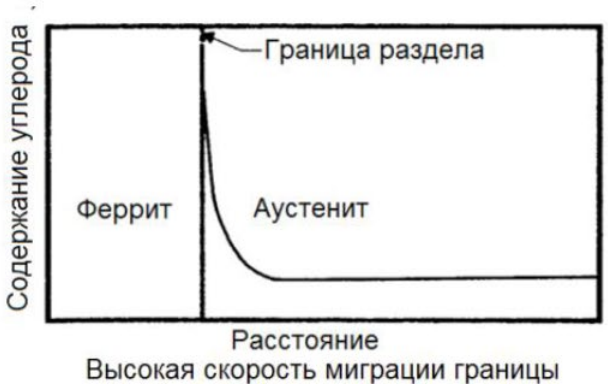
Изменение строения и структуры низкоуглеродистых низколегированных сталей при снижении температуры превращения (увеличении скорости охлаждения)
[Матросов М.Ю., Лясоцкий И.В., Кичина А.А. и др. Особенности к классификации структур низкоуглеродистых высокопрочных трубных сталей //Сталь. 2012. №1. С.65-74.]

Вид и расположение второй фазы в реечном бейните в зависимости от температуры.

(классификация по И. Онори, изотермическое охлаждение)

Верхний бейнит (UB)	Бейнит в низкоуглеродистых сталях, B_2	Вытянутые частицы бейнитного феррита в форме реек и выделившийся по границам реек цементит	
Дегенеративный (недоразвитый) верхний бейнит (DUB)	Бейнит в низкоуглеродистых сталях, B_1	Вытянутые частицы бейнитного феррита в форме реек и выделившиеся по границам реек МА-составляющие (в качестве второй фазы могут выступать перлит или аустенит)	
Нижний бейнит реечного типа (LLB)	Бейнит в низкоуглеродистых сталях, B_3	Вытянутые частицы бейнитного феррита в форме реек с выделившимся внутри них под углом 55–60° цементитом	

Механизм формирования второй фазы.



Высокая скорость миграции границы



Невысокая скорость миграции границы

Распределение углерода на границе феррита и аустенита в зависимости от скорости охлаждения: а) быстрое охлаждение и высокая скорость миграции границы; б) медленное охлаждение и низкая скорость миграции границы

Процесс формирования второй фазы можно описать на основе суперпозиции двух диффузионных потоков [Рудской А.И. Научные основы управления структурой и свойствами сталей в процессах термомеханической обработки .М.:РАН. 2019. 276 с]

Это массоперенос углерода при движении межфазной границы ($J_{\alpha\to\gamma} = (C_\gamma^{int} - C_\alpha^{int})\ V$), и поток углерода от границы в объем в аустенитной фазе ($J_d = -D_c(\partial C_\gamma/\partial x)$). Суммарный диффузионный перенос можно представить, как разность этих двух потоков:

$$_\Delta J = (C_\gamma^{int} - C_\alpha^{int})V + D_c(\partial C_\gamma/\partial x)\ .$$

где C_γ^{int} и C_α^{int} – концентрация углерода в аустените и феррите вблизи границы раздела, V – скорость движения межфазных границ, D_c – коэффициент диффузии углерода в аустените, C_γ - концентрация углерода в аустените.

Объект исследования и методы.

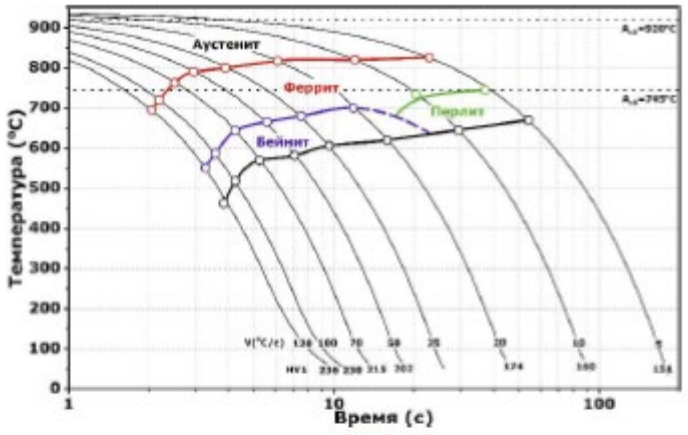
Элементный состав сталей

Марка стали	Массовая концентрация химических элементов, %											
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	V	S	P
08ХФА	0,09	0,20	0,44	0,52	0,003	0,12	0,034	0,11	0,02	0,088	0,002	0,011
08ХМФА	0,05	0,39	0,39	0,70	0,190	0,10	0,057	0,17	0,011	0,061	0,004	0,003
05ХГБ	0,05	0,22	0,71	0,61	0,01	0,08	0,013	0,18	0,029	0,003	0,001	0,006
09Г2С	0,07	0,57	1,42	0,06	0,026	0,13	0,041	0,28	-	0,003	0,012	0,012

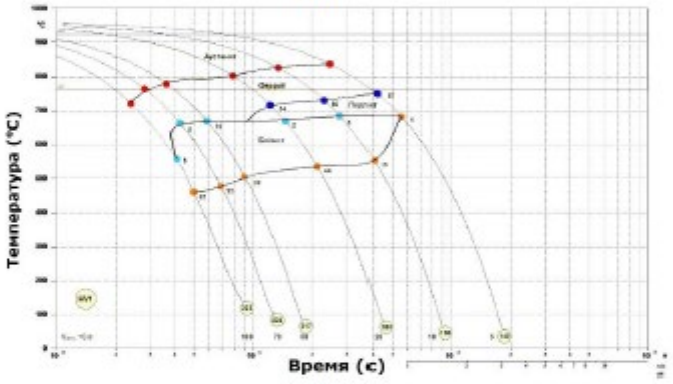
Методы исследований:

- Химический анализ;
- Металлографический анализ (световая и электронная микроскопии);
- Рентгеноструктурный анализ металла и продуктов коррозии (фазовый состав, остаточные напряжения, плотность дислокаций);
- Механические свойства (твердость, одноосное растяжение, ударная вязкость);
- Внутреннее трение;
- Коррозионные свойства (ВР, СКРН, общая и углекислотная коррозия).

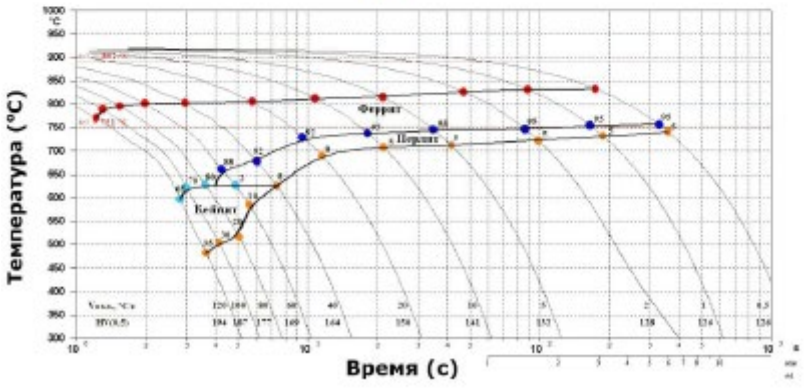
Кинетика распада аустенита.



а)



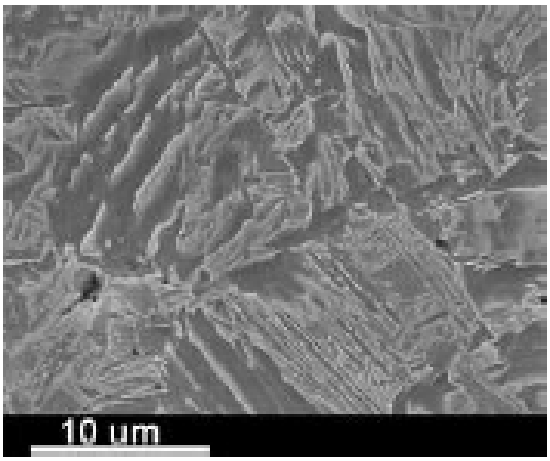
б)



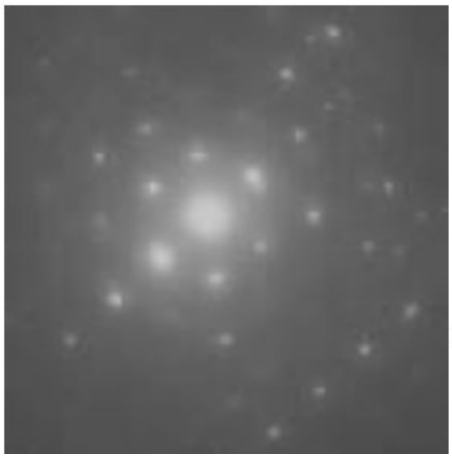
в)

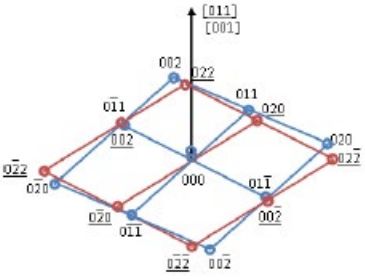
Термокинетические диаграммы распада переохлаждённого аустенита: а-сталь 08ХФА; б-сталь 08ХМФА; в-сталь 05ХГБ. Диаграммы приведены по данным центра исследовательских лабораторий АО «ВМЗ»

Структура после закалки в воду.

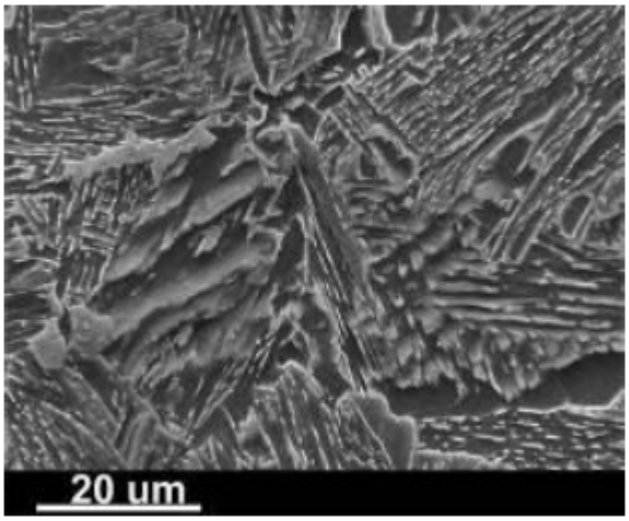


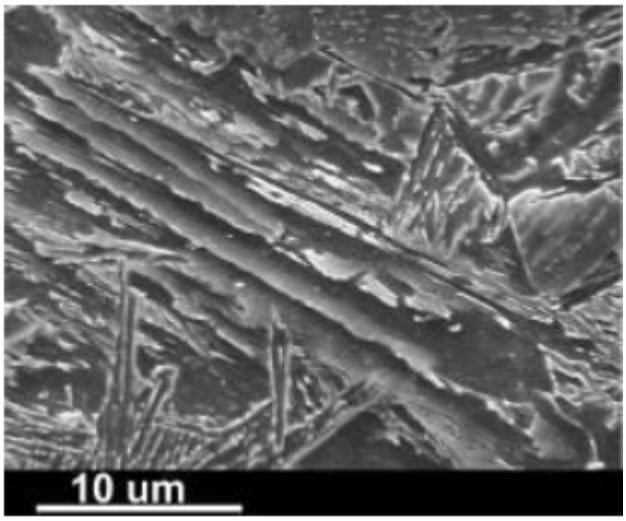






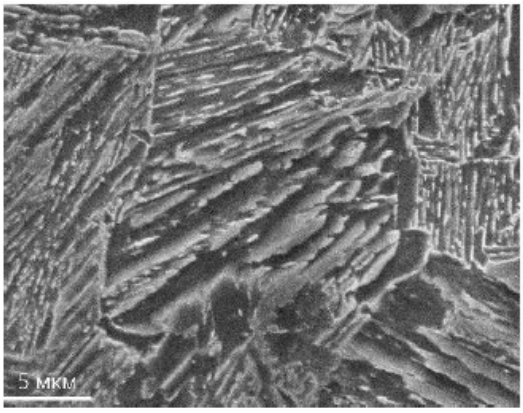
Сталь 08ХМФАзакалка в воду с 930 ˚С

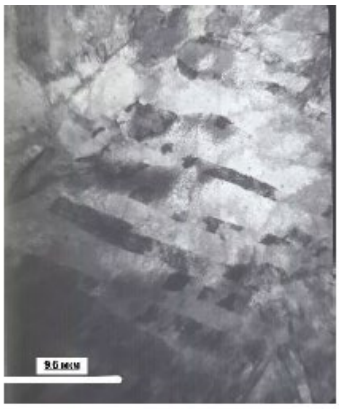




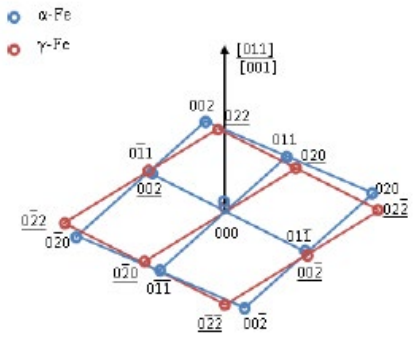
Стали 08ХФА закалка с 930˚С в 16% водный раствор NaCl.

Структура после закалки в воду.

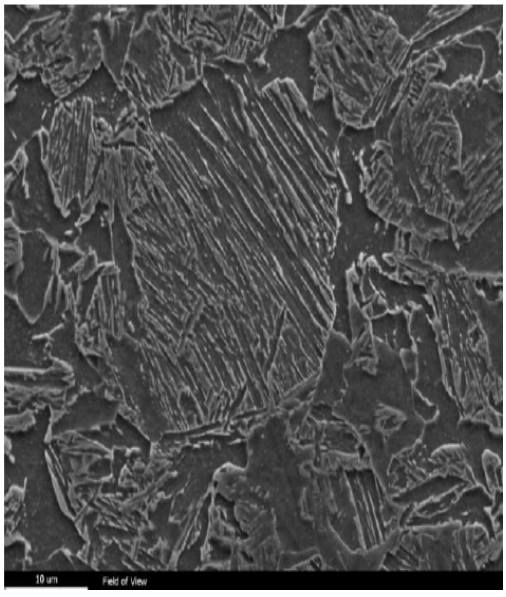








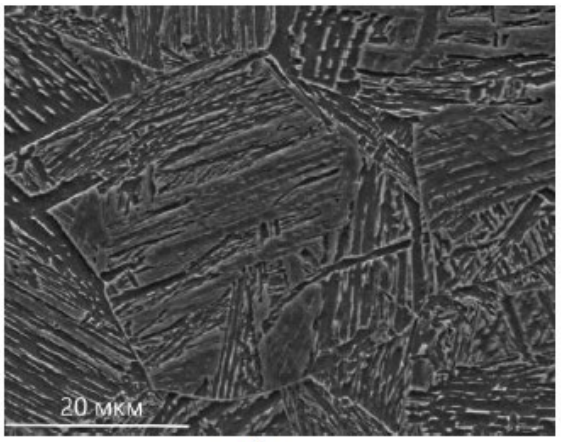
Сталь 08ХМФА закалка в воду с 930 ˚С



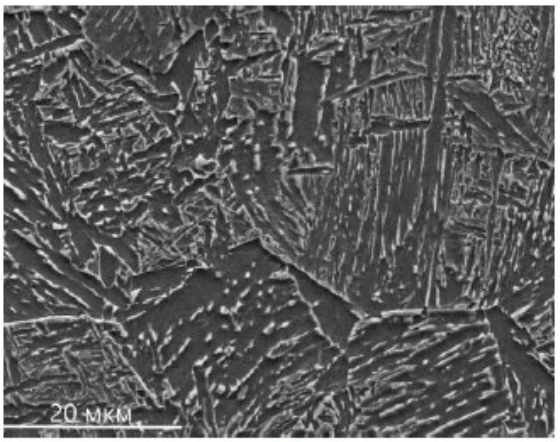


Сталь 05ХГБ закалка в воду с 920 ˚С

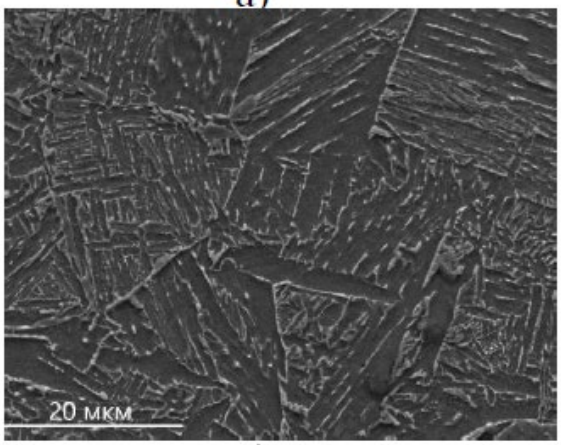
Изменение структуры с ростом температуры



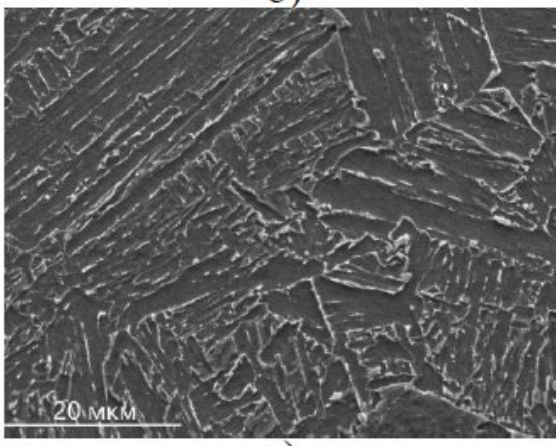
а)



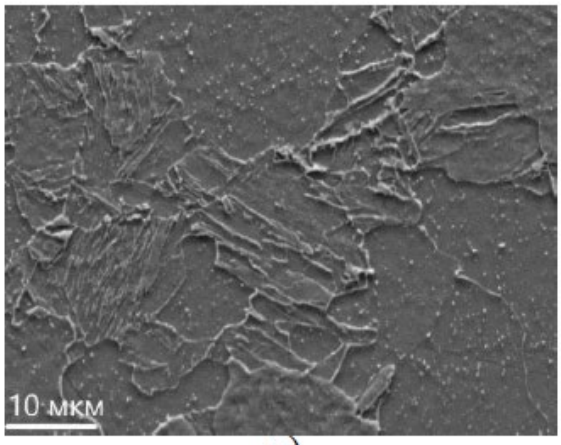
б)



в)



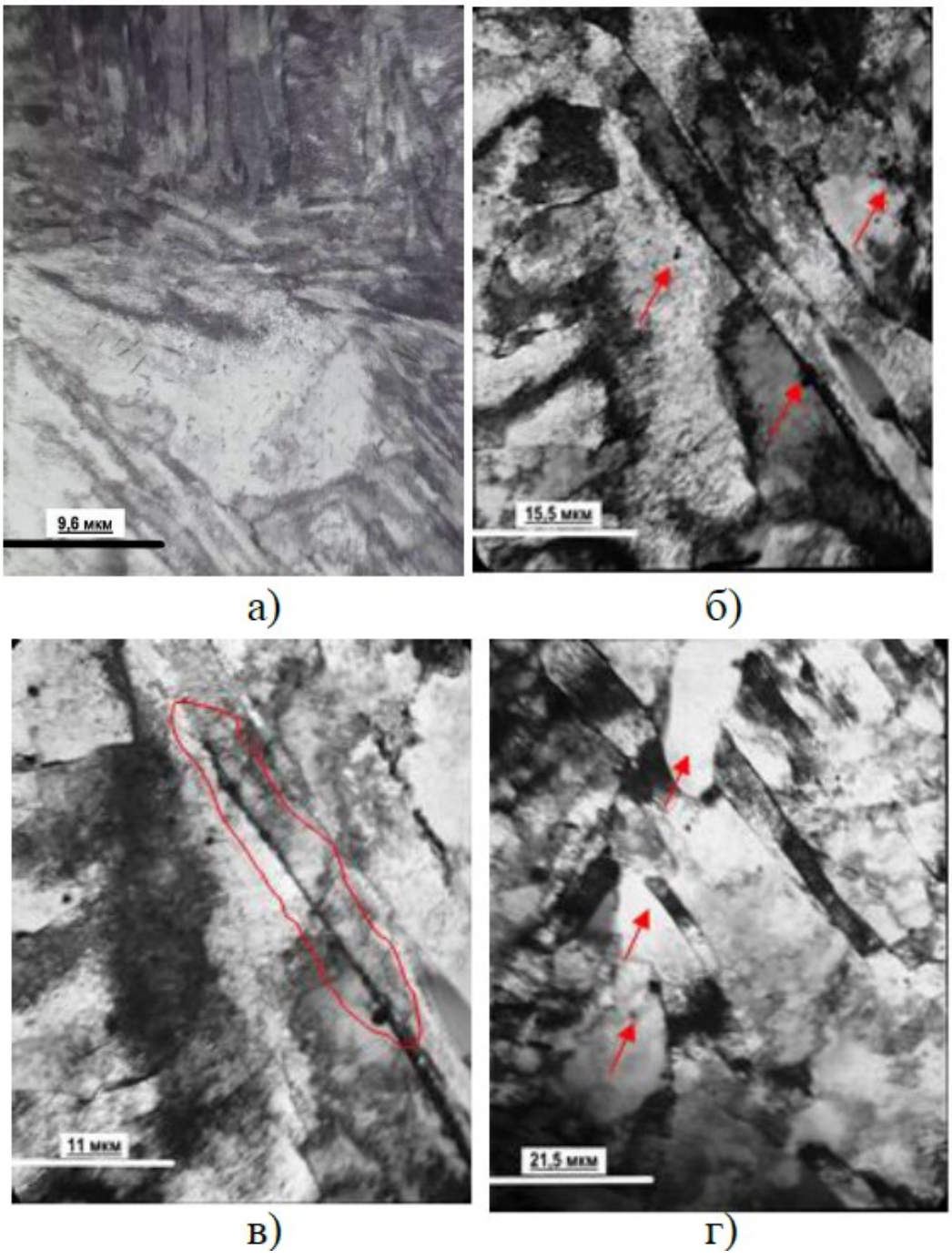
г)



д)

Сталь 08ХМФА закалка от 930˚С и отпуск при температурах:
а) 200˚С; б) 300˚С; в) 400˚С; г) 500˚С; д) 700˚С. (СЭМ)

Изменение структуры с ростом температуры отпуска.



Сталь 08ХМФА закалка от 930˚С и отпуск при температурах:
а) 300˚С; б) 400˚С; в) 500˚С; г) 600˚С. (ПЭМ)

Последовательность структурных превращений.

Эволюция структурного состояния реечного бескарбидного бейнита с увеличением температуры отпуска (проследовательность процессов):

— при 200˚С исчезает непревращенный аустенит;

— при отпуске 300˚С появляются первые выделения карбидов железа игольчатой формы;

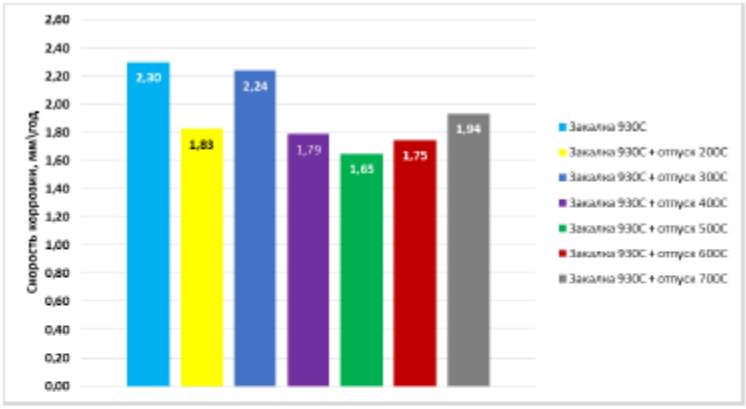
— в интервале температур 400-500˚С карбидные частицы появляются в объёме на границах реек, происходит их коалесценция и сфероидизация, появляются цепочки карбидных включений на границах бейнитных реек. Резко снижаются остаточные напряжения 3го рода, (переход углерода из кристаллической решётки в связанное состояние в виде карбидов). Развиваются процессы полигонизации: уменьшение малоугловых и рост высокоугловых границ. Плотность дислокаций остается практически неизменной;

— с температуры отпуска 600˚С основным фактором является интенсивное развитие процессов рекристализации, определяющее изменение структуры и свойств;

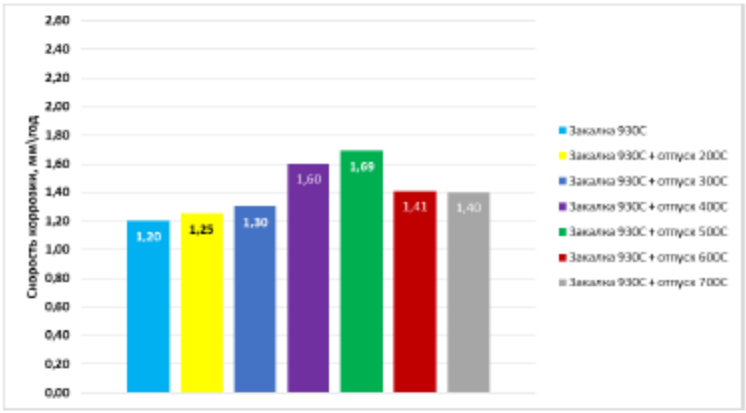
— отпуск выше 700˚С может вызвать вторичную рекристаллизацию и резкий рост зерна.

Зависимость механических свойств, остаточных напряжений и плотности дислокаций сталей 08ХФА, 08ХМФА, 05ХГБ от температуры отпуска

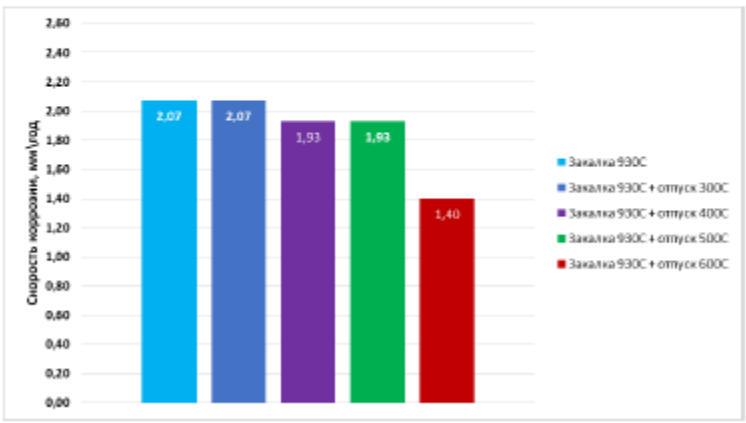
Марка стали	Режим термообработки	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	KCV $^{-50}$ Дж/см^2 (ДВС)	Остаточн. напр. 3-го рода, МПа	Плотность дисл., $\rho*1014$, м$^{-2}$
08ХФА	Закалка 930˚С	830	740	22,0	230 (100%)	300	5,1
	930˚С + отпуск 200˚С	820	710	19,0	240 (100%)	225	4,4
	930˚С + отпуск 300˚С	810	730	17,5	240 (100%)	220	4,1
	930˚С + отпуск 400˚С	785	690	18,0	252 (100%)	140	5,1
	930˚С + отпуск 500˚С	710	645	18,5	260 (100%)	91	4,7
	930˚С + отпуск 600˚С	680	605	22,0	260 (100%)	71	5,2
	930˚С + отпуск 700˚С	615	535	25,0	-	64	2,8
08ХМФА	Закалка 930˚С	775	700	19,5	180 (80%)	190	4,0
	930˚С + отпуск 200˚С	780	650	19,0	215 (100%)	200	4,7
	930˚С + отпуск 300˚С	785	660	18,0	200 (100%)	180	4,5
	930˚С + отпуск 400˚С	760	650	19,5	215 (100%)	120	4,2
	930˚С + отпуск 500˚С	710	635	20,0	235 (100%)	-	-
	930˚С + отпуск 600˚С	685	605	21,5	250 (100%)	86	3,4
	930˚С + отпуск 700˚С	590	520	23,5	270 (100%)	63	3,6
05ХГБ	Закалка 930˚С	605	490	29,0	290 (100%)	570	5,4
	930˚С + отпуск 200˚С	-	-	-	-	-	-
	930˚С + отпуск 300˚С	590	500	29,0	315 (100%)	460	4,9
	930˚С + отпуск 400˚С	560	470	27,0	330 (100%)	215	4,7
	930˚С + отпуск 500˚С	530	430	28,0	314 (100%)	90	4,5
	930˚С + отпуск 600˚С	510	420	27,0	325 (100%)	45	4,0
	930˚С + отпуск 700˚С	-	-	-	-	-	-
Требования Газпромнефть ТТТ-01.02.04-01, для низколегированных коррозионностойких и хладостойких труб в CO_2-содержащих средах (Группа 4) (бесшовные трубы)							
Группа прочности К60		590-740	≥460	≥20	-	-	-
Требования ГОСТ 20295-85 (для сварных прямошовных и спиральношовных труб)							
Группа прочности К60		≥588	≥412	≥16	-	-	-



а)

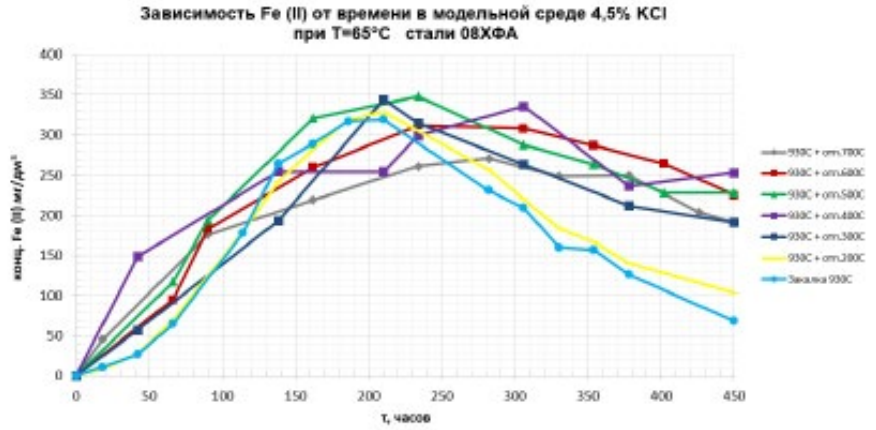


б)

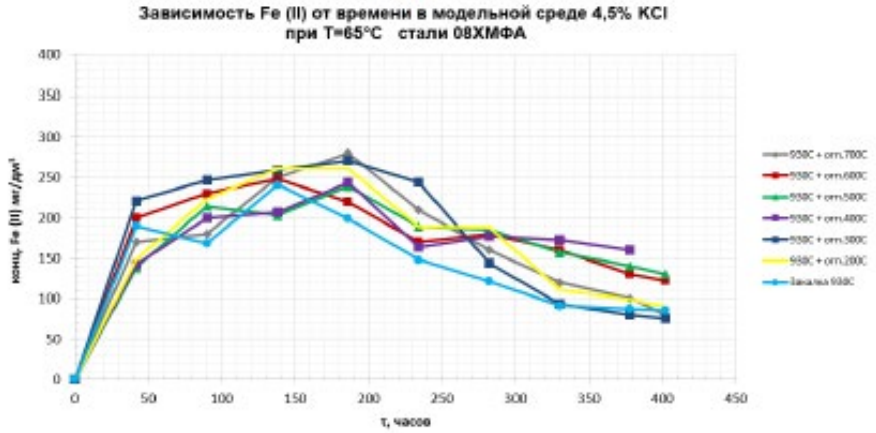


в)

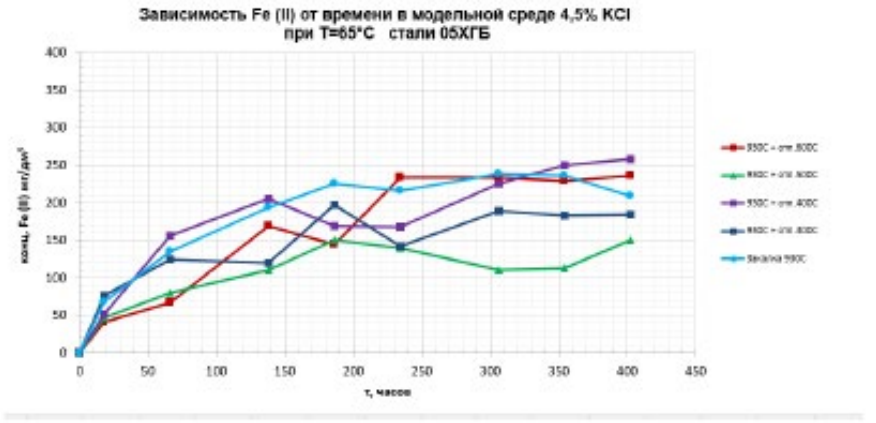
Зависимость скорости углекислотной коррозии от температуры отпуска: а) сталь 08ХФА, б) сталь 08ХМФА, в) сталь 05ХГБ



а)



б)



в)

Зависимость концентрации Fe+2 в модельной среде от времени испытаний при коррозионных испытаниях на стойкость к CO2-коррозии: а) сталь 08ХФА, б) сталь 08ХМФА, в) сталь 05ХГБ

Производство обсадных труб из низкоуглеродистых низколегированных сталей

Результаты испытаний на растяжение

Марка стали	Режим ТО	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_в$	$\delta 5$, %	Разность $\sigma_в - \sigma_т$
08ХМФА	Закалка 900С в воду	875	755	0,86	19,0	120
	Закалка 860С в воду	790	655	0,83	20,0	125
	Закалка 830С в воду	740	555	0,75	24,0	185
	Закалка 800С в воду	730	565	0,78	22,0	165
	Закалка 900С в воду + отпуск 500С	745	680	0,91	18,0	65
	Закалка 860С в воду + отпуск 550С	675	545	0,81	23,0	130
	Закалка 830С в воду + отпуск 500С	655	520	0,79	23,0	135
	Закалка 800С в воду + отпуск 500С	625	510	0,82	26,0	115
09Г2С	Закалка 900С в воду	1150	1030	0,90	16,5	120
	Закалка 860С в воду	1110	990	0,89	16,5	120
	Закалка 830С в воду	900	760	0,84	17,0	140
	Закалка 800С в воду	835	670	0,80	20,5	165
	Закалка 900С в воду + отпуск 500С	835	795	0,95	20,0	40
	Закалка 860С в воду + отпуск 600С	665	585	0,88	22,0	80
	Закалка 830С в воду + отпуск 500С	690	585	0,85	25,0	105
	Закалка 800С в воду + отпуск 500С	640	505	0,79	25,5	135
05ХГБ	Закалка 900С в воду	690	520	0,75	26,0	170
	Закалка 860С в воду	610	450	0,74	30,0	160
	Закалка 830С в воду	605	455	0,75	26,0	150
	Закалка 800С в воду	595	445	0,75	28,5	150
	Закалка 900С в воду + отпуск 500С	575	485	0,84	27,0	90
	Закалка 830С в воду + отпуск 500С	515	410	0,80	25,0	105
Требования API 5CT, гр прочности К55						
≥		655	379	-	13	103
≤		-	552	-	-	-

$\sigma_в - \sigma_т > 103$ МПа

Выводы

1. Прочностные свойства реечного бескарбидного бейнита практически не меняются при отпуске до 400˚С. Значительное разупрочнение начинается с 600˚С и обусловлено развитием процессов рекристаллизации.

2. Структурное состояние малоуглеродистых сталей с бейнитной закаливаемостью не влияет на их стойкость к углекислотной коррозии.

3. Для сталей со структурой реечного бескарбидного бейнита низкий и средний отпуск обеспечивают сочетание высоких значений механических свойств и коррозионной стойкости в нефтепромысловых средах.

4. Использование бейнитных структур ограничивается только техническим и научным уровнями производства.

ООО НИПП «Вальма»

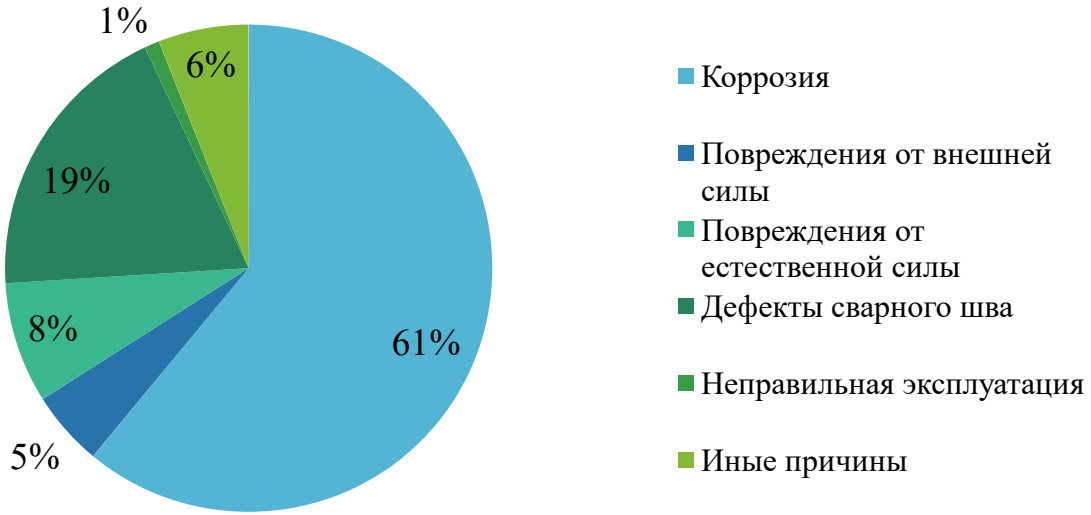
IX Научно-техническая конференция «Коррозия и управление рисками в нефтяной и газовой промышленности»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ СТАЛИ 20Л НА СТОЙКОСТЬ К СКРН В СРЕДЕ К2

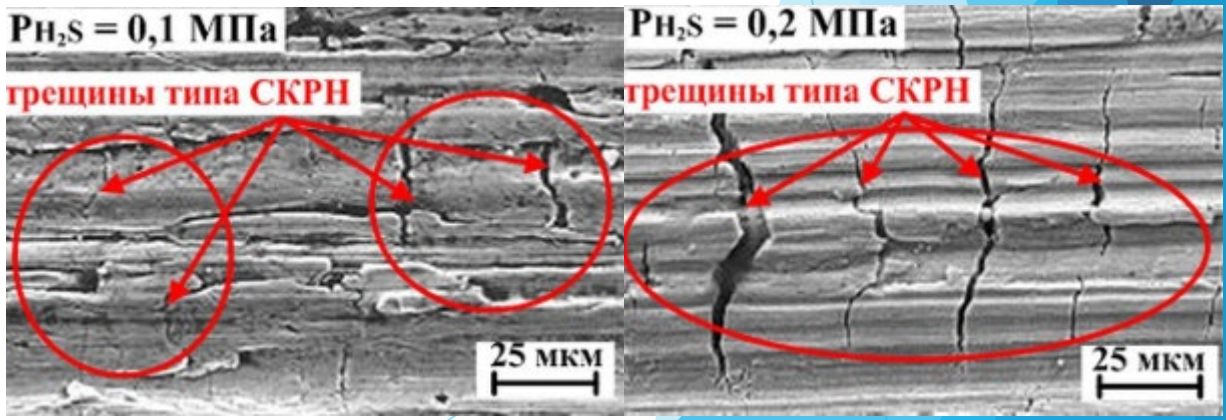
Блажнов Н.М.,
заместитель главного инженера,
ООО НИПП «Вальма», г. Самара

Актуальность исследования

Коррозионное воздействие сероводорода проявляется в появлении различного вида трещин, распространяющихся по толщине стенки трубы при одновременном воздействии напряжений. Это воздействие сероводорода на металл труб является сульфидным коррозионным растрескиванием под напряжением (СКРН).







Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является проведение исследования по определению стойкости стали 20Л к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением, по методу А, в средах К2, по МУК ЕТТ ПАО НК «Роснефть», где парциальное давление варьируется от 10 до 1000 кПа.

Для достижения данной цели решались следующие **основные задачи**:

1) Выбор режимов термической обработки для стали 20Л.

2) Проведение термической обработки на стали 20Л по режимам «закалка+отпуск» и «нормализация».

3) Проведение испытаний на определение стойкости стали 20Л к СКРН в среде К2 в соответствии с требованиями ПАО НК «Роснефть».

4) Исследование структуры стали марки 20Л после проведения испытаний на определение стойкости к СКРН.

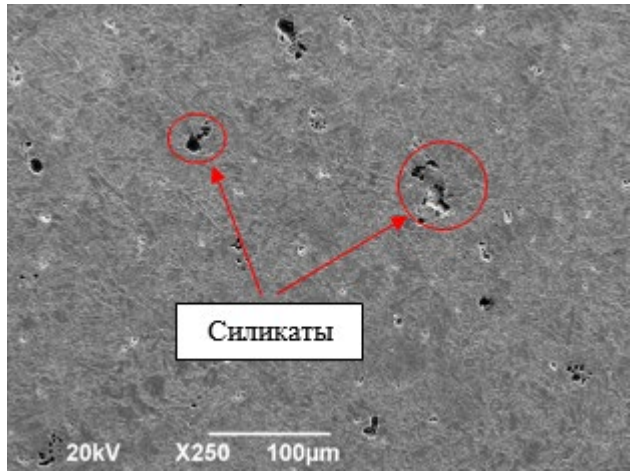
Результаты исследования

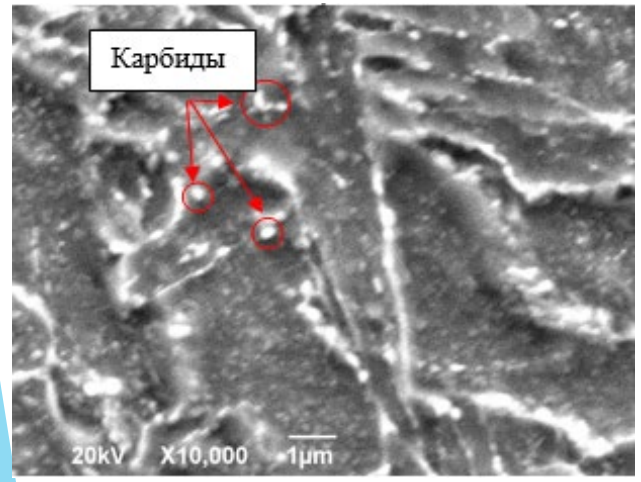
ООО НИПП «Вальма»

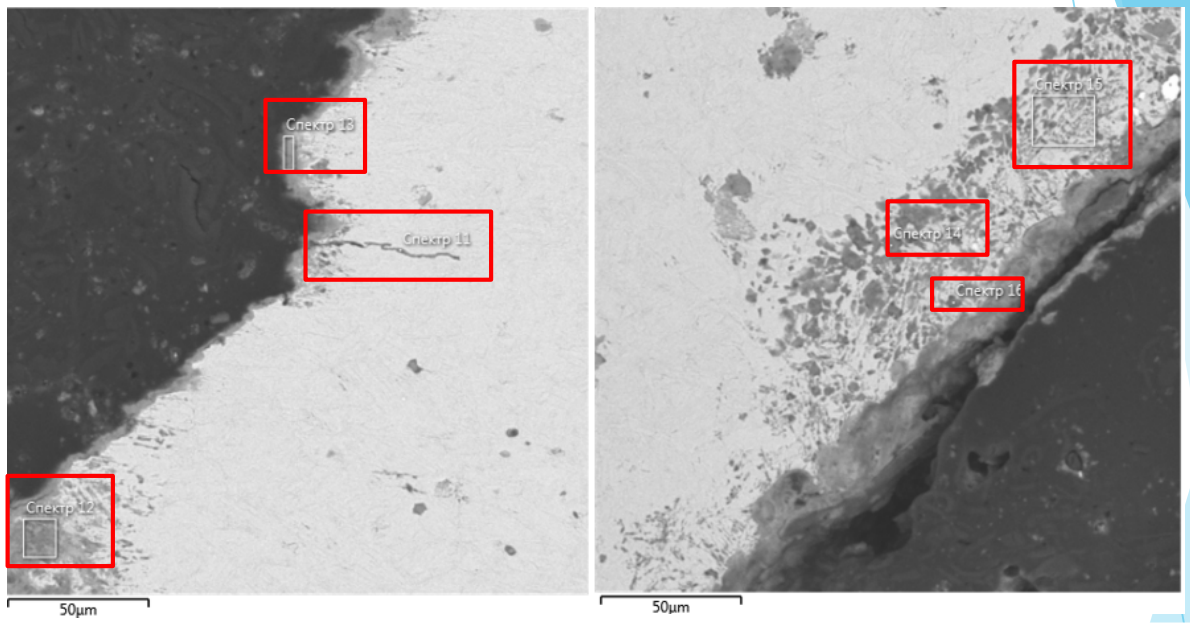
Режим т/о	№ п/п	Количество, шт	Коэфф. пороговой нагрузки, %	Состав испытательной среды	Время до разрушения, ч	Прилагаемая нагрузка, Н/мм^2
Закалка+ отпуск	1	1	90	5%NaCl+ 0,4%CH_3COONa В дистиллированной воде pH_2S – 300±200 мг/л pH – 3,5	36	647
	2	1	90		45	647
	3	1	90		39	647
Нормализация	4	1	90	5%NaCl+ 0,4%CH_3COONa В дистиллированной воде pH_2S – 300±200 мг/л pH – 3,5	333	316
	5	1	90		720	316
	6	1	90		720	316
	7	1	90	5%NaCl+ 0,4%CH_3COONa В дистиллированной воде pH_2S – 2800±200 мг/л pH –5,5	720	316
	8	1	90		426	316
	9	1	90		190	316

Микроструктурные исследования стали 20Л (закалка+отпуск) после проведения СКРН в среде К2

ООО НИПП «Вальма»





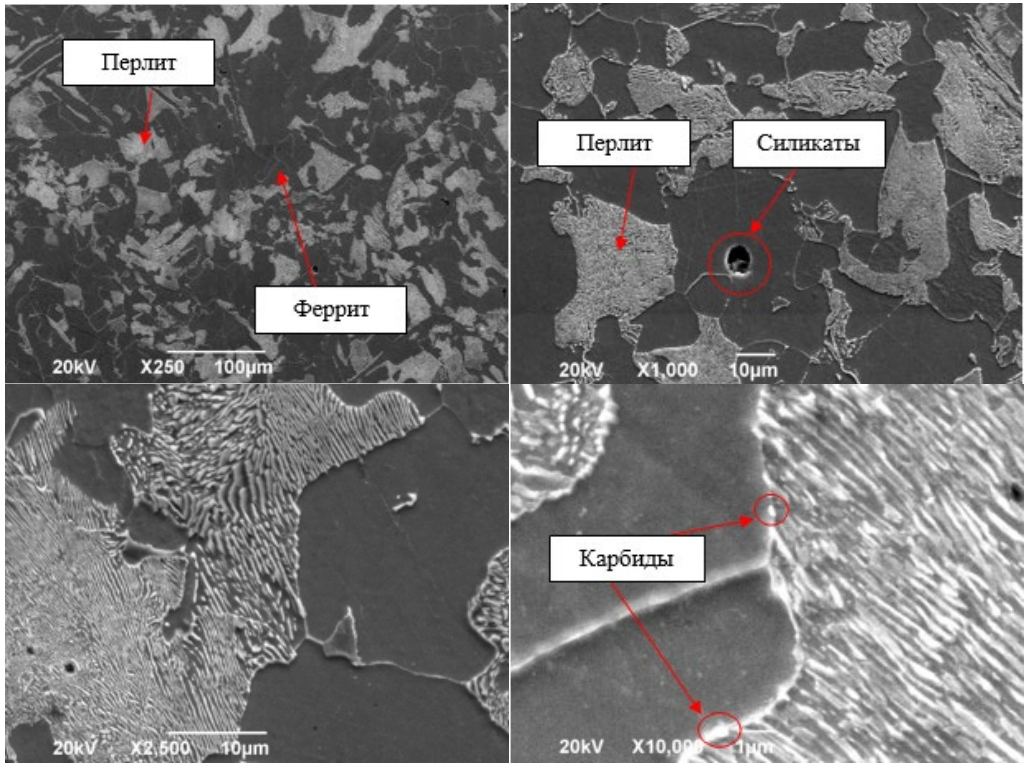


Номер маркера	Содержание элемента, масс.%							
	C	O	Fe	Mn	Si	S	Cr	Ca
11	7,14	12,18	78,87	0,85	0,20	0,23	0,27	-
12	18,74	24,36	53,76	0,67	1,01	0,48	0,41	0,37
13	16,13	25,09	57,02	0,68	0,35	0,20	0,14	0,39
14	11,05	33,06	45,36	1,21	4,93	1,01	1,49	0,48
15	7,08	6,45	83,99	0,94	0,77	0,38	0,13	0,26
16	15,39	26,89	50,24	0,63	1,66	0,91	0,96	1,18

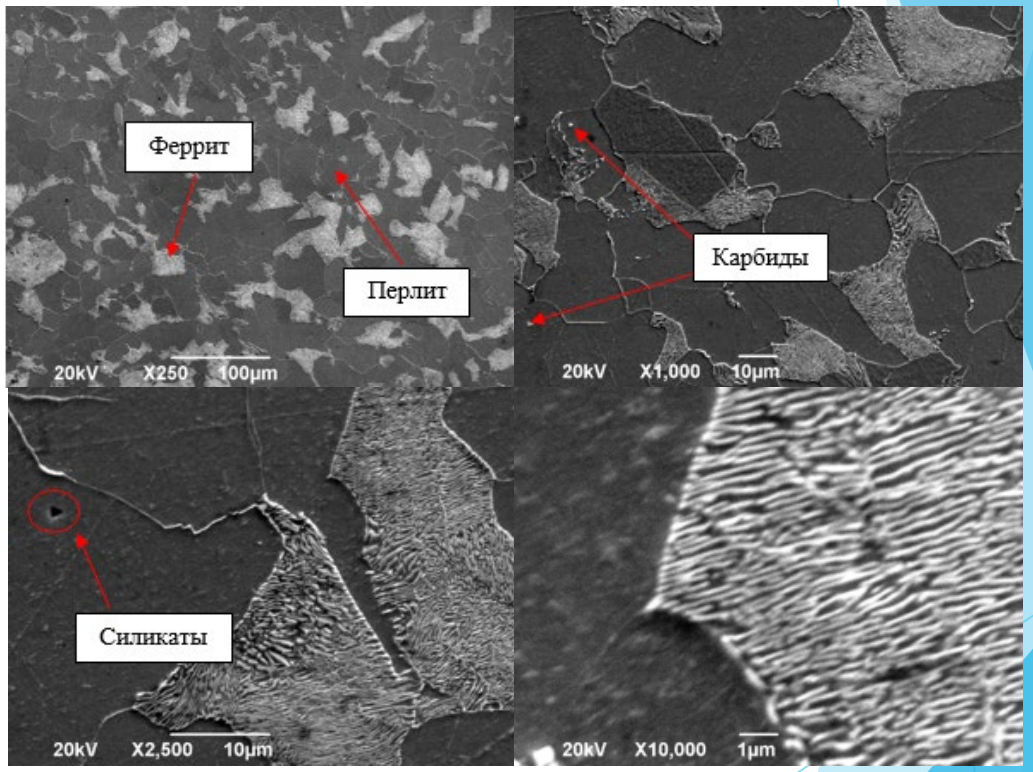
Микроструктурные исследования стали 20Л (нормализация) после проведения СКРН в среде К2

ООО НИПП «Вальма»

5%NaCl+0,4%CH_3COONa в дистиллированной воде, pH_2S – 300±200 мг/л, pH – 3,5



Без разрушения

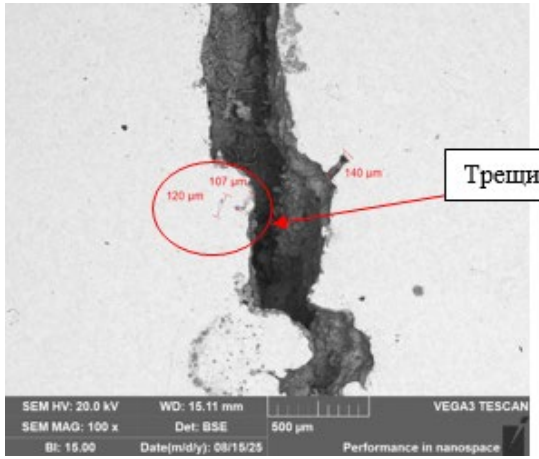


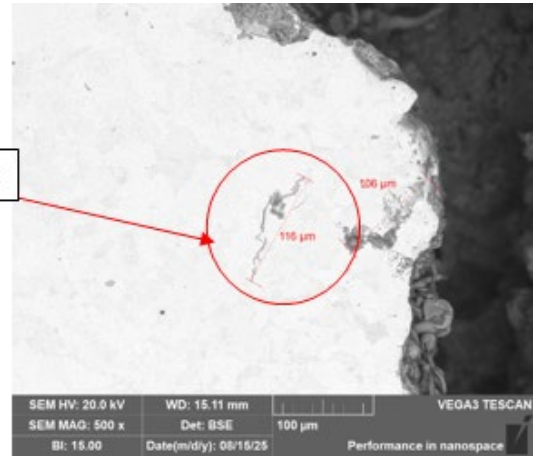
Разрушение через 333 ч

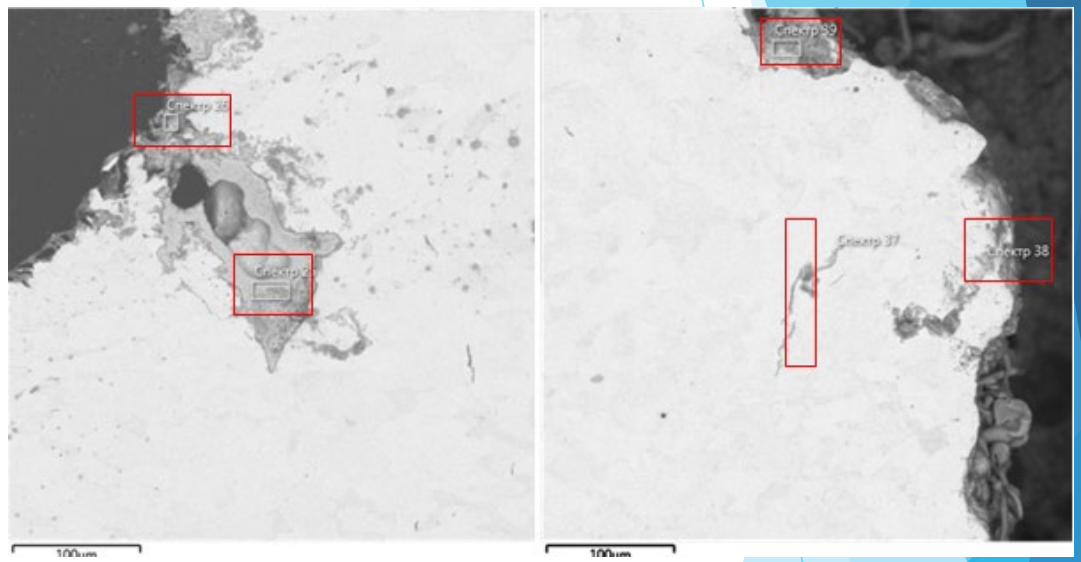
Микроструктурные исследования стали 20Л (нормализация) после проведения СКРН в среде К2

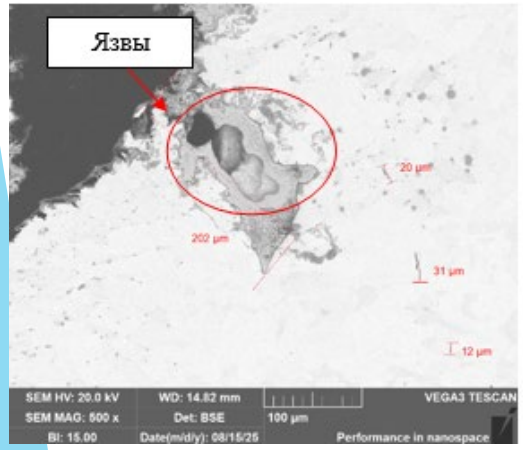
ООО НИПП «Вальма»

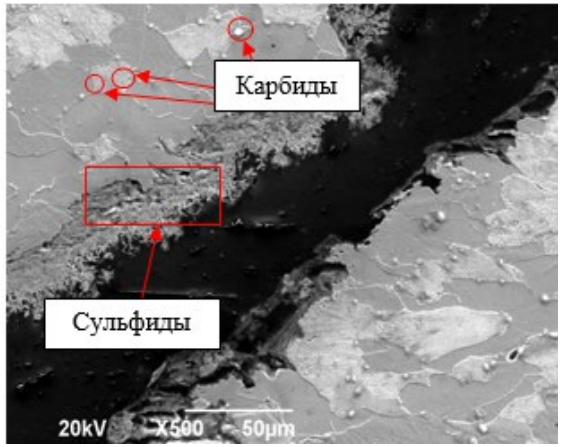
5%NaCl+0,4%CH_3COONa в дистиллированной воде, pH_2S – 300±200 мг/л, pH – 3,5









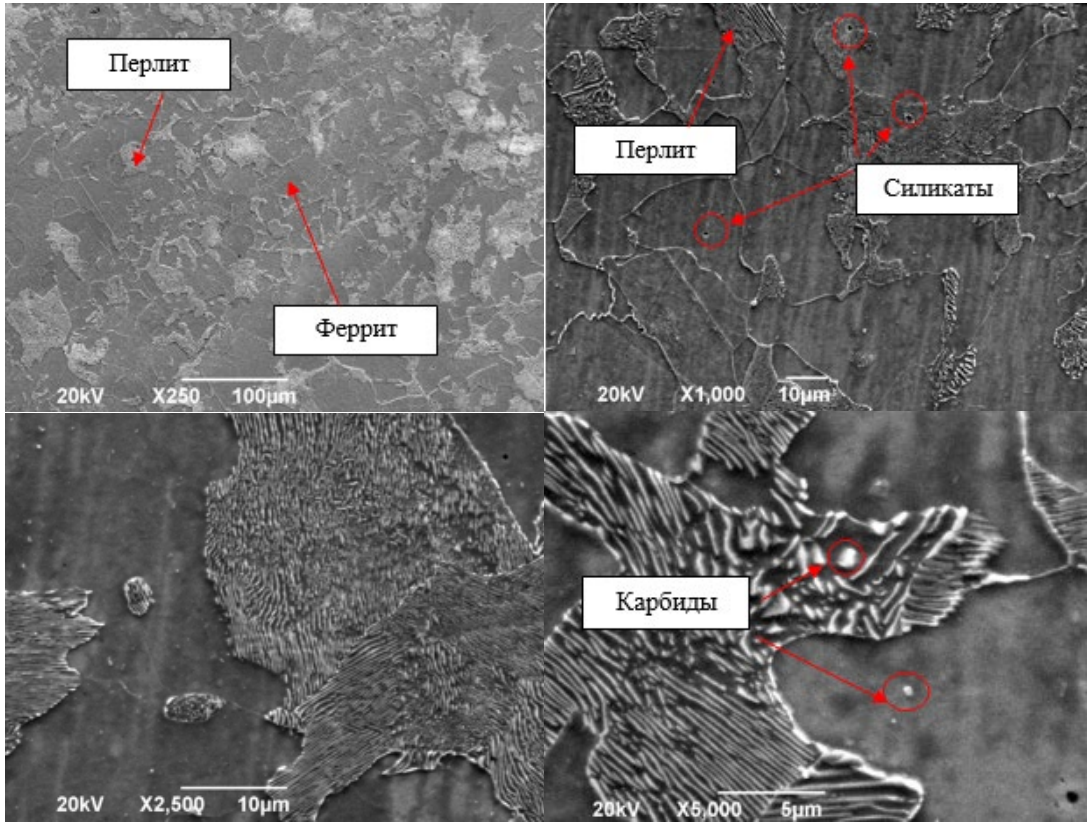


Номер маркера	Содержание элемента, масс.%								
	C	O	Fe	Mn	S	P	Na	Si	Cr
25	21,98	13,69	41,92	-	22,41	-	-	-	-
26	21,45	19,47	40,29	0,21	15,80	0,45	1,09	0,18	0,30
37	10,70	9,05	54,69	0,23	24,91	-	-	0,22	0,21
38	11,57	13,67	72,74	0,97	0,02	-	-	0,85	0,18
39	13,91	29,17	47,55	0,24	8,49	-	-	0,32	0,33

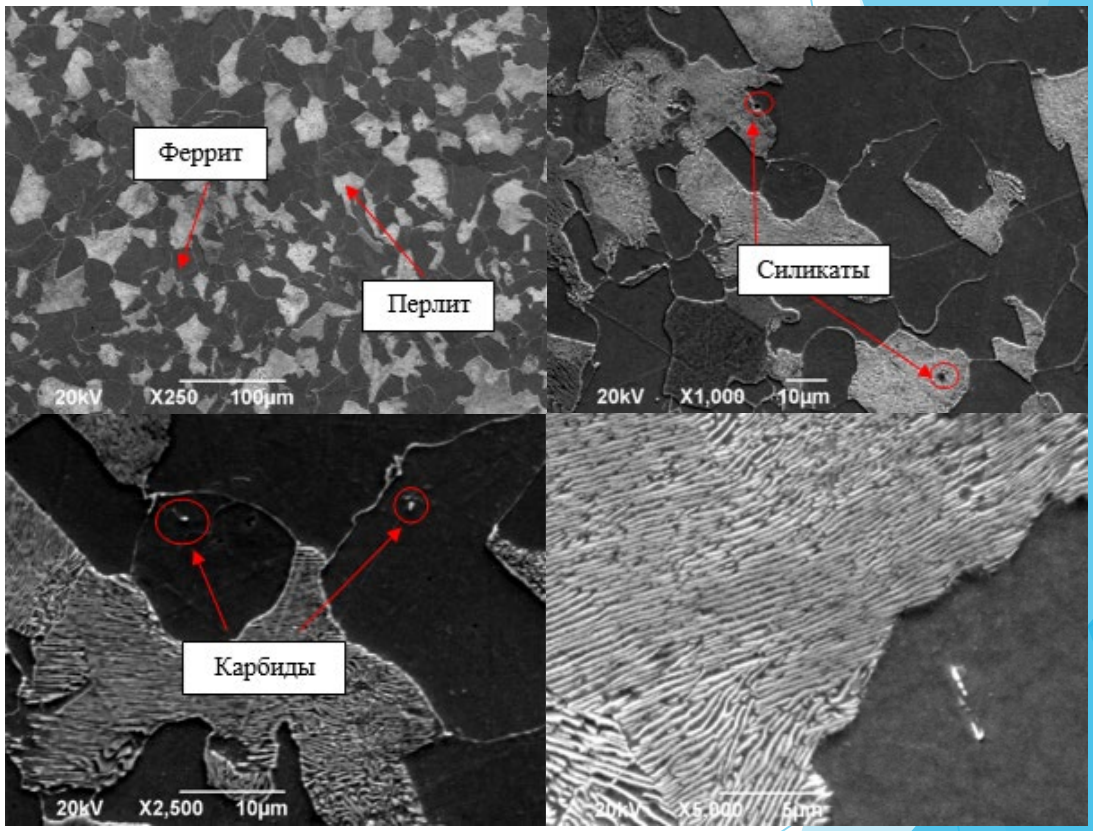
Микроструктурные исследования стали 20Л (нормализация) после проведения СКРН в среде К2

ООО НИПП «Вальма»

5%NaCl+0,4%CH_3COONa в дистиллированной воде, pH_2S – 2800±200 мг/л, pH –5,5



Без разрушения

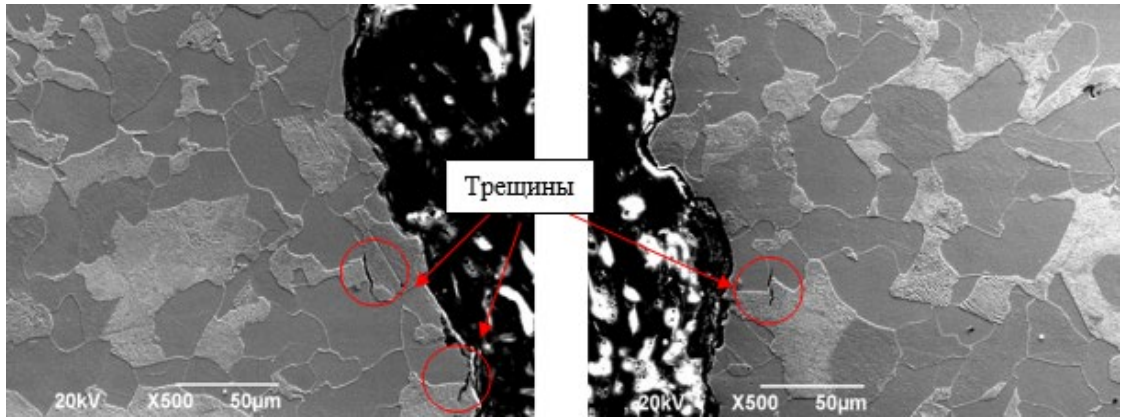


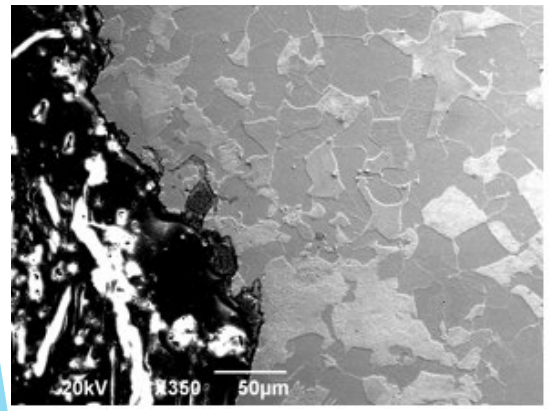
Разрушение через 190 ч

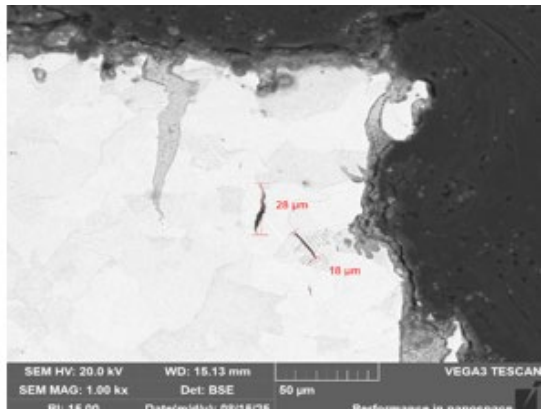
Микроструктурные исследования стали 20Л (нормализация) после проведения СКРН в среде К2

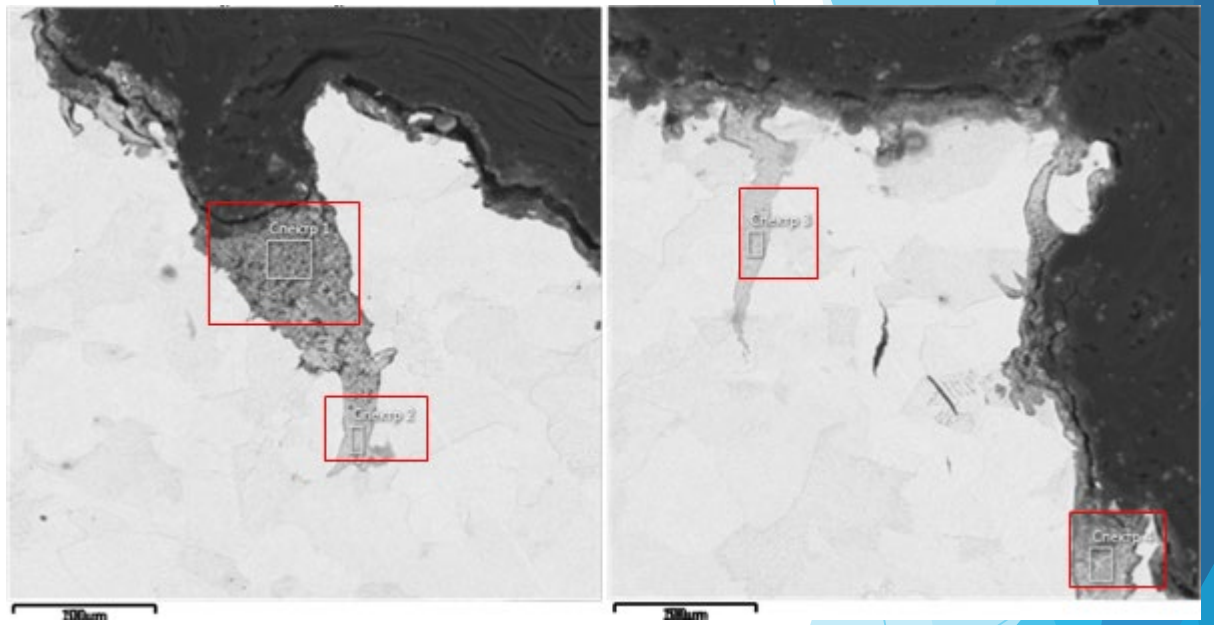
ООО НИПП «Вальма»

5%NaCl+0,4%CH_3COONa в дистиллированной воде, pH_2S – 2800±200 мг/л, pH –5,5









Номер маркера	Содержание элемента, масс.%					
	C	O	S	Fe	Mn	Si
1	44,65	8,32	16,41	30,58	-	0,03
2	13,17	7,37	26,78	52,64	-	0,04
3	10,75	4,21	29,58	55,41	0,02	0,03

Основные выводы

1) Выбраны режимы термической обработки для стали 20Л.

2) Наличие в структуре материала стали марки 20Л игольчатого феррита снижает стойкость данной стали к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН).

3) Наличие крупнозернистой структуры у феррита снижает стойкость стали марки 20Л к СКРН.

Благодарю за внимание!

ООО Научно-исследовательское производственное предприятие «Вальма» (ООО НИПП «Вальма»)
443013, г. Самара, ул. Киевская, 13
Телефоны: (846) 300-47-70, 247-77-73, 247-77-74
E-mail: office@valma63.ru
Сайт: valma63.ru

Блажнов Никита Михайлович, +7-927-603-4924

Результаты опытного и опытно-промышленного производства бесшовных труб из сталей 13Cr

Коновалова Кристина Александровна
Аспирант, НИТУ МИСИС

IX Научно-технической конференции
«КОРРОЗИЯ И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ В НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

03-04.09.2025

Материал исследования

Марка стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	Ti
15Х13Н2 (МИСИС)	0,16	0,33	0,56	0,014	0,010	12,5	0,02	2,0	0,014	0,005
15Х13Н2 (Выксунский завод ОМК)	0,137	0,30	0,63	0,018	0,002	12,9	0,059	1,95	0,01	0,004

Применение: обсадные и насосно-компрессорные трубы повышенной коррозионной стойкости

АО «Корпорация Красный октябрь»

Круглая заготовка Ø 250 мм

ТПЦ Выксунского завода ОМК

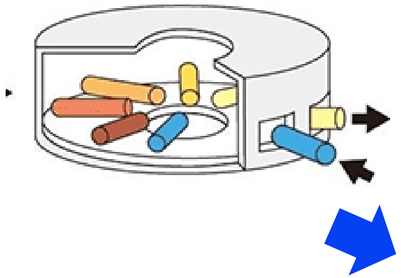
Бесшовная труба размером 168,28х8,94 мм



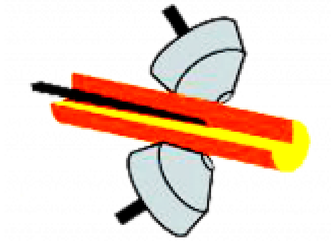
Производство промышленных образцов

Схема технологического процесса (основные этапы) производства бесшовных труб на площадке Выксунского завода ОМК

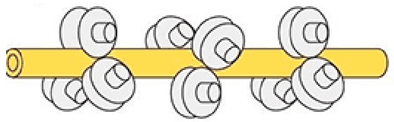
Нагрев в кольцевой печи с вращающимся подом



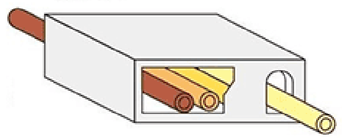
Прошивка на прошивном стане с грибовидными валками и дисками Дишера



Прокатка на непрерывном прокатном стане FQM



Отсутствие повторного нагрева (!)



Извлекательно-калибровочный стан

Участок термообработки

Производство лабораторных образцов

Нагрев трубных заготовок под температуру горячей винтовой прошивки 1180-1200 °С на стане «МИСиС-130Д»

Формирование диаметра и толщины стенки трубы

Резка и подготовки образцов для исследований – проведение термической обработки







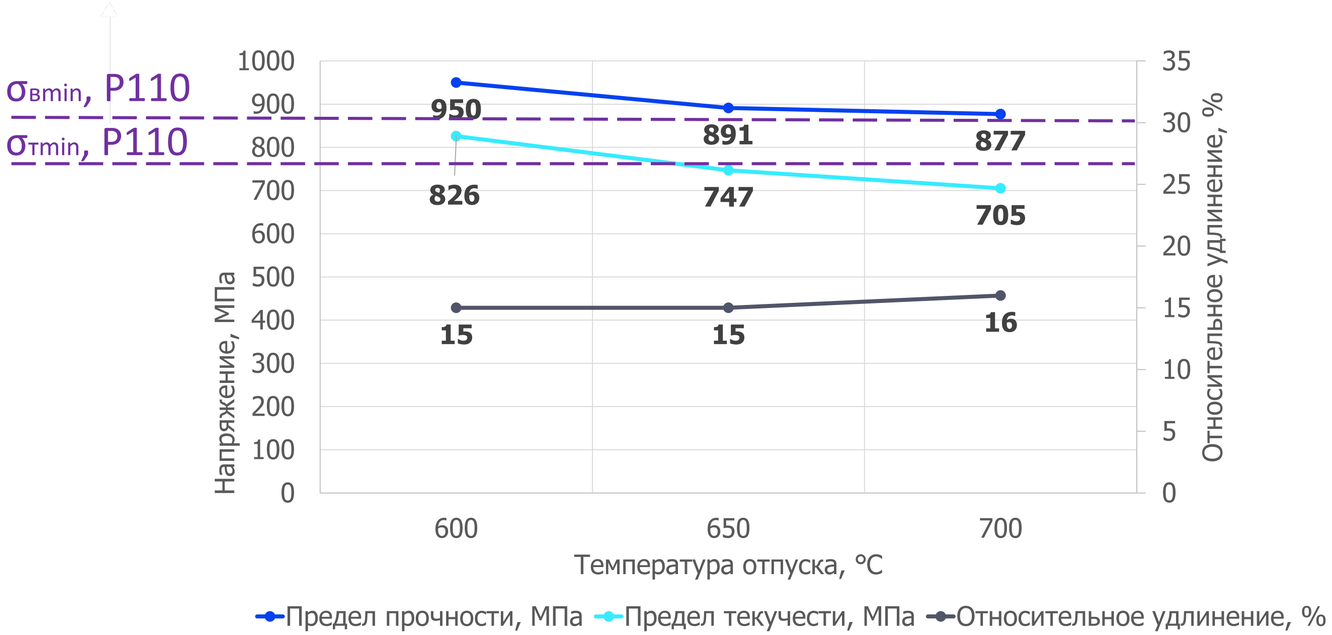
Горячая винтовая прошивка гильз в черновую трубу

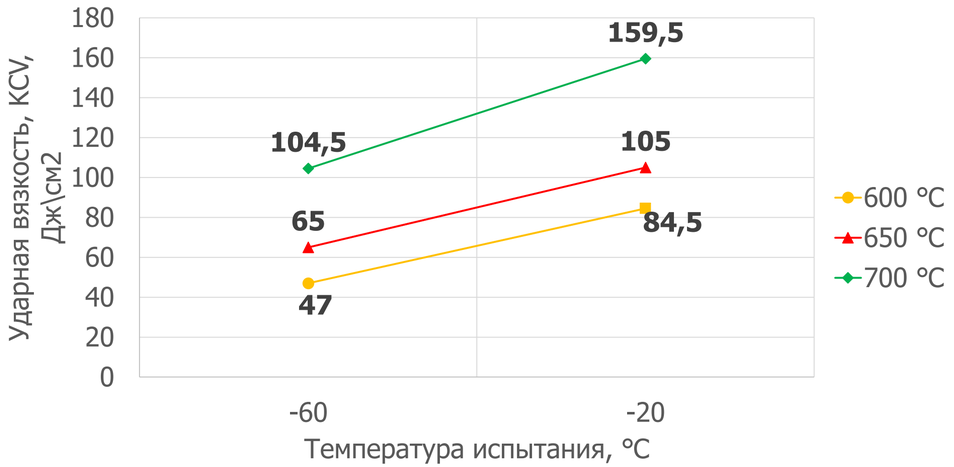
Влияние температуры отпуска на механические свойства и хладостойкость лабораторных образцов

Температура закалки: 950 ℃ (воздух)

Температура отпуска: **600/650/700 ℃** (воздух)

Термическая обработка	Соответствие группе прочности
950+600	**P110**
950+650	**R95**
950+700	**R95**





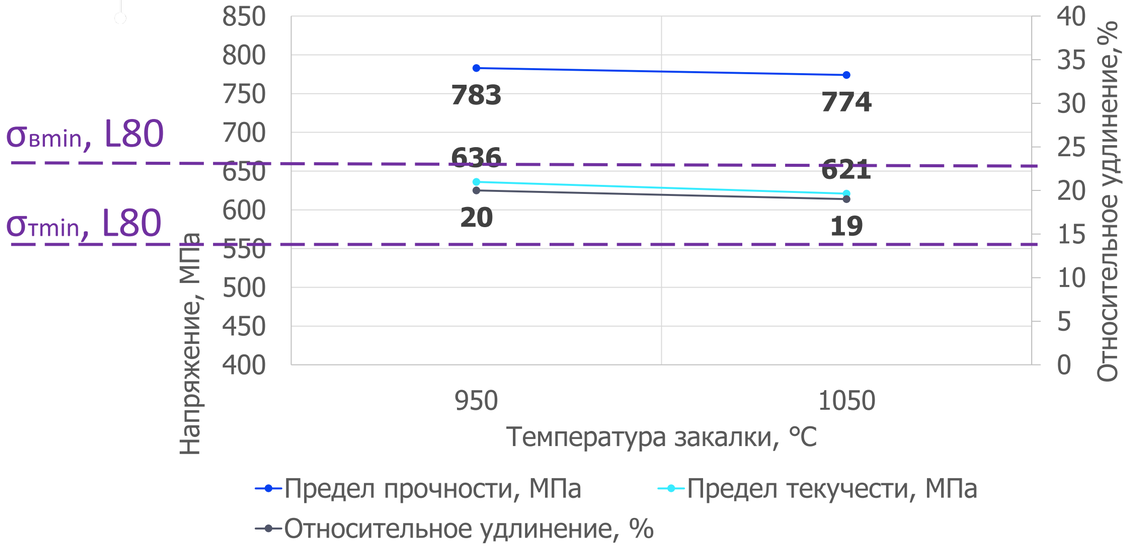
Влияние температуры закалки на механические свойства и хладостойкость лабораторных образцов

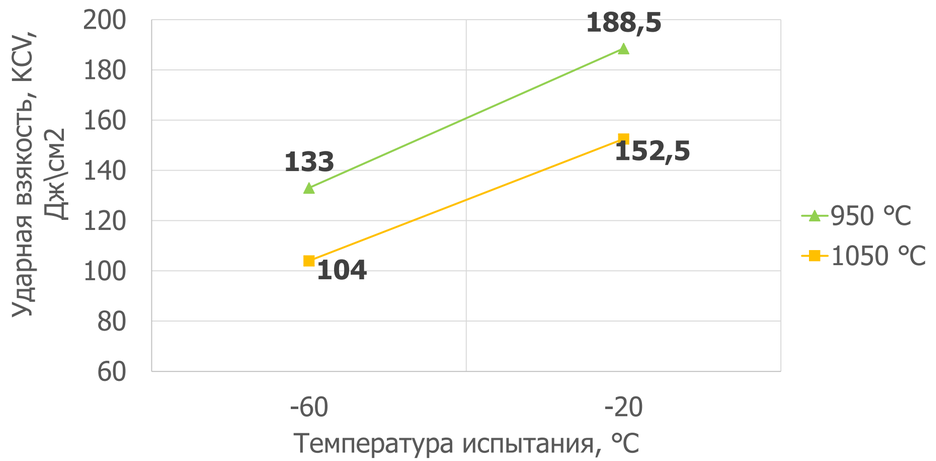
Температура первой закалки: **950/1050 ℃** (воздух)

Температура закалки из МКИ: 760 ℃ (воздух)

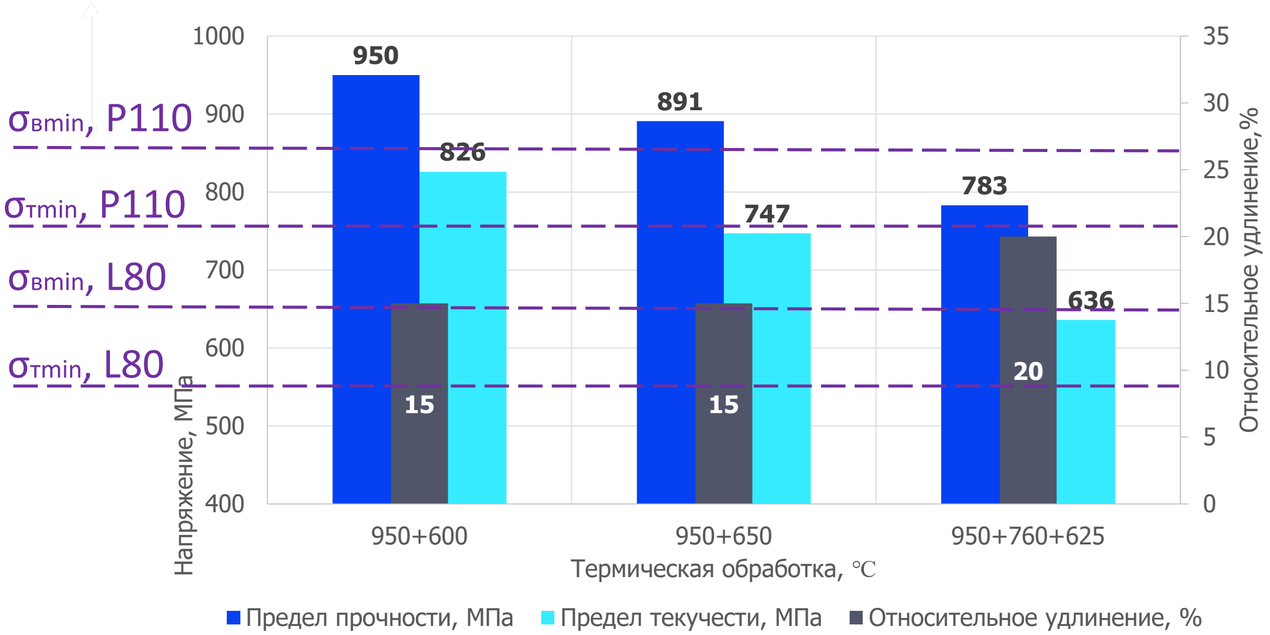
Температура отпуска: 625 ℃ (воздух)

Термическая обработка	Соответствие группе прочности
950+760+625	**L80**
1050+760+625	**L80**

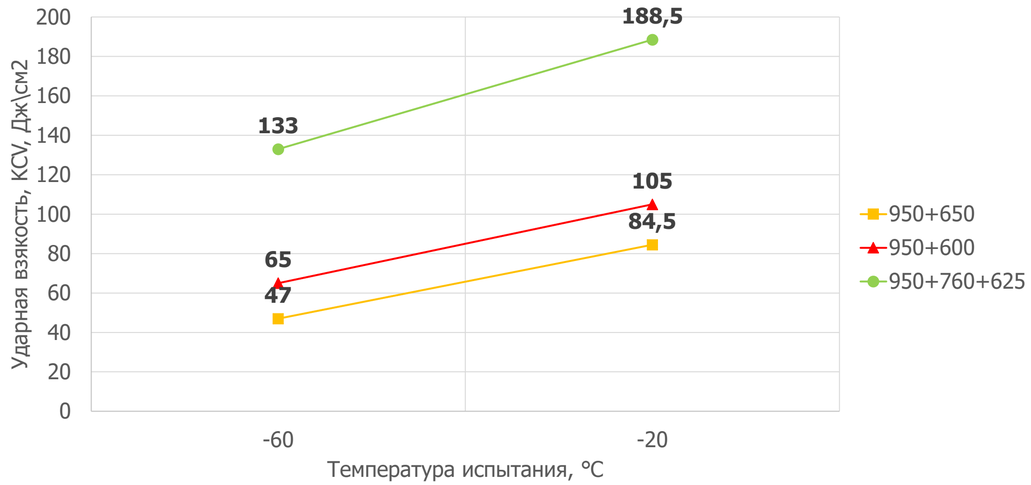




Сравнительный анализ лабораторных образцов после различных видов ТО

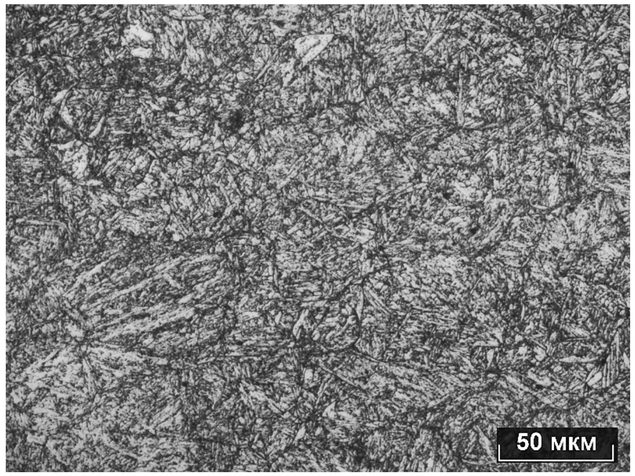


Термическая обработка	Соответствие группе прочности
950+600	**P110**
950+650	**R95**
950+760+625	**L80**

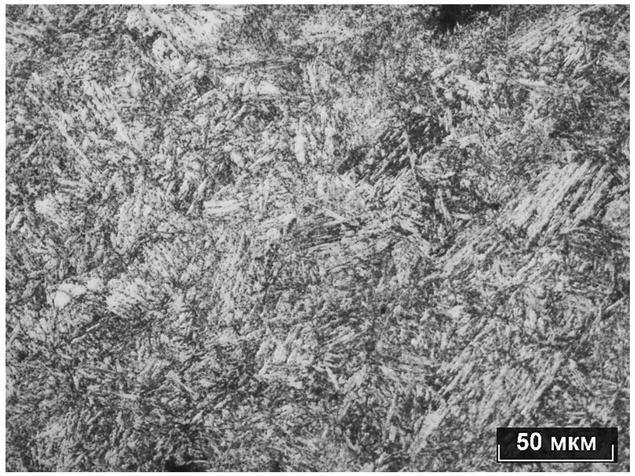


Структура лабораторных образцов после различных видов ТО

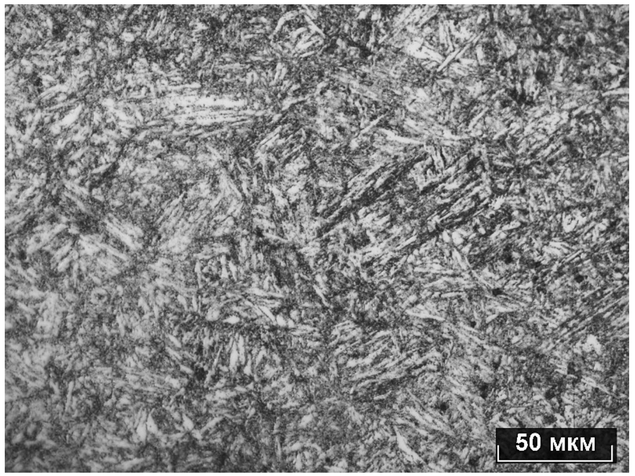
Закалка 950 °С + отпуск 600 °С



Закалка 950 °С + отпуск 650 °С

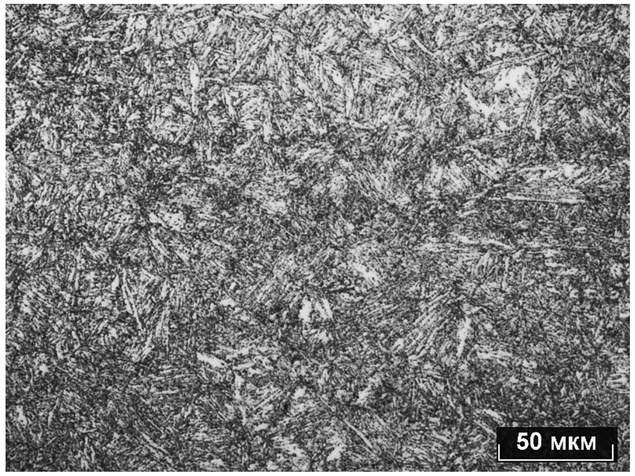


Закалка 950 °С + отпуск 700 °С

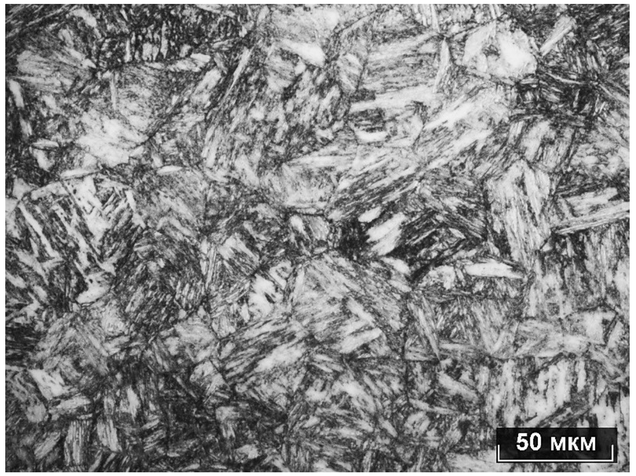


Структура: феррито-карбидная смесь

Закалка 950 °С + закалка 760 °С + отпуск 625 °С



Закалка 1050 °С + закалка 760 °С + отпуск 625 °С



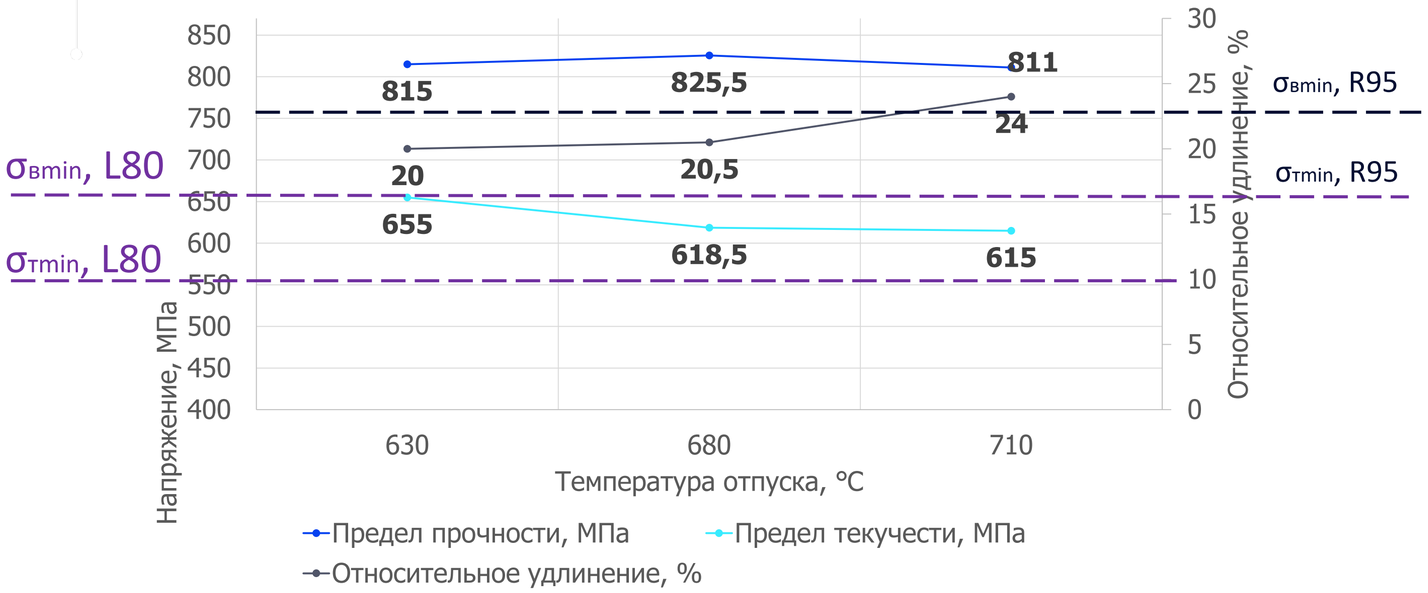
Влияние температуры отпуска на механические свойства и хладостойкость промышленных образцов

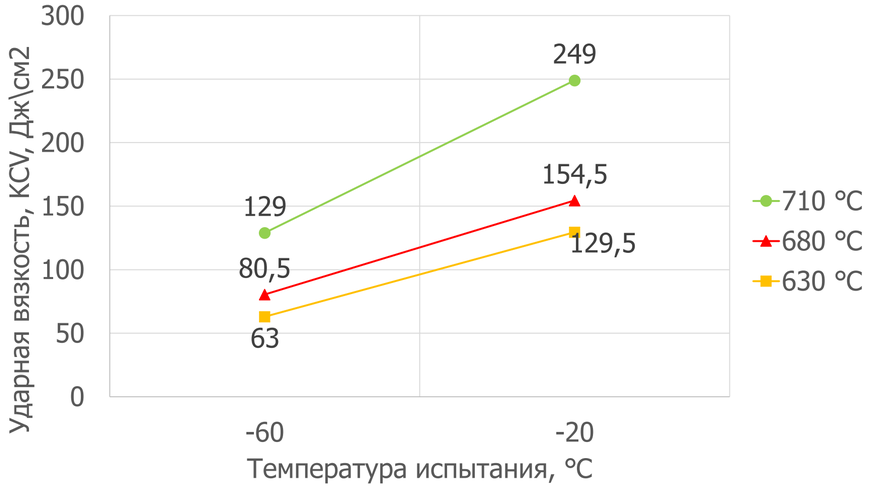
Температура первой закалки: 950 °С (воздух)

Температура закалки из МКИ: 760 °С (воздух)

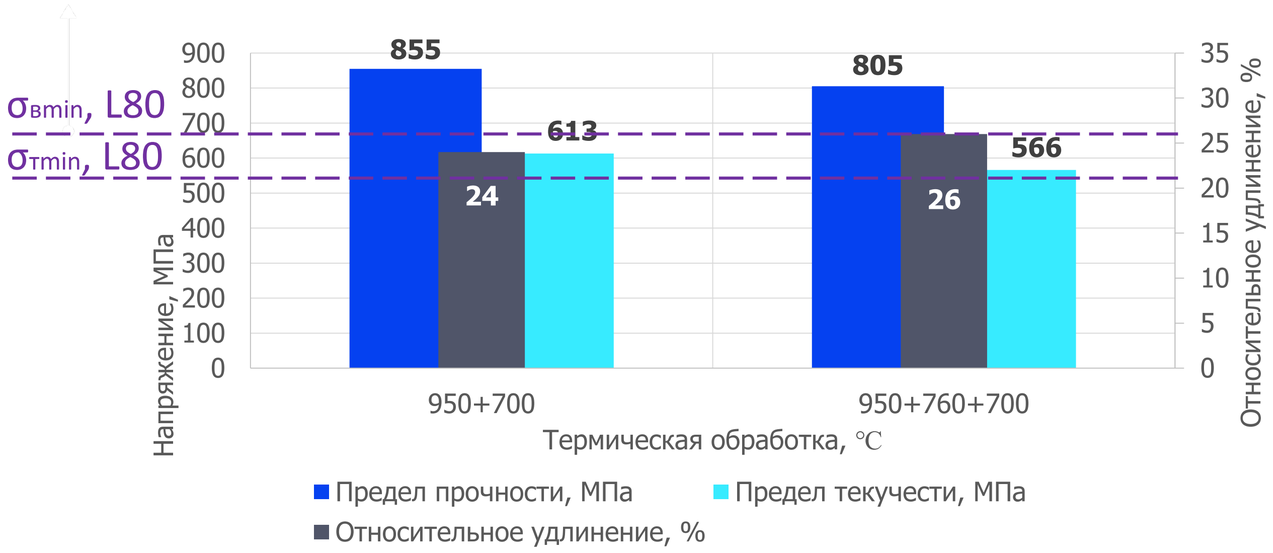
Температура отпуска: **630/680/710** °С (воздух)

Термическая обработка	Соответствие группе прочности
950+760+630	**L80**
950+760+680	**L80**
950+760+710	**L80**

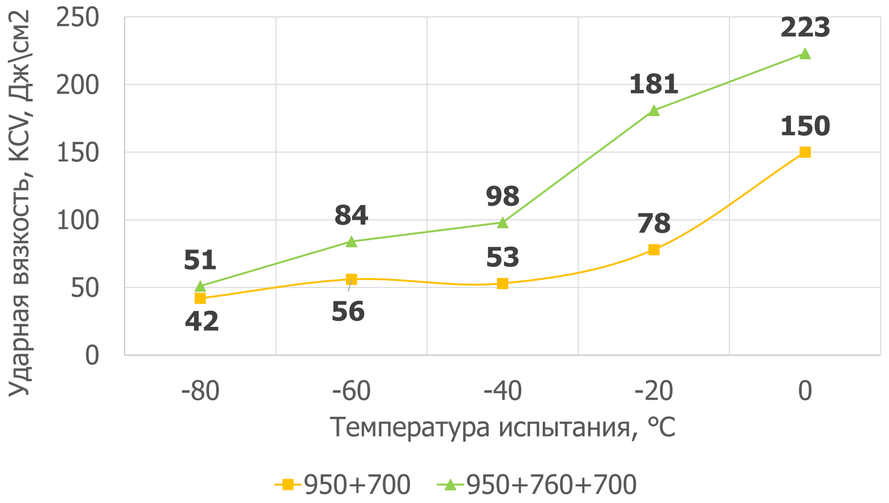




Сравнительный анализ промышленных образцов после различных видов ТО



Термическая обработка	Соответствие группе прочности
950+700	**L80**
950+760+700	**L80**



Результаты коррозионных испытаний

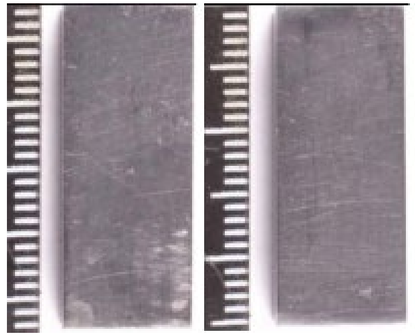
Условия проведения испытания общей коррозии
Стандарт NACE TM0169/G31-2021

Время испытания: 72 ч
Температура испытания: 60 ℃
Испытательная среда: водный раствор 5% NaCl, насыщенный CO_2
Давление: 40 атм.
Материал: 15Х13Н2 , ТО: 950+760+700
Размеры образцов: 25х10х4 мм

Образцы после испытания



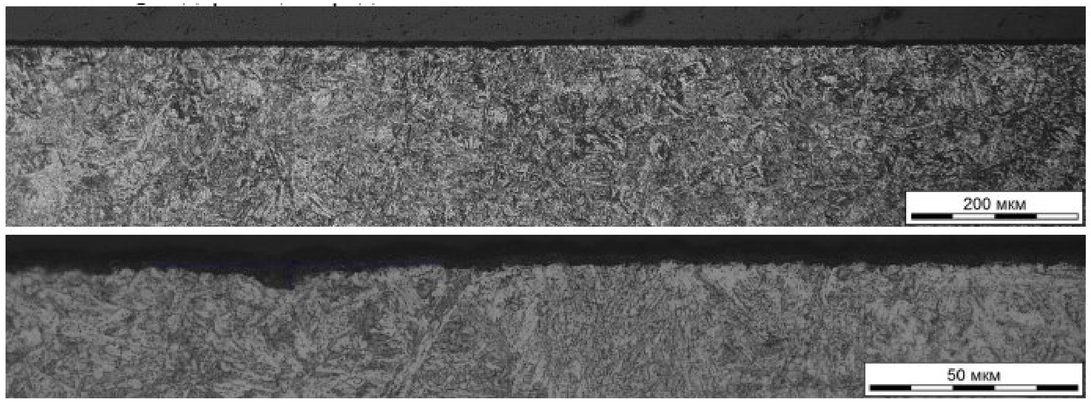
до очистки
от продуктов коррозии



после очистки
от продуктов коррозии

Установка для
проведения испытания





Результаты опытного и опытно-промышленного производства бесшовных труб из сталей 13Cr

На поверхности были выявлены кристаллы хлорида натрия (NaCl) осадочного происхождения; **коррозионных поражений (питтингов) не выявлено**

Скорость коррозии: $V_{ср} = 0,01$ мм/год

Результаты коррозионных испытаний

Условия проведения испытания к SSC
Стандарт NACE TM0177, метод А

Время испытания: 720 ч
Температура испытания: 22 - 24 ℃
Испытательная среда: раствор А (5% NaCl и 0,5% CH3COOH)
Раствор насыщения: H_2S
Материал: 15Х13Н2, ТО: 950+760+700

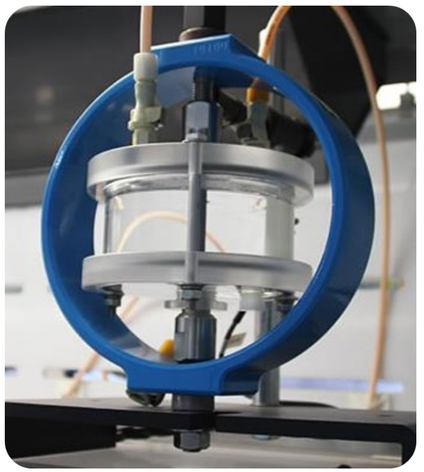


Образцы до испытания



Образцы после испытания

Установка для проведения испытаний в среде H_2S



Образец	Минимальный σт, МПа	Напряжение испытания, МПа	Процент от минимального σт, МПа	Наличие/ отсутствие дефекта
15Х13Н2 (Выксунский завод ОМК)	655	479	72	Не обнаружено

Промежуточные результаты

В качестве материала для производства обсадных и насосно-компрессорных бесшовных труб повышенной коррозионной стойкости предложена сталь 15Х13Н2. В лабораторных условиях продемонстрирована возможность достижения группы прочности Р110 (закалка 950 °С + отпуск 600 °С), а также после применения двойной закалки достижение L80 в хладостойком исполнении.

Произведена опытно-промышленная партия бесшовных труб размером 168,28х8,96 мм из стали 15Х13Н2 в условиях ТПЦ Выксунского завода ОМК.

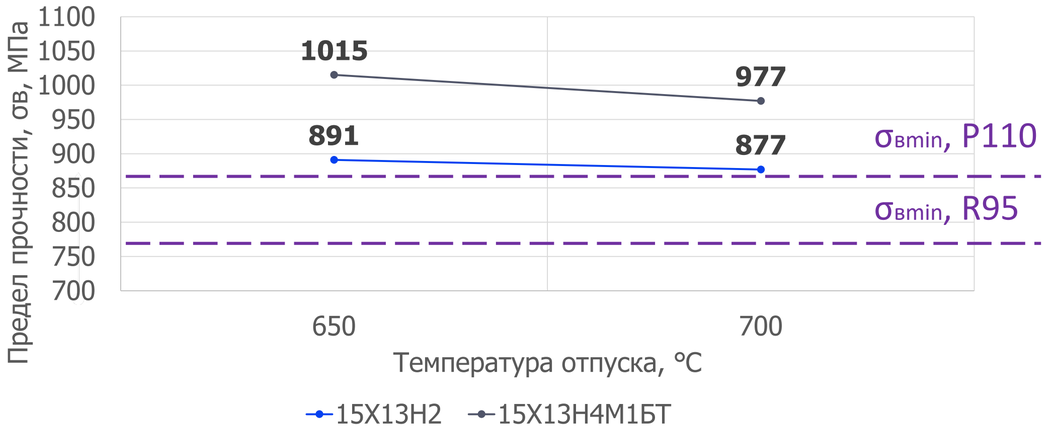
В ходе исследований опытно-промышленной партии установлено, что применение закалки с высокотемпературным отпуском позволяет достичь группы прочности L80. Достичь группы прочности L80 в хладостойком исполнении позволяет применение двойной закалки (полная закалка + из МКИ) с высокотемпературным отпуском. Ударная вязкость после двойной закалки при минус 20 °С и при минус 60 °С в 1,5 раза превышает ударную вязкость после одинарной закалки.

Материал исследования

Химический состав лабораторных образцов, массовая доля %

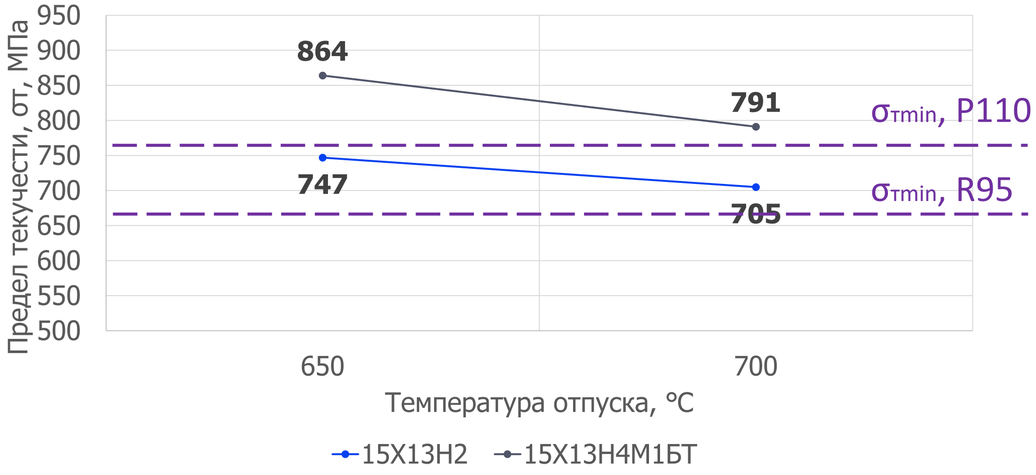
Марка стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	Ti	
15Х13Н2	0 ,16	0,33	0,56	0,014	0,010	12,5	0,02	2,0	0,014	0,005	без микролегирования
15Х13Н4М1БТ	0,11	0,66	0,51	0,005	0,006	12,8	0,96	3,9	0,140	0,018	микролегирование Nb и Ti

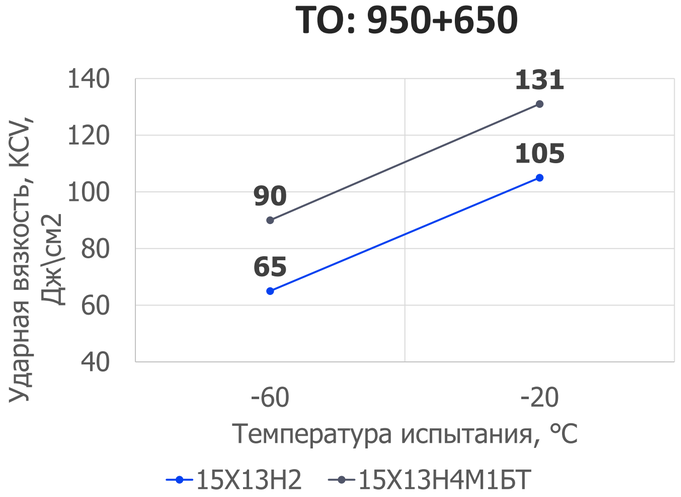
Сравнение результатов лабораторных плавок после закалки и отпуска

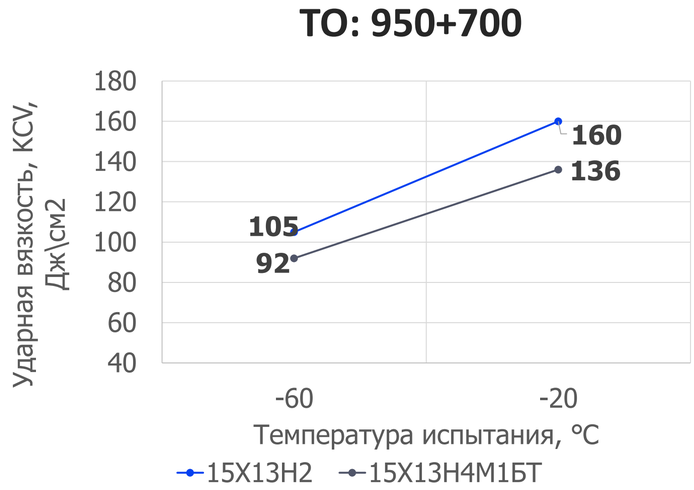


Образец	Термическая обработка		Соответствие группе прочности
	Закалка, ℃	Отпуск, ℃	
15Х13Н2	950	650	**R95**
		700	**R95**
15Х13Н4М1БТ	950	650	**Р110**
		700	**Р110**

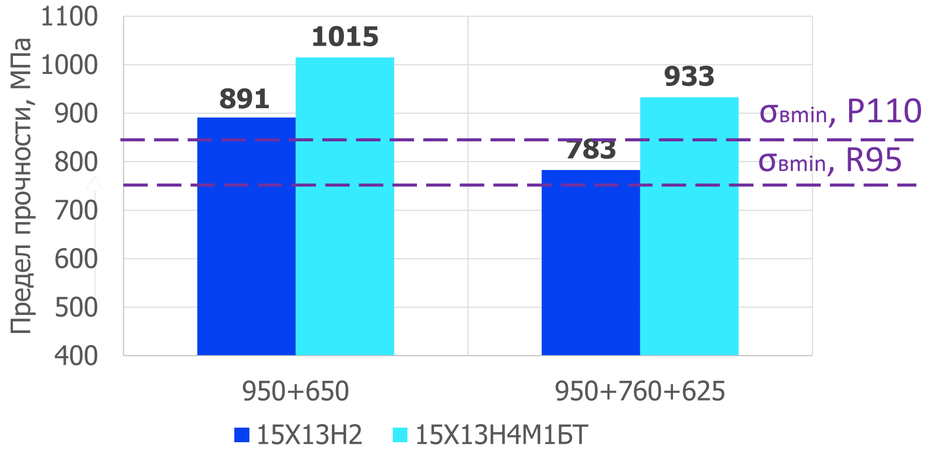
*относительное удлинение изменяется не значительно





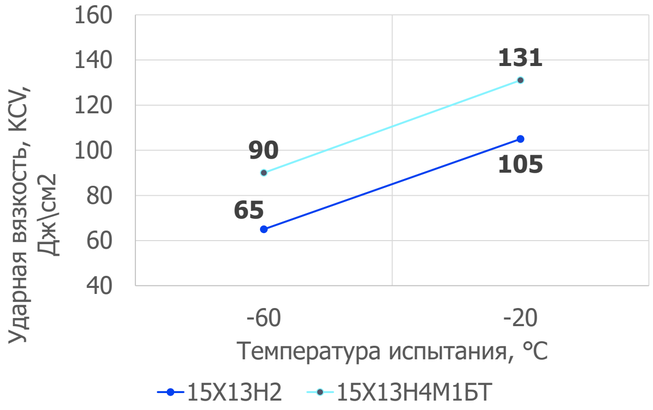


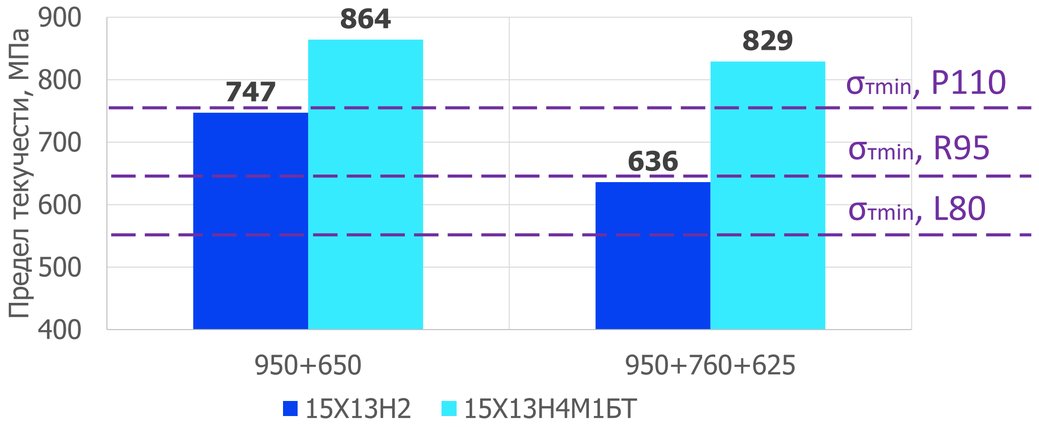
Сравнение результатов лабораторных плавок после различных видов ТО

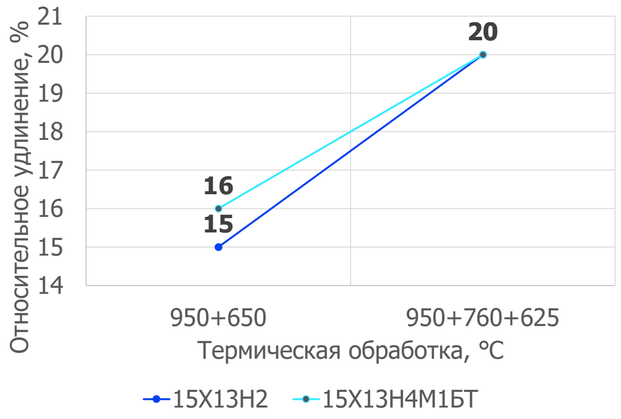


Образец	Термическая обработка	Соответствие группе прочности
15Х13Н2	950+650	**R95**
	950+760+625	**L80**
15Х13Н4М1БТ	950+650	**P110**
	950+760+625	**P110**

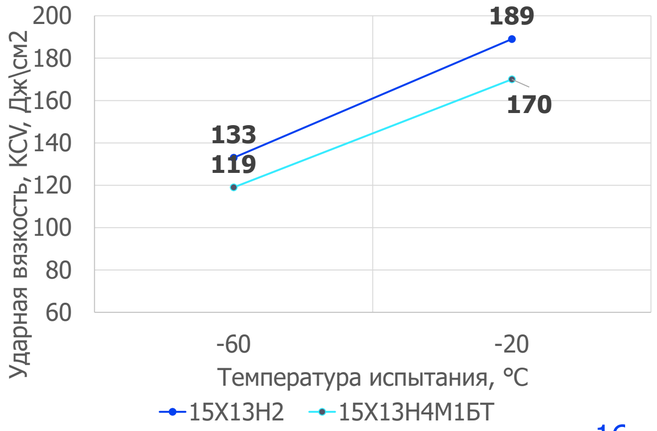
ТО: 950+650







ТО: 950+760+625



Выводы

В качестве материала для производства обсадных и насосно-компрессорных бесшовных труб повышенной коррозионной стойкости предложена сталь 15Х13Н2. Произведена опытно-промышленная партия бесшовных труб размером 168,28х8,96 мм из стали 15Х13Н2 в условиях ТПЦ Выксунского завода ОМК.

В ходе исследований опытно-промышленной партии установлено, что применение закалки с высокотемпературным отпуском позволяет достичь группы прочности L80. Достичь группы прочности L80 в хладостойком исполнении позволяет применение двойной закалки (полная закалка + закалки из МКИ) с высокотемпературным отпуском. Ударная вязкость после двойной закалки при минус 20 °С и при минус 60 °С в 1,5 раза превышает ударную вязкость после одинарной закалки.

Для достижения группы прочности Р110 в хладостойком исполнении исследовано дополнительное микролегирование Nb и Ti. В лабораторных образцах микролегирование Nb и Ti гарантирует после одинарной и двойной закалки достижение Р110 в хладостойком исполнении.

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

Спасибо за внимание!

Исследование выполняется в рамках проекта «Разработка и внедрение комплексных технологий производства бесшовных труб из сталей нового поколения с управляемой коррозионной стойкостью при осложненных условиях эксплуатации для топливно-энергетического комплекса Российской Федерации» в рамках Соглашения №075-11-2023-011 от 10.02.2023 г. по постановлению Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г.

Выражаю благодарность сотрудникам коллективов:
ИТЦ Выксунскому заводу ОМК, кафедре ОМД и НИЛ «ГНМ» (НИТУ МИСИС), а также ООО «ИТ-Сервис» и НТИ СПбПУ

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Освоение промышленного производства, исследование качества и стойкости поковок из супердуплексной стали UNS S32750 к питтинговой коррозии

IX Научно-техническая конференция «КОРРОЗИЯ И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ В НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

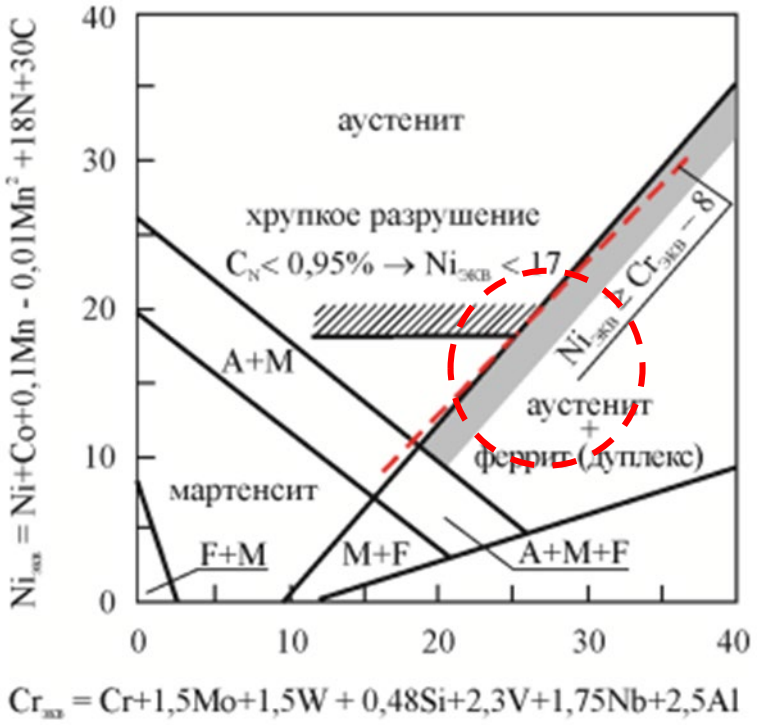
Левков Л.Я., Терехин Д.К., Уткина К.Н. (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)
Калмыков А.А., Сапунов А.Л. (АО «Русполимет»)

02-04.09.2025

Направление исследования

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Дуплексные стали - подкласс аустенитно-ферритных сталей (АФС) с соотношением аустенита и феррита ~ 1:1



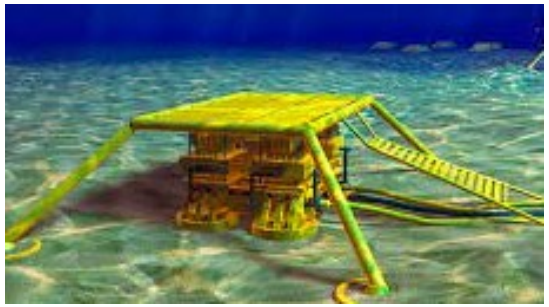
PREN = Cr+3,3·(Mo+0,5·W) +16·N

PREN ≤ 40 – дуплексные (ДС)

PREN = 40-45 – супердуплексные (СДС)

PREN > 45 – гипердуплексные (ГД)

CPT = 2,5·Cr+7,6·Mo+31,9 N - 41









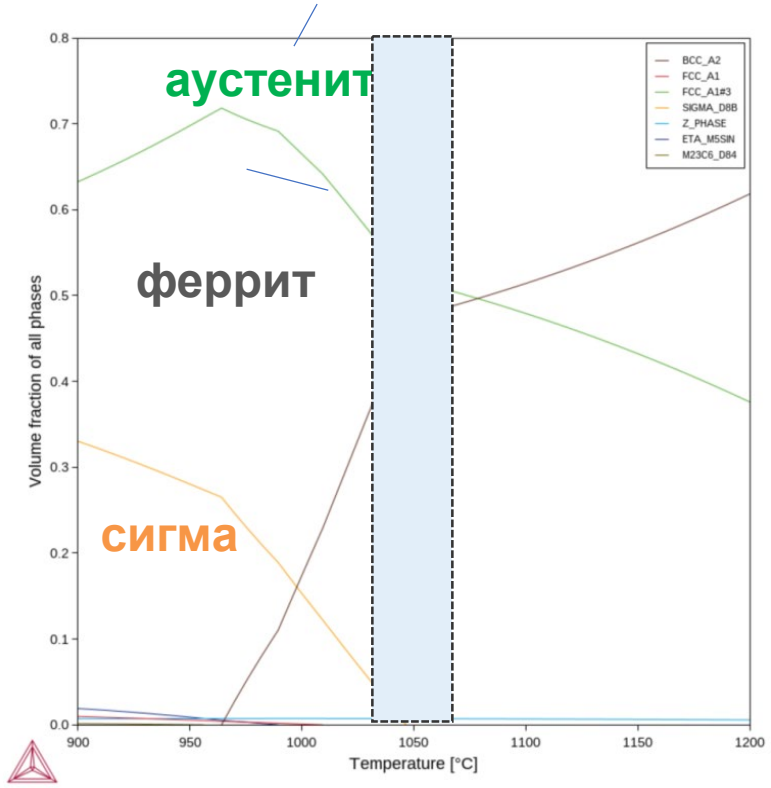


Российские заводы начинают осваивать технологии производства поковок, труб, сортового проката, литья, сварочных материалов из СДС

Основные проблемы технологии производства СДС

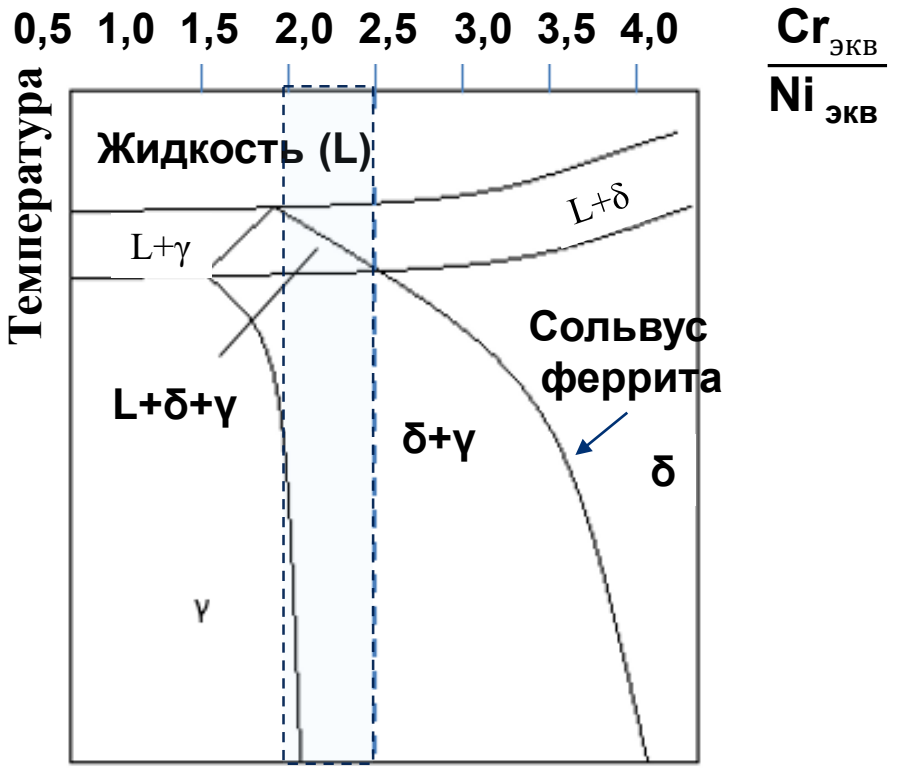
ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

- Неоптимальная технологии выплавки и разливки
- Обеспечение стабильности фазового состава



- Особенности кристаллизации слитка СДС с учетом низкой растворимости азота в δ-феррите

$$L \rightarrow L+\delta \rightarrow L+\delta+\gamma \rightarrow \delta+\gamma$$



Область наиболее благоприятных условий изменения фазового состава

Подходы к повышению качества СДС

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ



Оптимизация целевого химического состава на этапе выплавки

Управление условиями формирования слитка за счет применения ЭШП и принудительного охлаждения поверхности слитка

- Физическая и химическая однородность;
- Фазовая стабильность: феррит и аустенит в соотношении 1:1, содержание вторичных фаз ≤ 0,5 % об.
- Высокие механические характеристики (прочностные и вязкопластические);
- Коррозионная стойкость в морской воде, H_2S, под напряжением, низкая скорость общей коррозии, CPT, PREN и др. ;

Определены задачи исследований, реализация которых затрагивает стали UNS S32750 и 03Х24Н6АМ3 усовершенствованного состава

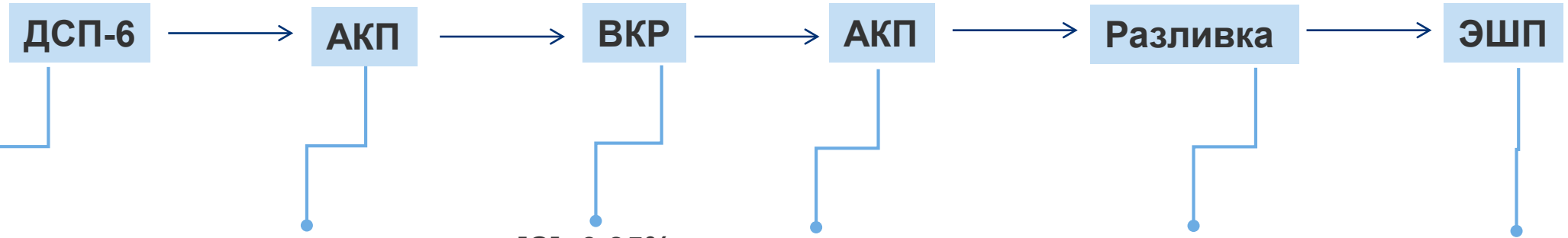
Реализация композиционного подхода
Критерии качества СДС на примере стали UNS S32750

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

№	Критерий	Зависимость критерия от химического состава	Величина
1	Фаз. стабильность	$X_f/X_a=5,52+10,24\cdot C-3,3\cdot Si+0,15\cdot Mn-0,77\cdot Cr+1,14\cdot Ni-0,6\cdot Mo+10,21\cdot N+182,4\cdot C^2+0,54\cdot Si^2-0,03\cdot Mn^2+0,04\cdot Cr^2+0,12\cdot Ni^2+0,05\cdot Mo^2-2,72\cdot N^2-4,25\cdot C\cdot Si-2,55\cdot C\cdot Mn-2\cdot C\cdot Cr+3,58\cdot C\cdot Ni-2,57\cdot C\cdot Mo+54,53\cdot C\cdot N-0,17\cdot Si\cdot Mn+0,25\cdot Si\cdot Cr-0,4\cdot Si\cdot Ni+0,27\cdot Si\cdot Mo-3,69\cdot Si\cdot N+0,01\cdot Mn\cdot Cr+0,03\cdot Mn\cdot Ni-0,05\cdot Mn\cdot Mo-0,23\cdot Mn\cdot N-0,13\cdot Cr\cdot Ni+0,08\cdot Cr\cdot Mo-Cr\cdot N-0,15\cdot Ni\cdot Mo+2,15\cdot Ni\cdot Mo-1,47\cdot Mo\cdot N \pm 0,14$	$X_f/X_a=1$
2		$T_{Cr2N} \le 954,5-128,84\cdot Si-25,1\cdot Mn+0,44\cdot Cr^2+2,63Ni^2-44,3\cdot C\cdot Cr+107,8\cdot C\cdot Ni-10,07\cdot Si\cdot Cr-3,39\cdot Si\cdot Ni+5,02\cdot Si\cdot Mo+2,29\cdot Mn\cdot Ni-2,54\cdot Cr\cdot Ni+1,45\cdot Cr\cdot Mo-2,47\cdot Ni\cdot Mo+54,41\cdot Ni\cdot N \pm 5,14$	$T_{Cr2N} \le 1075$ °C
3	Корроз. стойкость	$PREN = Cr+3,3\cdot(Mo+0,5\cdot W)+16\cdot N$	$PREN \ge 41$
4		$CPT = 2,5\cdot Cr+7,6\cdot Mo+31,9\,N-41$	$CPT \ge 55$ °C
5	Хим.однородность	$-0,001\cdot\sigma^2-0,02\cdot\sigma+27,4 < 4,9\cdot C+0,16\cdot(Si+Mn)+0,96\cdot Cr+0,57\cdot Ni-0,44\cdot Mo+1,1\cdot N+0,65\cdot Cu-0,14\cdot Nb$	% об. σ-фаза ≤ 0,5
6	Физ. однородность	$\lg N_\delta=\frac{82,21}{T}-\left(\frac{78,3}{T}+0,12\right)\cdot C-\left(\frac{274}{T}+0,011\right)\cdot Si-\left(-\frac{59,8}{T}+0,0097\right)\cdot Mn-\left(-\frac{145,8}{T}-0,056+0,0171\cdot\lg T\right)\cdot Cr-\left(\frac{32,4}{T}-0,0056\right)\cdot Ni-\left(\frac{7,3}{T}-0,086\right)\cdot Mo-\left(\frac{386}{T}-0,158\right)\cdot N-\left(-\frac{1540}{T}+0,79\right)\cdot 0,044-\left(-\frac{131}{T}+0,075\right)\cdot 0,01-0,179-\left(\frac{0,8}{T}+0,0013\right)\cdot Cr^2-\left(\frac{0,318}{T}-0,0002\right)\cdot Mn^2-\left(\frac{2,16}{T}-0,005\right)\cdot Cr\cdot Mn-2,09$	$N_\delta < N_{ку} < 0,31\%$ масс.
7		$Cr_{экв}/Ni_{экв}=\frac{Cr+1,5\cdot Mo+0,48\cdot Si+0,18}{Ni+0,5\cdot Mn+25\cdot N+30\cdot C+0,04}$	$Cr_{экв}/Ni_{экв} < 2,0$

Реализация технологических рекомендаций

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ



- Лом, отходы собственного производства,
- Продувка кислородом;
- Феррохром,
- Скачивание шлака,
- Выпуск металла

при Т≈1660 °С

Наведение шлака и нагрев металла до температуры 1620 ºС,
Корректировка хим.состава по Cr, Mo, C
- нагрев металла до Т=1668 ºС и скачивание шлака

[C]=0,35%
↓
[C]=0,017-0,024%

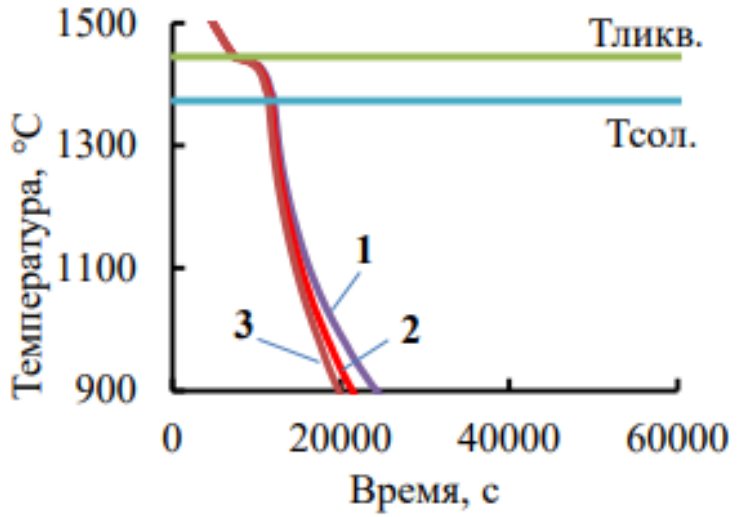
Раскисление до $a_0 \leq 3,5$ ppm и ввод ФХН10 при Т≤1550 ℃

Т≤1535 ℃

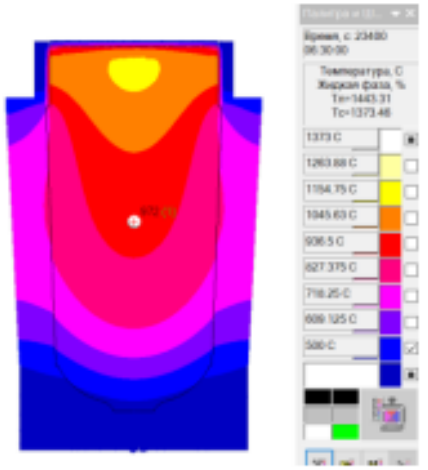
Организация принудительного охлаждения слитков ЭШП

Корректировка состава флюса для обеспечения температуры плавления 1225-1270 ℃; Скорость плавления 460±20 кг/ч

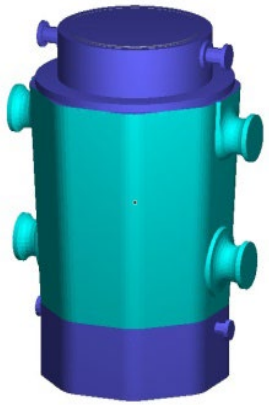
Обоснование предложенного технического решения

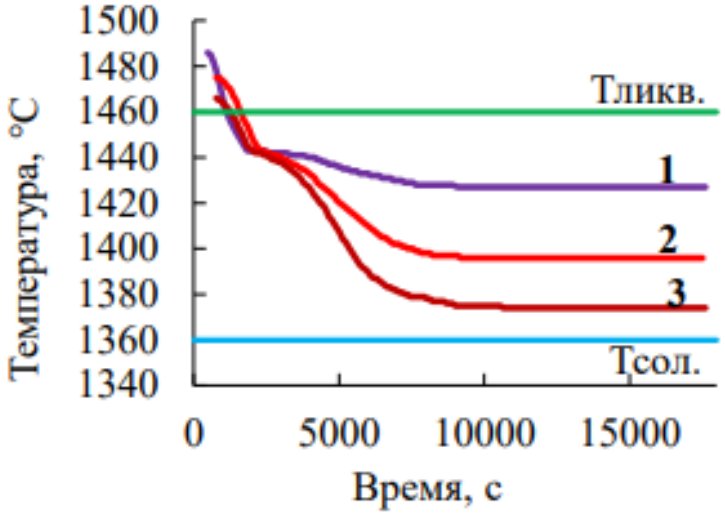


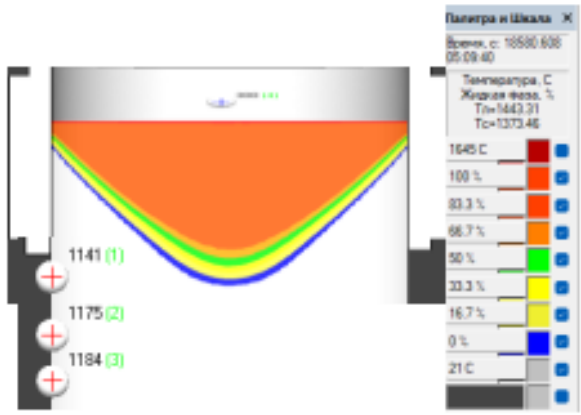
а



Кузнечный слиток







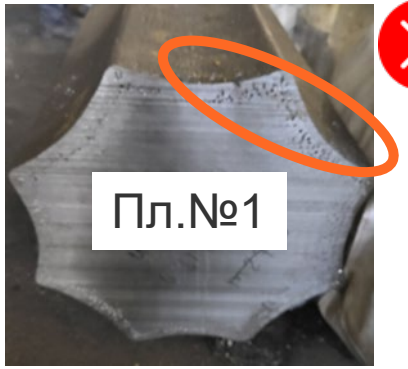
Слиток ЭШП

1 - в условиях без принудительного охлаждения,
2, 3 - с принудительным воздушным охлаждением

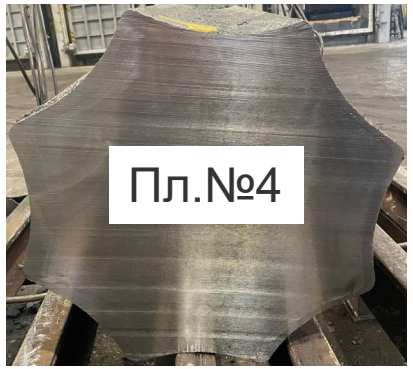
Химические составы кузнечных слитков и расходуемых электродов стали UNS S32750, % масс.

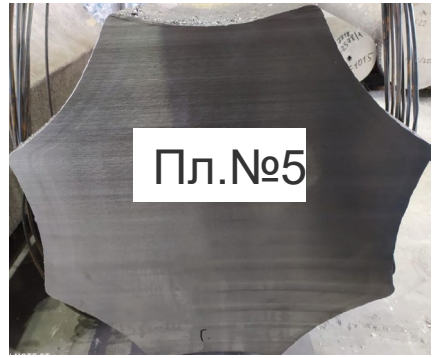
ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

Описание слитка	Содержание элементов, % масс.									Поры
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	
Пл. № 1 кузн. слиток 3 т	0,028	0,23	0,018	0,001	0,46	25,0	6,37	4,13	0,31	есть
Пл. № 2 расх. эл-д. Ø 277 мм	0,033	1,04	0,02	0,001	0,47	25,7	6,38	4,46	0,35	есть
Пл. № 3 кузн. слиток 3 т	0,021	1,03	0,018	0,001	0,26	25,4	6,53	4,29	0,28	есть
Целевой состав	0,018	0,80	0,018	0,001	0,30	25,5	6,53	3,9	0,26	-
Пл. № 4 кузн. слиток 3 т	0,018	0,81	0,020	0,001	0,42	24,5	7,33	3,76	0,26	нет
Пл. № 5 кузн. слиток 3 т	0,024	0,74	0,026	0,001	0,37	24,7	6,9	3,9	0,25	нет
Требования P015-D07-T-016 рев. B	≤0,03	≤1,2	≤0,035	≤0,02	≤0,8	24,0 26,0	6,0 8,0	3,0 5,0	0,24 0,32	-
Допустимые отклонения +/-	0,005	0,04	0,005	0,005	0,05	0,25	0,1	0,1	0,03	-

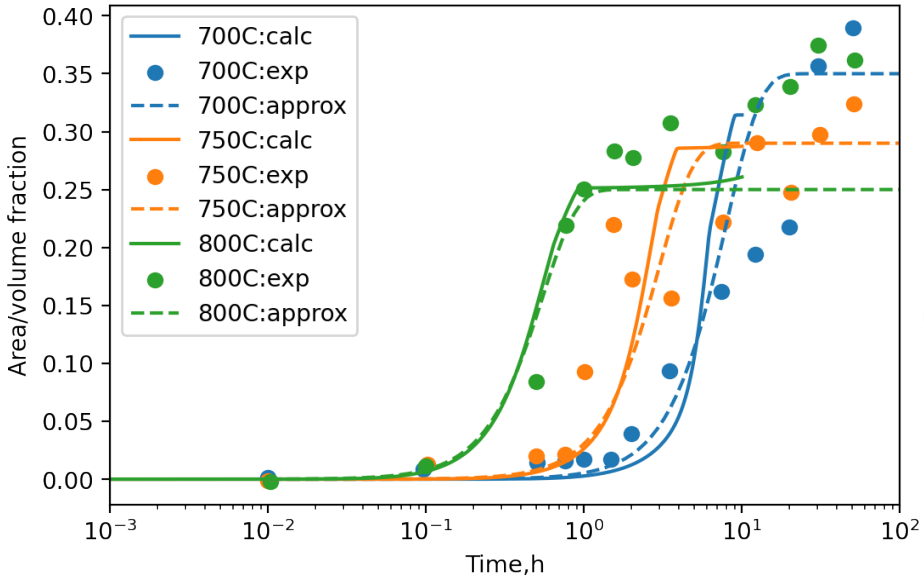








Создание модели, описывающей выделение σ-фазы при изотермической выдержке

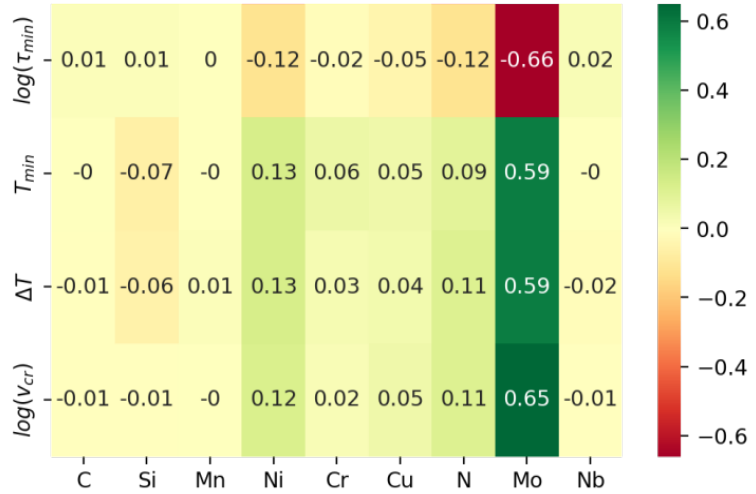


$$\gamma(T) = 4 \cdot 10^{-7}(T - 750°C)^2 - 3 \cdot 10^{-4}(T - 750°C) + 0{,}067 \quad (12)$$

Для описания кинетики образования σ-фазы предложена зависимость:

$$V^{\sigma}(t) = V^{\sigma}_{max} \cdot \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau(T)}\right)^2\right)\right] \quad (13)$$

$V^{\sigma}(t)$ и $V^{\sigma}max$ – текущее и максимальное значения объемной доли σ- фазы
t и τ(T) – текущее время и определяемый параметр



$$\log\tau(T) = \log\tau_{min} + \left(\frac{T - T_{min}}{\Delta T}\right)^2 \quad (14)$$

τ_{min} – минимальное время образования σ-фазы при изотермическом превращении;
T_{min} – температура, при которой образование σ-фазы происходит за это время,
ΔT – характерный температурный диапазон образования σ-фазы

Fonseca G. et al. Sigma Phase in Superduplex Stainless Steel: Formation, Kinetics and Microstructural Path // Mater. Res. 2017. Vol. 20.

Анализ зависимости механических свойств от химического состава и критической скорости охлаждения

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

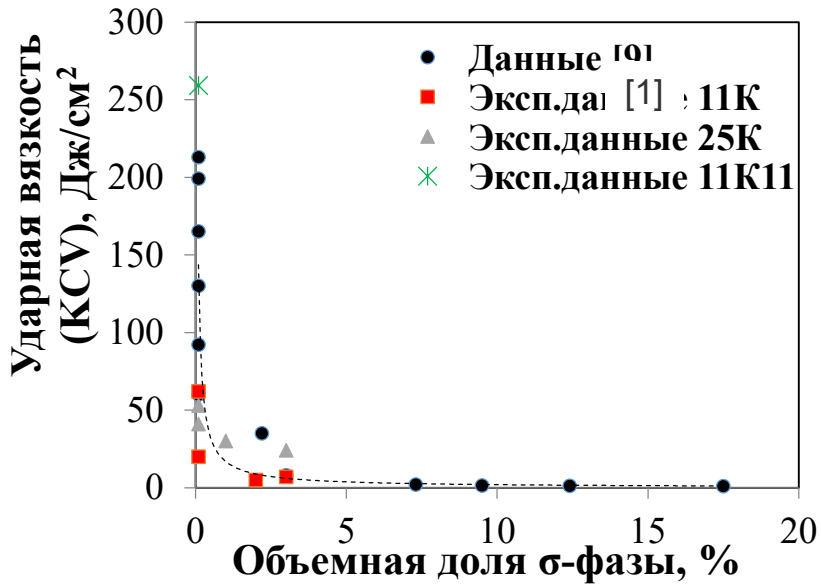
Оценка ударной вязкости на основе химического состава и скорости охлаждения заготовки

- **Расчет доли σ-фазы в зависимости от химического состава и скорости охлаждения**
- **Расчет ударной вязкости в зависимости от доли σ-фазы**

$$\mathbf{lgV_{кр} = -1,23 \cdot C - 0,55 \cdot Si - 0,10 \cdot Mn + 1,82 \cdot Ni + 0,17 \cdot Cr + 1,17 \cdot Cu + 19,40 \cdot N + 3,75 \cdot Mo - 1,12 \cdot Nb - 36,3} \quad (6)$$

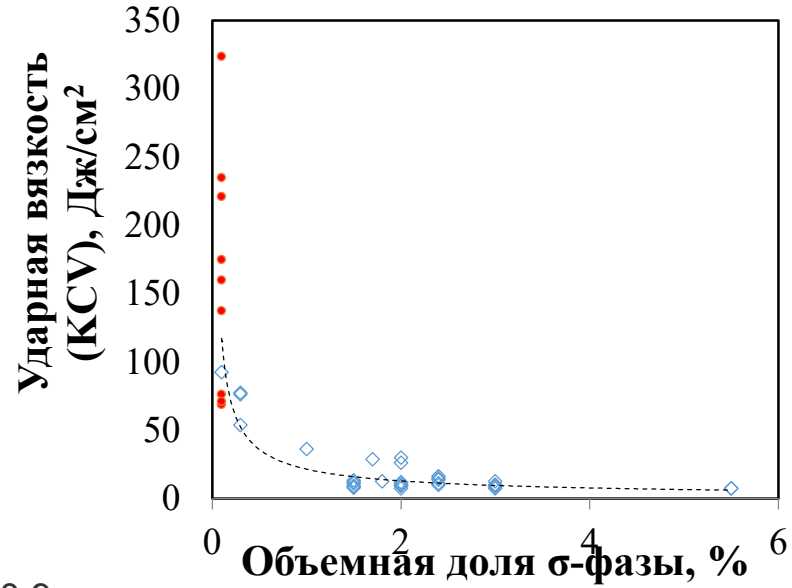
$$\frac{1}{KCV} = -0,01 \cdot \sigma^2 + 0,15 \cdot \sigma + 0,005 \quad (7)$$

Данные Fonseca G и лабораторных плавок



R^2=0,9

Результаты испытаний образцов промышленных плавок

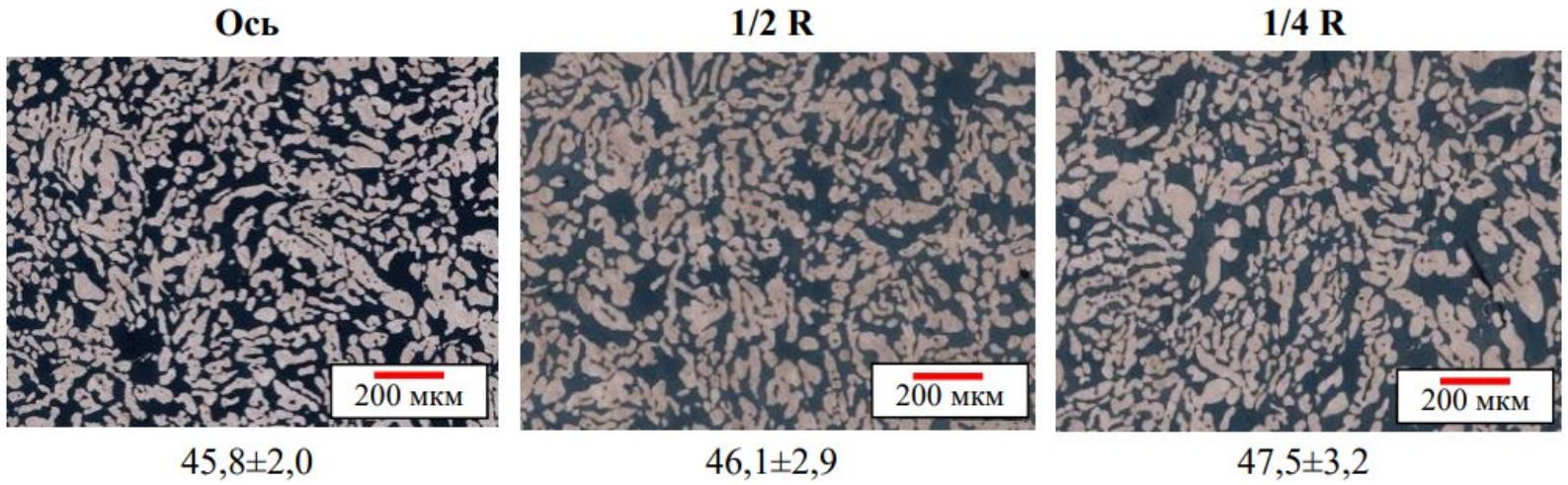


Работа выполнена совместно с ФГУП ВНИИА им. Духова Н.Л.

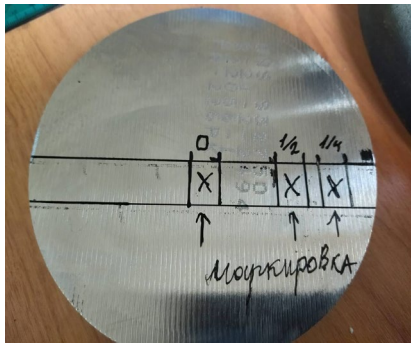
[1] Fonseca G. et al. Sigma Phase in Superduplex Stainless Steel: Formation, Kinetics and Microstructural Path // Mater. Res. 2017. Vol. 20.

Исследование качества заготовок СДС оптимизированного состава S32750

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ



Пруток РКМ Ø127 мм



Режим термической обработки: закалка с Т=1100 ^{0}С в циркулирующей воде

Наименование	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ, %	Ψ, %	KCV, Дж/см^2	δ-феррит, % об.	σ-фаза, % об.
Образцы пл.№4 (ДСП-ВО-РКМ)	811	641	38	78	186	49,5	-
Образцы пл.№4 (ДСП-ВО-РКМ)	816	628	35	70	190	45,8	-
Образцы пл.№5 (ДСП-ВО-РКМ)	807	625	36	72	203	46,5	-
Образцы (ДСП-ВО-ЭШП-РКМ)	834	636	37	75	н\д	47,0	-
Требования (Р015-D07-Т-016)	мин. 730	мин. 515	мин. 25	мин. 40	мин. 100	35-55	< 0,5

Испытания на точечную коррозию по ASTM G48 метод А

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

До испытания

X 20

После испытания

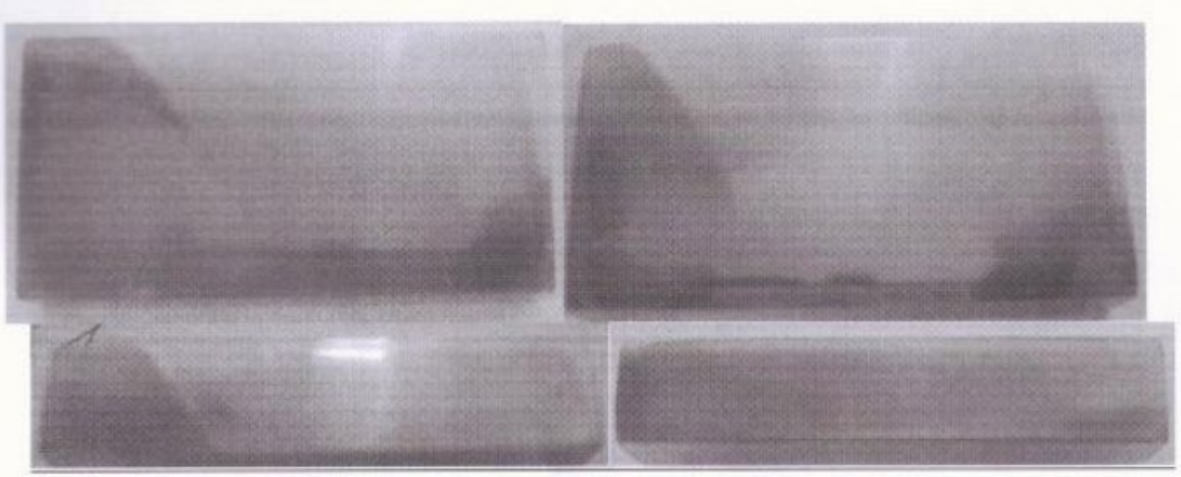
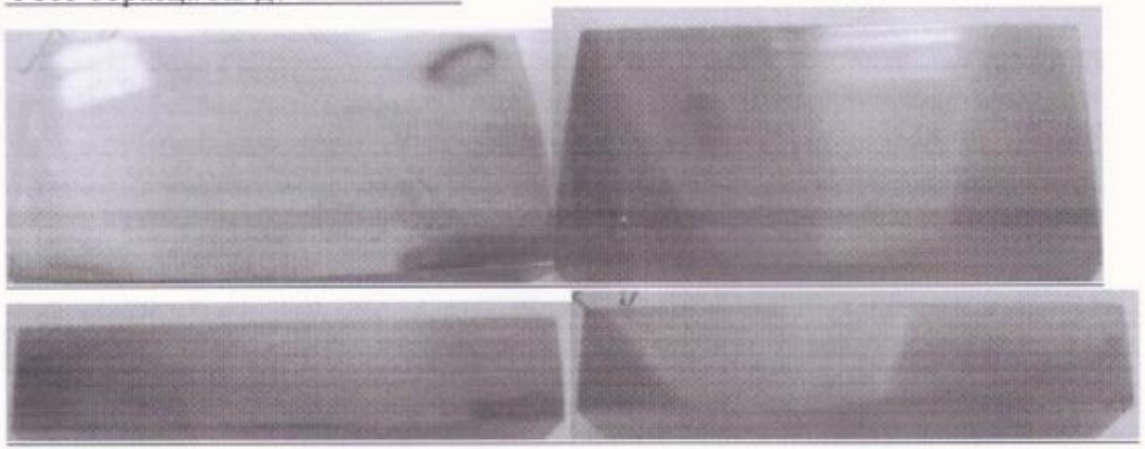


Фото образца К2 до испытания:



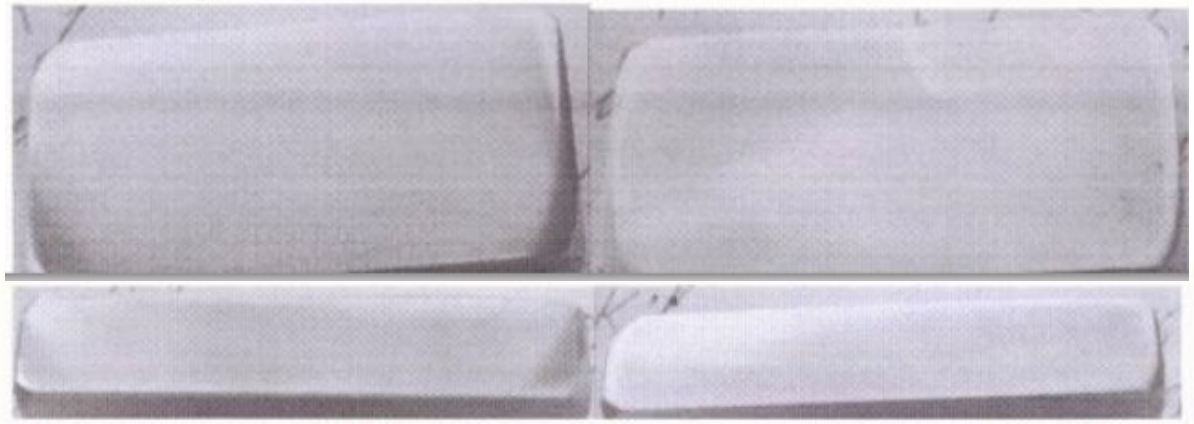
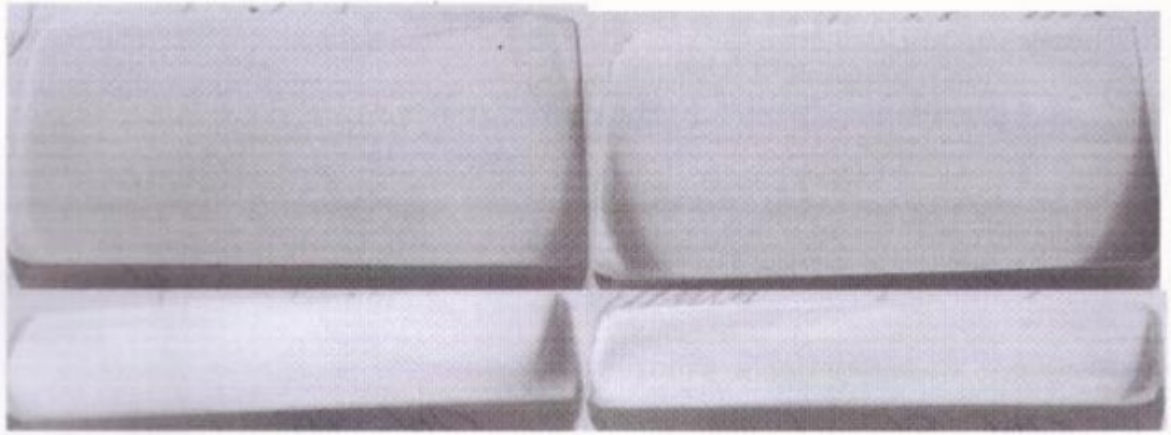


Фото образца К2 после испытаний:



Потеря массы менее 1 мг, отсутствие питтингов, видимых при 20 кратном увеличении
Образцы соответствуют требованиям Norsok № P015-D07-T-016-rev. B

Выводы

ЦНИИТМАШ
РОСАТОМ

1.Компьютерное моделирование фазового равновесия в пакете прикладных программ Thermo-Calc версий 2017a, 2019a, 2022a позволило разработать систему критериев качества СДС, включающую:

1.1 регрессионные уравнения($R^2 \geq 0{,}90$), связывающие эти критерии с химическим составом:

- соотношение долей δ-феррита и аустенита (X_f / X_a =1 при T = 1175 °C):

$$5{,}52+10{,}24\cdot C-3{,}3\cdot Si+0{,}15\cdot Mn-0{,}77\cdot Cr+1{,}14\cdot Ni-0{,}6\cdot Mo+10{,}21\cdot N+182{,}4\cdot C^2+0{,}54\cdot Si^2-0{,}03\cdot Mn^2+0{,}04\cdot Cr^2+0{,}12\cdot Ni^2+0{,}05\cdot Mo^2-2{,}72\cdot N^2-4{,}25\cdot C\cdot Si-$$
$$2{,}55\cdot C\cdot Mn-2\cdot C\cdot Cr+3{,}58\cdot C\cdot Ni-2{,}57\cdot C\cdot Mo+54{,}53\cdot C\cdot N-0{,}17\cdot Si\cdot Mn+0{,}25\cdot Si\cdot Cr-0{,}4\cdot Si\cdot Ni+0{,}27\cdot Si\cdot Mo-3{,}69\cdot Si\cdot N+0{,}01\cdot Mn\cdot Cr+0{,}03\cdot Mn\cdot Ni-0{,}05\cdot Mn\cdot Mo-$$
$$0{,}23\cdot Mn\cdot N-0{,}13\cdot Cr\cdot Ni+0{,}08\cdot Cr\cdot Mo-Cr\cdot N-0{,}15\cdot Ni\cdot Mo+2{,}15\cdot Ni\cdot Mo-1{,}47\cdot Mo\cdot N=1{,}0\pm 0{,}14$$

- связь температуры выделения гексагональной плотноупакованной фазы Cr_2N с составом стали:

$$954{,}5-128{,}84\cdot Si-25{,}1\cdot Mn+0{,}44\cdot Cr^2+2{,}63Ni^2-44{,}3\cdot C\cdot Cr+107{,}8\cdot C\cdot Ni-\ 10{,}07\cdot Si\cdot Cr\ -\ 3{,}39\cdot Si\cdot Ni+5{,}02\cdot Si\cdot Mo+2{,}29\cdot Mn\cdot Ni-$$
$$2{,}54\cdot Cr\cdot Ni+1{,}45\cdot Cr\cdot Mo-2{,}47\cdot Ni\cdot Mo+54{,}41\cdot Ni\cdot N+2{,}07 \leq 1075$$

- Содержание хрома в формирующемся при кристаллизации δ-феррите в зависимости от химического состава стали перед разливкой:

$$Cr_\delta = 4{,}9C+0{,}16Si+0{,}16Mn+0{,}57Ni+0{,}96Cr+0{,}65Cu+1{,}1N-0{,}44Mo-0{,}14Nb\pm 0{,}2$$

1.2 дополнительные критерии качества для оптимизации химического состава, определить их численные значения. Для стали UNS S32750: индекс стойкости к питтинговой коррозии PREN≥ 41; критическая температура питтингообразования CPT ≥ 55°C; объемная доля σ-фазы < 0,5 %;

1.3 целевой химический состав стали UNS S32750, рассчитанный с использованием предложенной методики, обеспечивающий получение физически однородного слитка стабильного фазового состава. Применение разработанной системы критериев качества СДС для оптимизации состава UNS S32750 позволило реализовать технологию изготовления 3т кузнечных слитков в промышленных условиях, устранив формирование азотных пор в них.

1.4 регрессионную зависимость, позволяющую определить минимальную скорость охлаждения металлургических заготовок $v_{кр}$ в зависимости от химического состава: $\lg V_{кр}=1{,}82Ni+0{,}17Cr+1{,}17Cu+9{,}40N+3{,}75Mo-1{,}23C-0{,}55Si-0{,}10Mn-1{,}12Nb-36{,}30$

Внедрение результатов работы позволило АО «Русполимет» освоить сквозную технологию производства поковок и заготовок из супердуплексной стали UNS S32750 по заказам Завода 70-летия Победы

Спасибо за внимание

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

Исследование влияния агрессивных сред CO_2, H_2S, H_2 на коррозионную стойкость сталей с 2–9% Cr

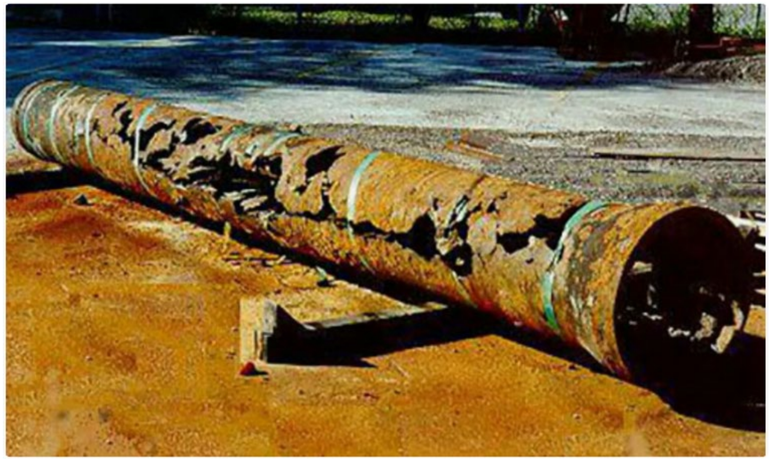
Долгач Егор

Инженер научного проекта НИЛ «ГНМ», аспирант кафедры металловедения и физики прочности (МиФП) университета науки и технологий МИСИС

Место проведения: г. Самара

Дата проведения: 3 сентября 2025 г.

Актуальность работы







Коррозионное разрушение нефтегазопроводных и нарезных труб

Химический состав лабораторных и эталонных сталей

Химический состав лабораторных и эталонных сталей, массовая доля, %

Обозначение	Марка стали	C	Si	Mn	Легирующая система
Лабораторные стали					
Э2	**Cr2,0**-Mo-Nb-V	0,09	0,22	0,32	Mo+Nb+V = 0,23
Э3	**Cr2,0**-Mn-Nb	0,09	0,29	0,92	Mn+Nb = 0,95
Э4	**Cr3,0**-Mo-Nb-V	0,09	0,24	0,31	Mo+Nb+V = 0,25
Э5	**Cr5,0-**Mn-Nb-Ti	0,08	0,25	0,90	Mn+Nb+Ti = 0,98
Э6	**Cr9,0**-Mo-Ni-Nb-V-Ti	0,07	0,31	0,55	Mo+Ni+Nb+V+Ti = 1,78
Эталонные стали					
15ХФ	Cr0,5-V (ГОСТ 4543-71)	0,14	0,20	0,52	V = 0,05
26ХМФБА	Cr1,0-Mo-Nb-V	0,26	0,25	0,48	Mo+Nb+V = 0,75

Технология изготовления лабораторных сталей на производственной площадке НИТУ МИСИС



Прошивка на стане «МИСиС 130Д»





Внешний вид черновых гильз после горячей винтовой прошивки

Схема получения исследуемых образцов

01 Нагрев исходных заготовок перед прошивкой

02 Зацентровка исходных заготовок перед черновой прошивкой

03 Прошивка гильз в черновую трубу промежуточных размеров

04 Окончательное формирование диаметра и толщины стенки трубы

Опытная раскатка



Нагревательная печь



Универсальный прокатный стан ДУО-210



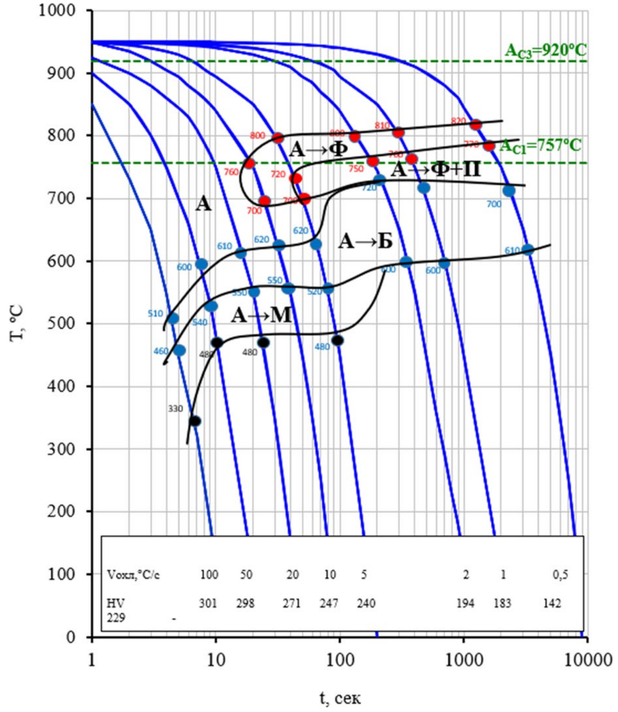
Образцы после прокатки

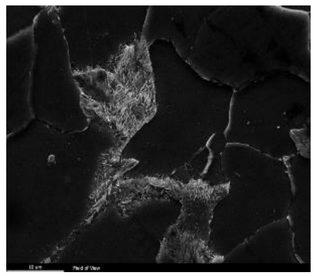


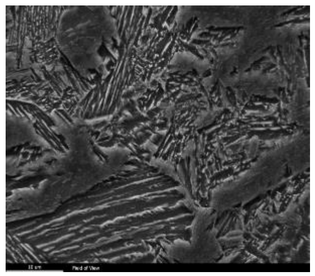
Образцы после прокатки

Финальная стадия подготовки темплетов для исследований – проведение ТО (закалка + отпуск)

Внешний вид термокинетических диаграмм сталей Э2, Э3 при непрерывном охлаждении

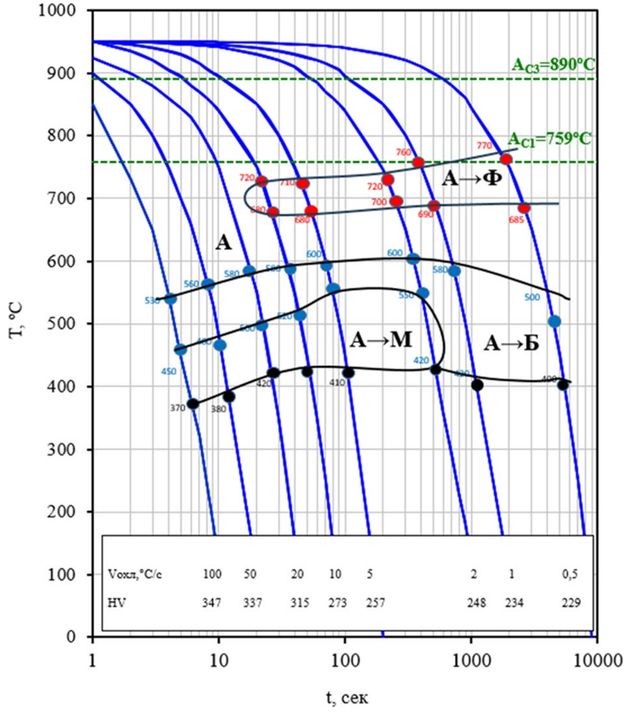


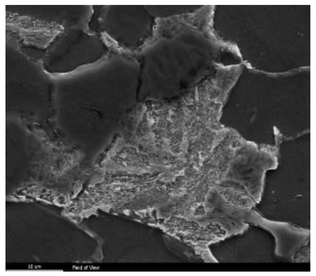


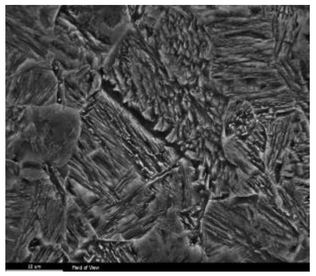


а) б)

Сталь Э2 при различных скоростях охлаждения при дилатометрическом исследовании (0,5 и 100 °С/с), увеличение х5000



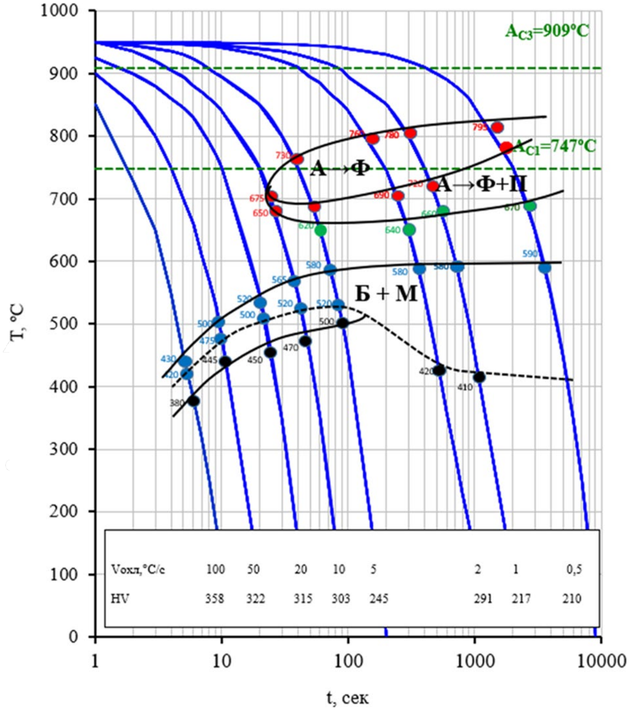


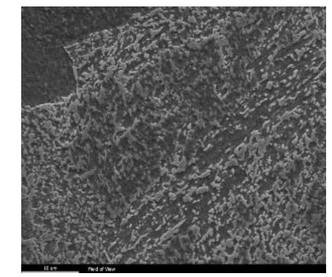


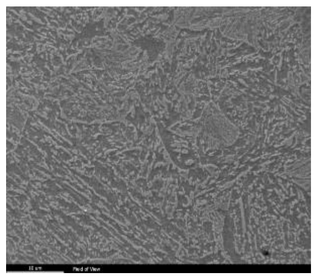
а) б)

Сталь Э3 при различных скоростях охлаждения при дилатометрическом исследовании (0,5 и 100 °С/с), увеличение х5000

Внешний вид термокинетических диаграмм сталей Э4, Э5, Э6 при непрерывном охлаждении

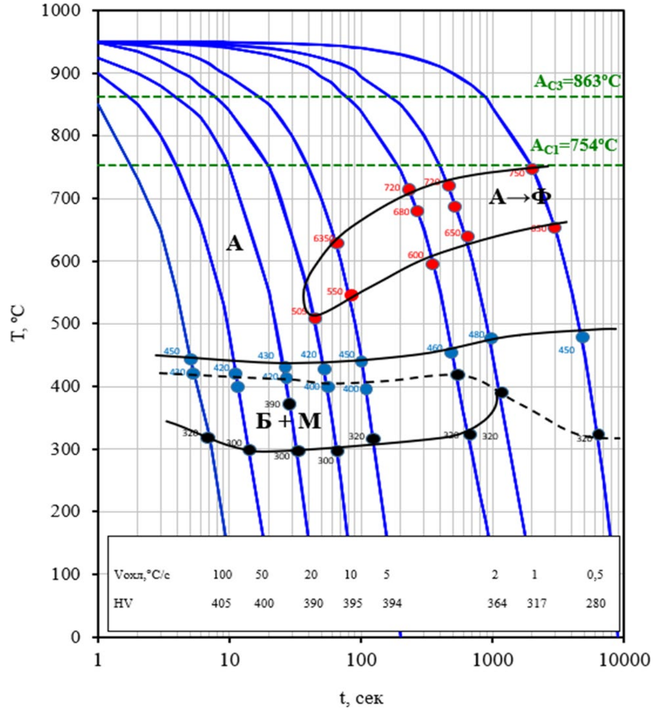


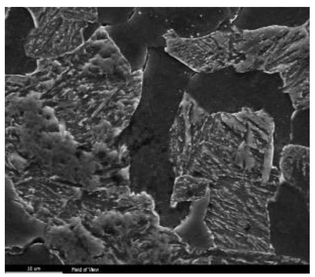


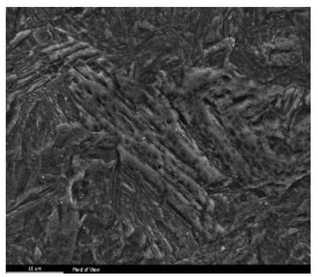


а) б)

Сталь Э4 при различных скоростях охлаждения при дилатометрическом исследовании (0,5 и 100 °С/с), увеличение х5000

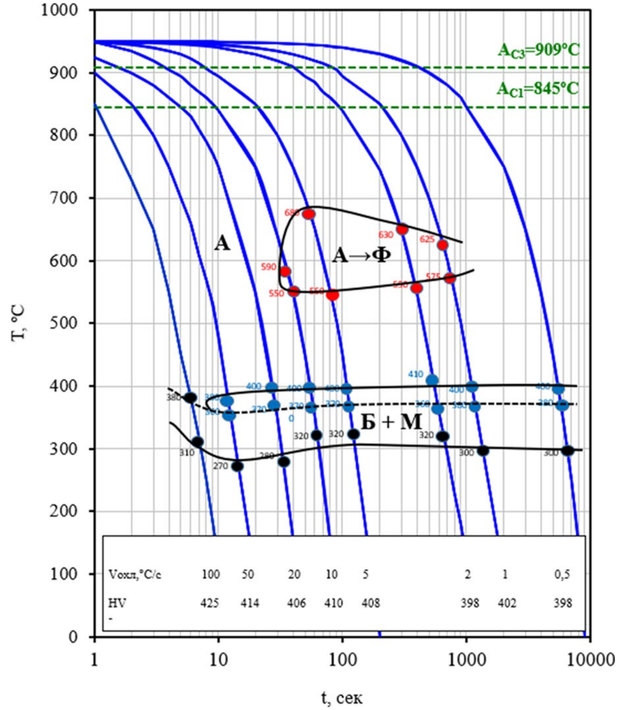


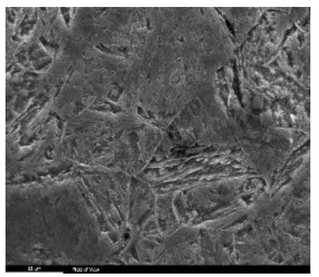


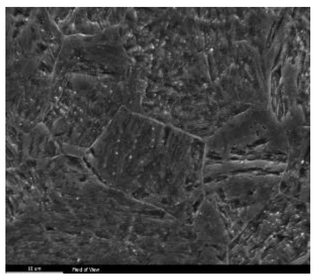


а) б)

Сталь Э5 при различных скоростях охлаждения при дилатометрическом исследовании (0,5 и 100 °С/с), увеличение х5000



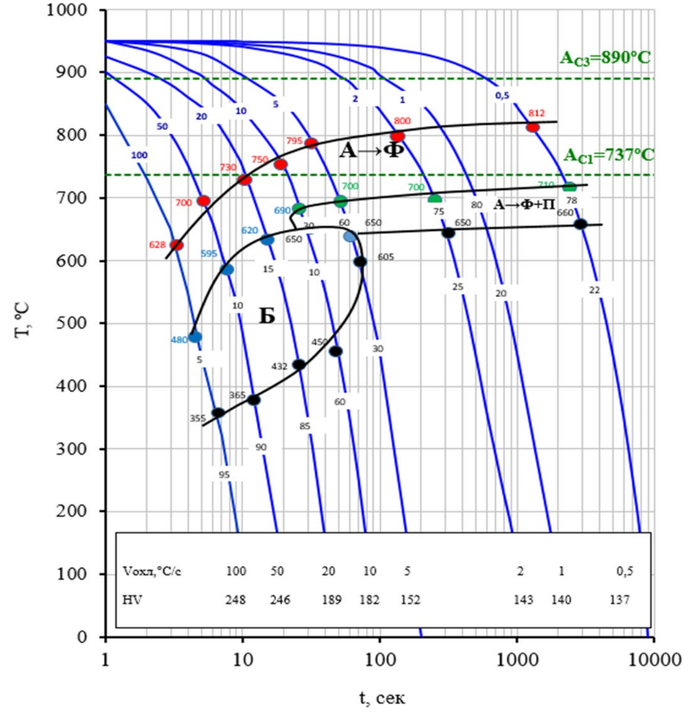


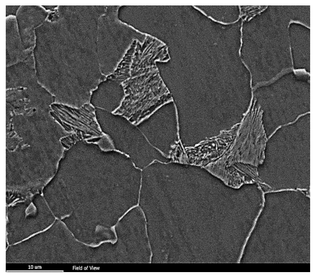


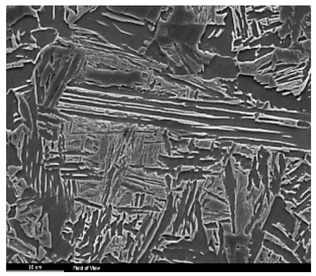
а) б)

Сталь Э6 при различных скоростях охлаждения при дилатометрическом исследовании (0,5 и 100 °С/с), увеличение х5000

Внешний вид термокинетических диаграмм сталей Э7, Э8 при непрерывном охлаждении

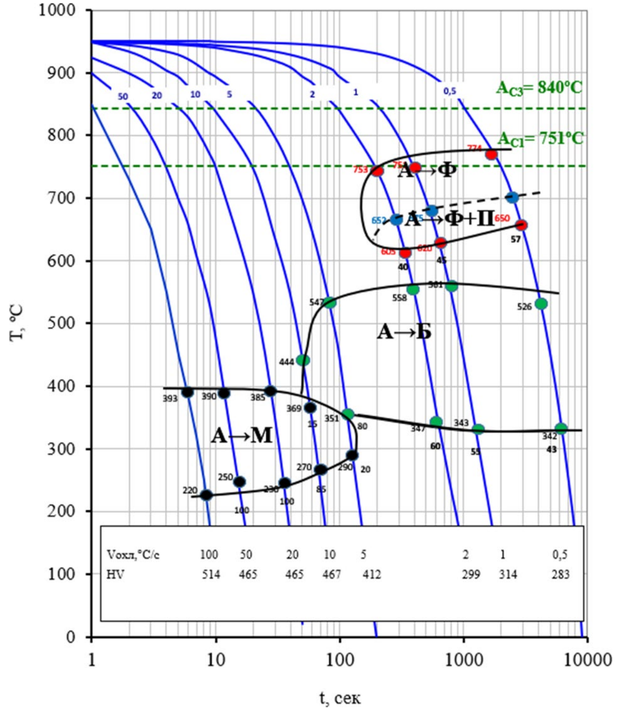


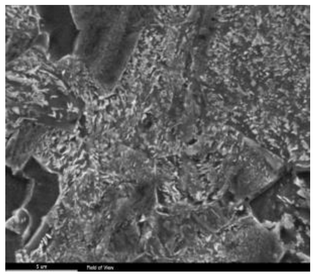


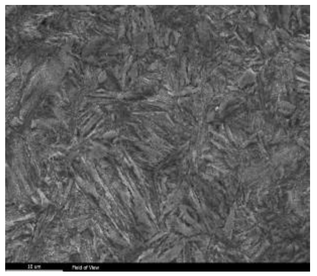


а) б)

Сталь 15ХФ при различных скоростях охлаждения при дилатометрическом исследовании (0,5 и 100 °С/с), увеличение х5000







а) б)

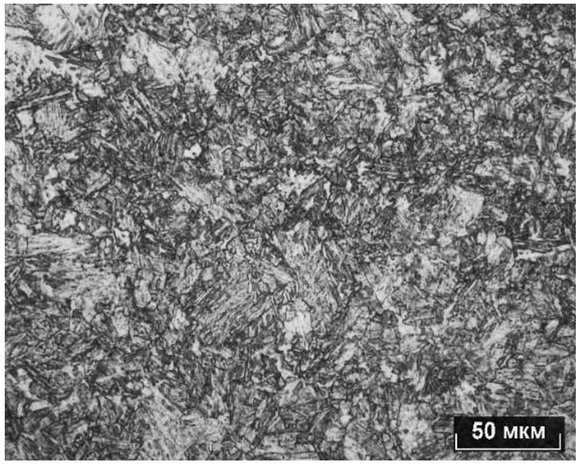
Сталь 26ХМФБА при различных скоростях охлаждения при дилатометрическом исследовании (0,5 и 100 °С/с), увеличение х5000

Результаты механических испытаний после экспериментальных режимов ТО

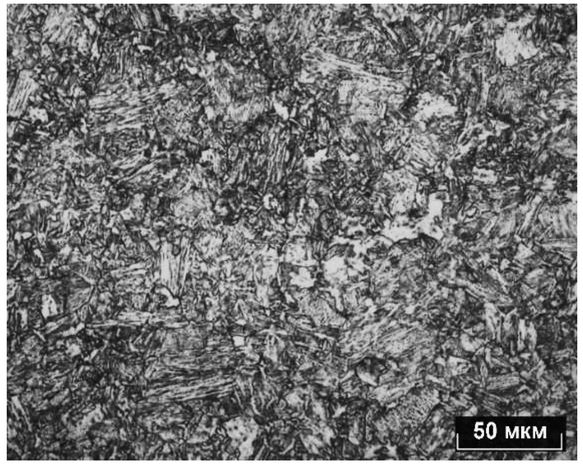
Образец	Вид ТО			*Предел текучести $\sigma_т$, МПа	*Предел прочности $\sigma_в$, МПа	*Относительное удлинение δ, %	*Ударная вязкость KCV^{-60}, Дж/см^2	*Микротвердость, HV	
	Режим закалки		Температура отпуска, °С						
	Температура, °С	среда							
Э2 (A_{C3} = 910 °С, A_{C1} = 757 °С)	920	вода	650 (L80)	609	679	19	285	241	
Э3 (A_{C3} = 890 °С, A_{C1} = 759 °С)	910	вода	650 (L80)	581	656	18	271	243	
Э4 (A_{C3} = 909 °С, A_{C1} = 747 °С)	920	вода	700 (К60)	484	570	23	298	242	
Э5 (A_{C3} = 863 °С, A_{C1} = 754 °С)	910	воздух	650 (К60)	505	632	20	204	236	
Э6 (A_{C3} = 909 °С, A_{C1} = 845 °С)	1050	воздух	750 (L80)	590	718	18	107	243	
15ХФ (A_{C3} = 890 °С, A_{C1} = 737 °С)	910	вода	680 (К56)	469	578	21	326	161	
26ХМФБА (A_{C3} = 840 °С, A_{C1} = 751 °С)	880	вода	750 (L80)	637	738	21	286	248	
Нормируемые значения для классов прочности			К56	410-528	550-668	≥20,0	≥100	≤250**	≤300***
			К60	460-578	590-708	≥20,0	≥100		
			L80	552-655	≥655	≥11	≥100		≤255***

Примечание – **минимальное получаемое значение; **Требования ПАО «Газпром»; *** Требования НК «Роснефть»*

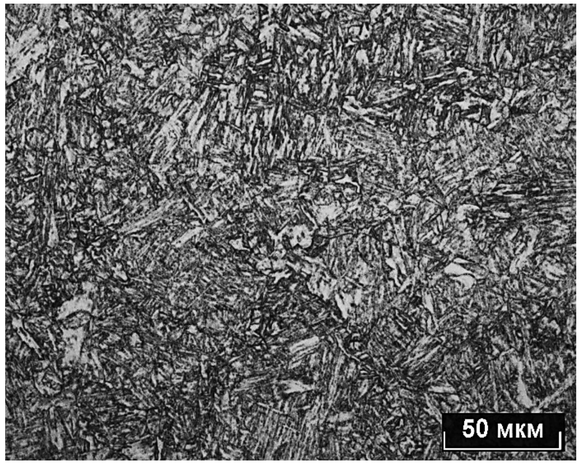
Микроструктура лабораторных и эталонных сталей после оптимальных режимов ТО (увеличение х500)



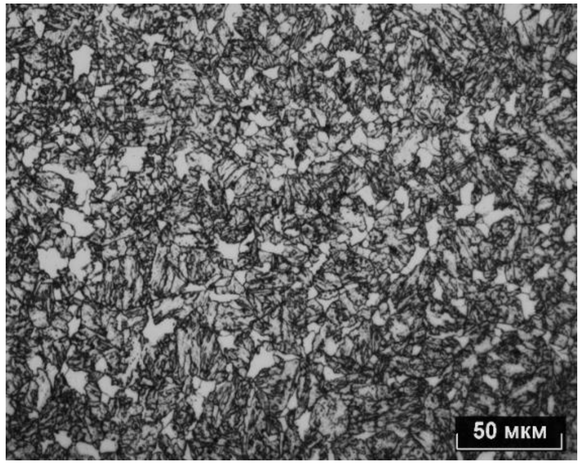
Э2, отпуск 650 °С



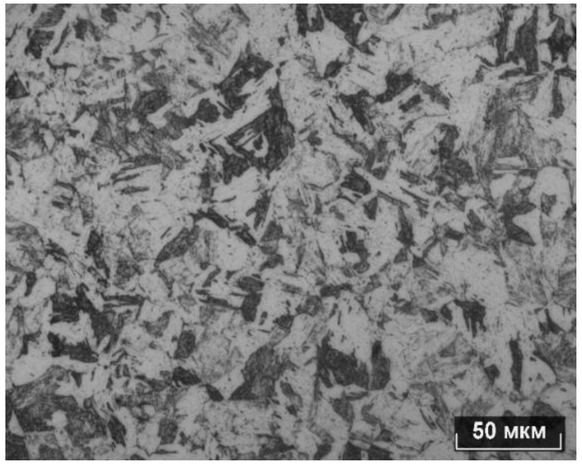
Э3, отпуск 650 °С



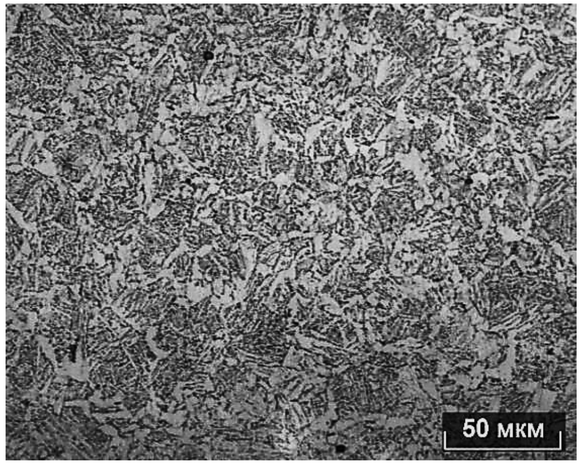
Э4, отпуск 700 °С



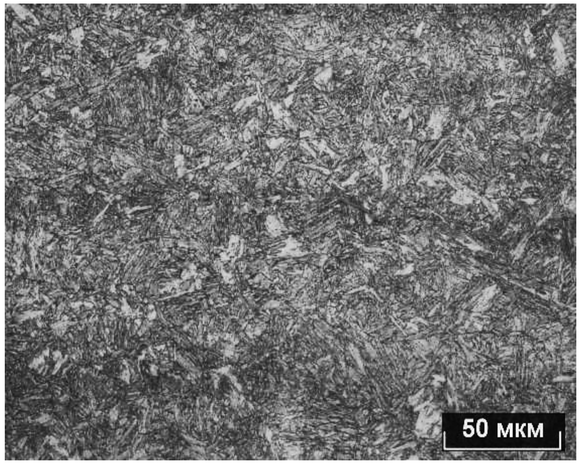
Э5, отпуск 650 °С



Э6, отпуск 750 °С

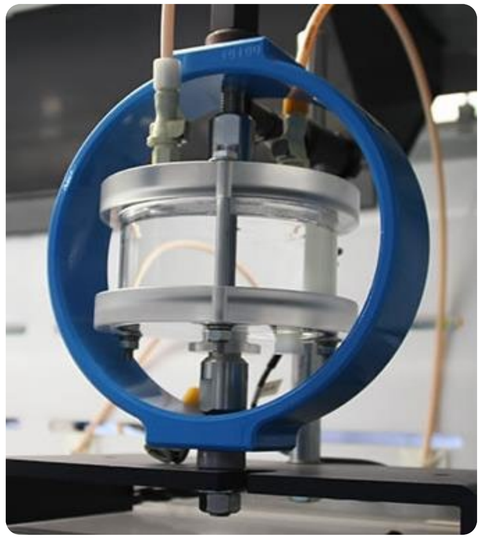


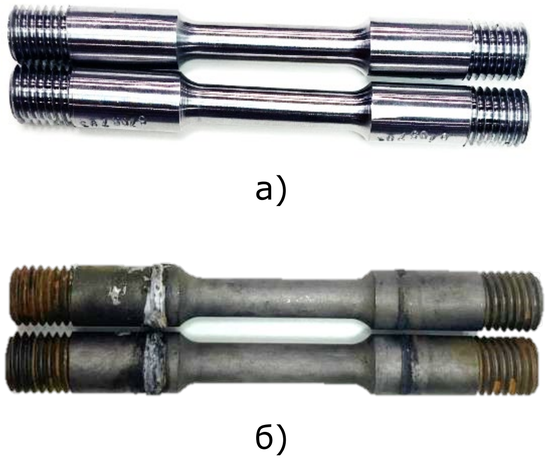
15ХФ, отпуск 680 °С



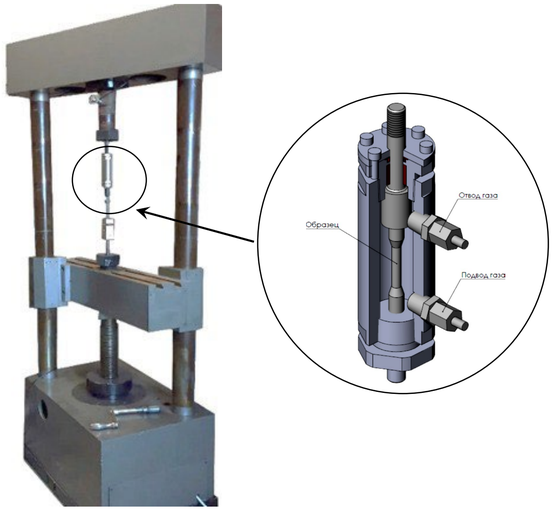
26ХМФБА, отпуск 750 °С

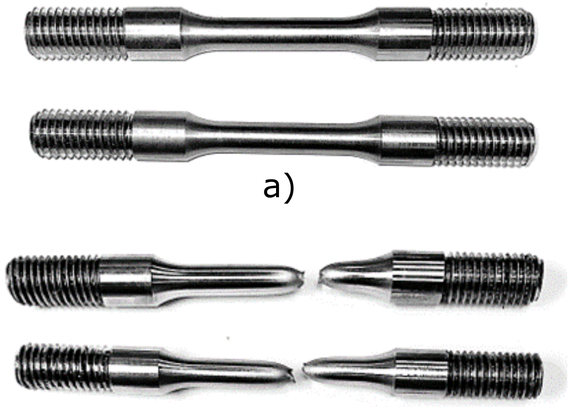
Методики коррозионных испытаний





Установка и внешний вид образцов для проведения испытаний на SSC в среде H_2S (NACE TM0177, метод А)
а – образец до испытаний; б – образец после проведения SSC





Динамический автоклав на базе универсальной испытательной машины на растяжение и внешний вид образцов для проведения испытания на растяжение с малой скоростью деформации в среде H_2 (SSRT)
а – образец до испытаний; б – образец после проведения SSRT

Параметры проведения SSC

Время испытания: 720 часов
Среда испытания: 5% NaCl и 0,5% CH_3COOH
pH: 2,6-2,8
$T_{исп}$: 23-25 °C
Раствор насыщения: H_2S

Параметры проведения SSRT

Время испытания: до разрушения
Среда испытания: H_2
Давление газа: 70 атм.
$T_{исп}$: 21-27 °C
Скорость деформации: не выше $1 \cdot 10^{-6}$ $с^{-1}$

Методики коррозионных испытаний в многокомпонентной среде



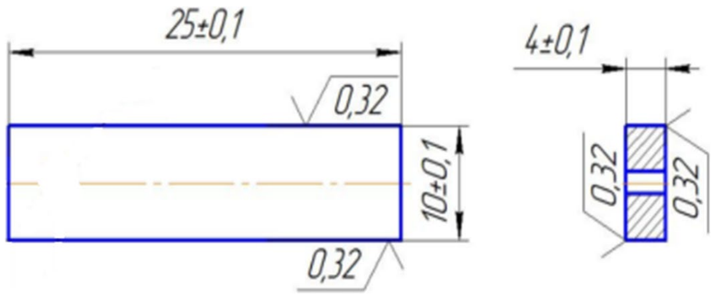




Установка для проведения коррозионных испытаний в многокомпонентной среде, содержащей CO_2 и H_2S

Параметры проведения испытаний

Время испытания: 240 часов
Среда испытания: CO_2 и H_2S
Давление газа: 0,9/0,1 атм.
$T_{исп}$: 50 °C
Модельные растворы: 5%-ый раствор NaCl дистиллированной воды, насыщенный газовой баллонной смесью CO_2 и H_2S



Геометрические характеристики образцов

Результаты коррозионных испытаний

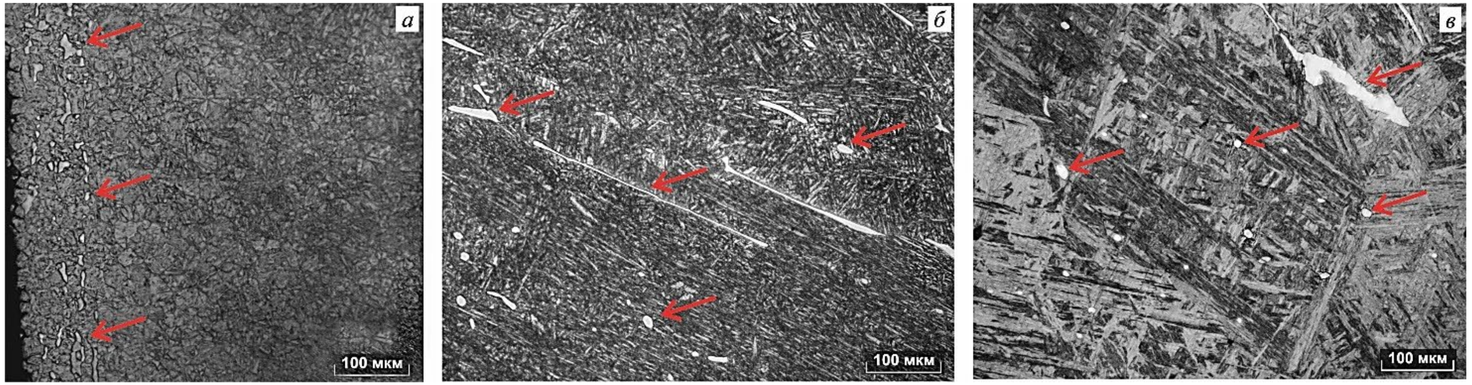
Результаты коррозионных испытаний SSC

Образец	Температура отпуска, °С	Минимальный предел текучести $\sigma_т$, МПа	Напряжение испытания, МПа	Процент от минимального предела текучести $\sigma_т$, %	Наличие/отсутствие дефекта (трещина)
		460 (К60) 552 (L80)	368 (для К60) 442 (для L80)	80	Отсутствие трещин и разрушения
15ХФ (К56)	680				
26ХМФБА (L80)	750				
Э2 (L80)	650				
Э3 (L80)	650				
Э4 (К60)	700				
Э5 (К60)	650				
Э6 (L80)	750				Разрушение образцов через 47 и 407 часов

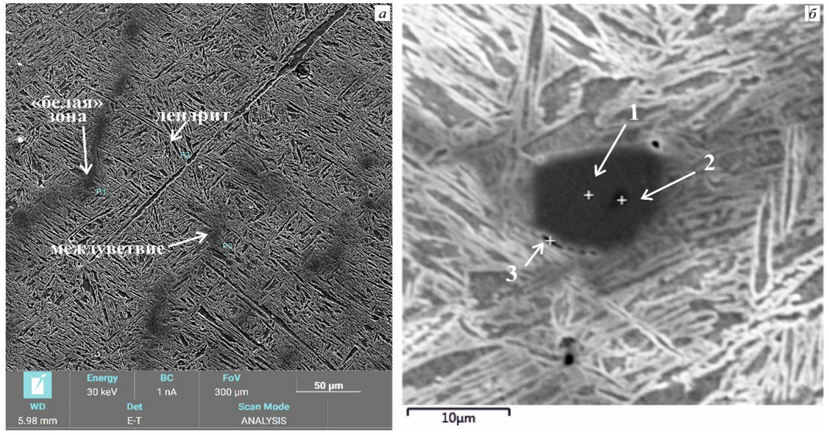
Результаты коррозионных испытаний SSRT

Образец	Температура отпуска, °С	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	$\beta\sigma_т$ по отношению к испытаниям на воздухе, %	Временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, МПа	$\beta\sigma_в$ по отношению к испытаниям на воздухе, %	Относительное удлинение δ_5, %	Коэффициент относительного удлинения $\beta\delta_5$, %
Э1 (К60)	700	477	88	561	92	21	25
15ХФ (К56)	680	436	94	533	92	21	22
26ХФМБА (L80)	750	659	100	716	97	21	21
Э2 (L80)	650	590	97	647	95	19	21
Э3 (L80)	650	511	88	577	88	18	22
Э4 (К60)	650	466	92	569	90	20	25
Э5 (L80)	750	564	96	680	95	18	19
Нормативное значение – не менее 80 %							

Определение первопричин снижения стойкости стали Э6 к СКРН



а – внешняя стенка трубной заготовки толщиной 12 мм (раствор Марбле); б – поперечное сечение верхнего горизонта слитка на расстоянии 0,5R от поверхности (двойное травление: реактив Оберхоффера + 2% спиртовой раствор HNO_3); в – поперечное сечение верхнего горизонта слитка на расстоянии 0,5R от поверхности (тройное травление: пересыщенный раствор пикриновой кислоты с добавкой ПАВ + раствор Каллинга + раствор Марбле) Аномальные «белые» зоны (указаны красными стрелками), выявленные после травления различными реактивами

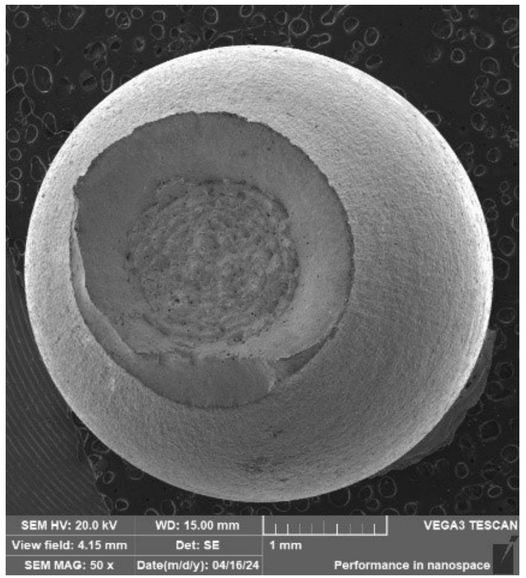


Электронная микроскопия (двойное травление) набор импульсов по точкам для определения состава

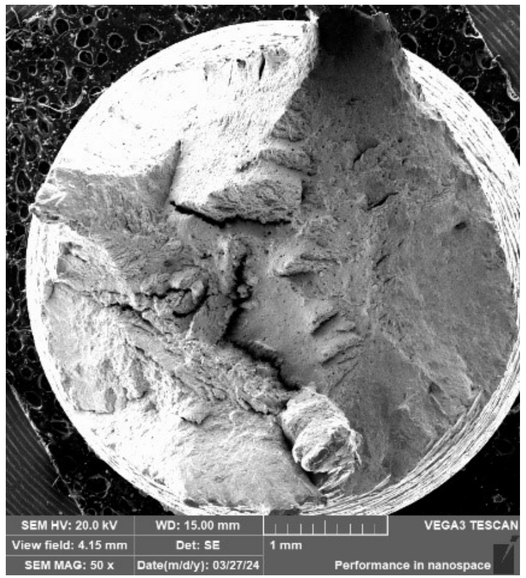
Локальная концентрация элементов в микроликвационных зонах

Элемент	Зоны микроликвации		Характер остаточной микроликвации	«Белая» зона
	Оси дендритных ветвей, $C^i_Д$, % масс.	Междендритное пространство $C^i_{МД}$, % масс.		
Хром	9,09	10,09	прямая	10,89
Молибден	0,70	1,08		2,25
Кремний	0,30	0,40		0,48
Марганец	0,23	0,33		0,45
Ванадий	0,16	0,30		0,43
Никель	0,25	0,30		0,33
Ниобий	0,06	0,08		0,12
Титан	0,02	0,023		0,023

Фрактографический анализ изломов после растяжения на воздухе и в среде H_2 (1% Cr)

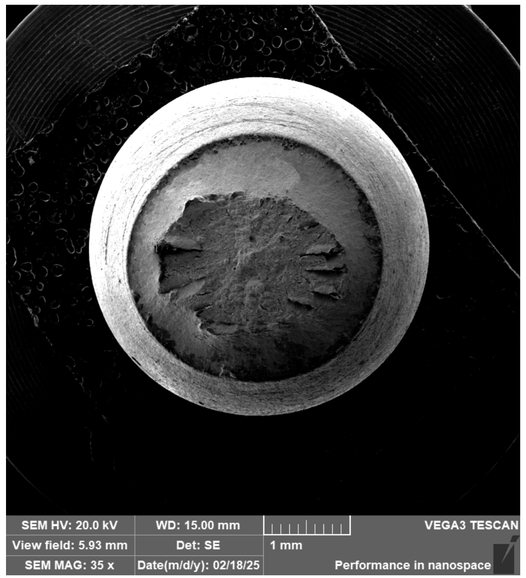


а)

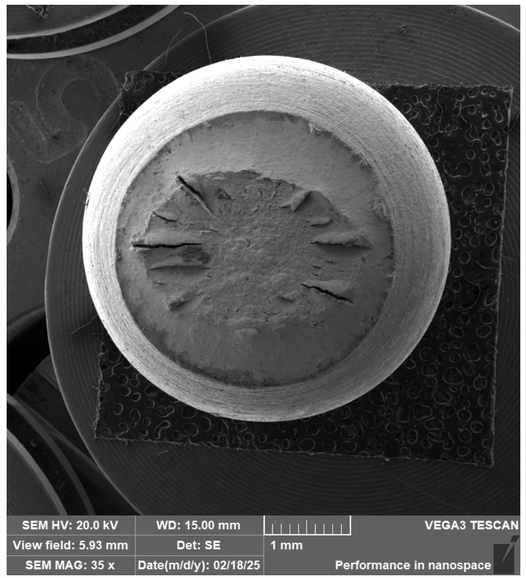


б)

Сталь 15ХФ (отпуск 680 °С, класс прочности К56) после одноосного растяжения при комнатных условиях (а) и в среде газообразного водорода (б)



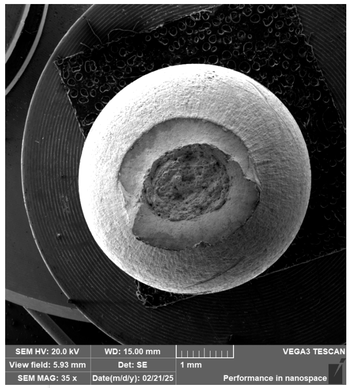
а)



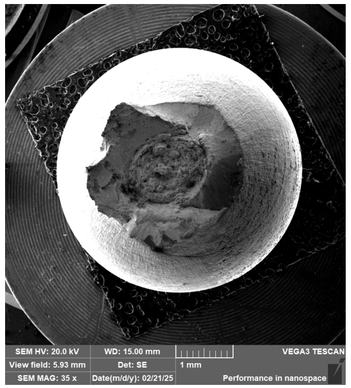
б)

Сталь 26ХФМБА (отпуск 750 °С, класс прочности L80) после одноосного растяжения при комнатных условиях (а) и в среде газообразного водорода (б)

Фрактографический анализ изломов после растяжения на воздухе и в среде H_2 (2-9% Cr)

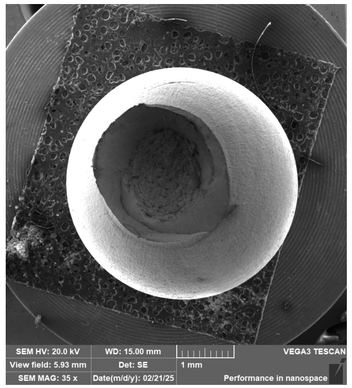


а)

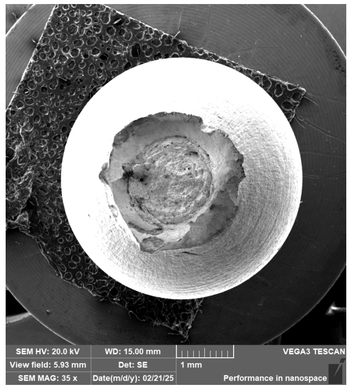


б)

Сталь Э2 (отпуск 650 °С, класс прочности К60) после одноосного растяжения при комнатных условиях (а) и в среде газообразного водорода (б)

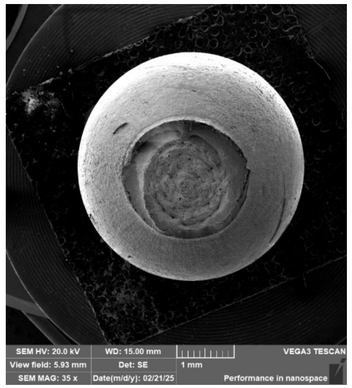


а)

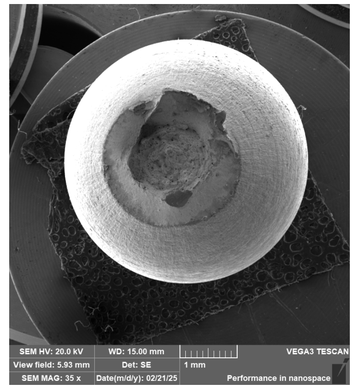


б)

Сталь Э3 (отпуск 650 °С, класс прочности L80) после одноосного растяжения при комнатных условиях (а) и в среде газообразного водорода (б)

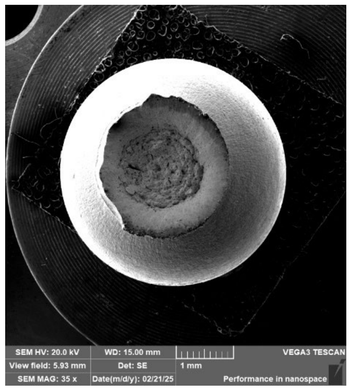


а)

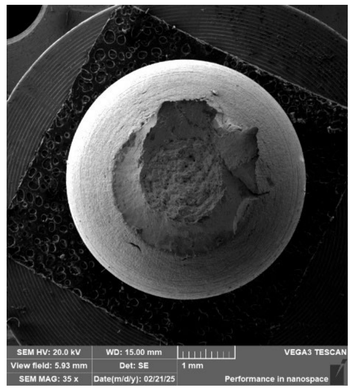


б)

Сталь Э4 (отпуск 700 °С, класс прочности К60) после одноосного растяжения при комнатных условиях (а) и в среде газообразного водорода (б)

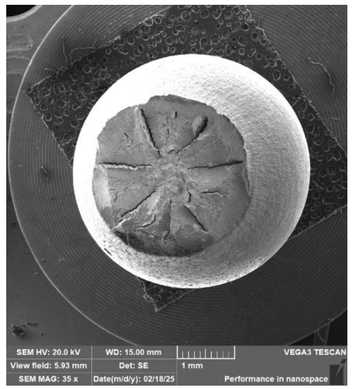


а)

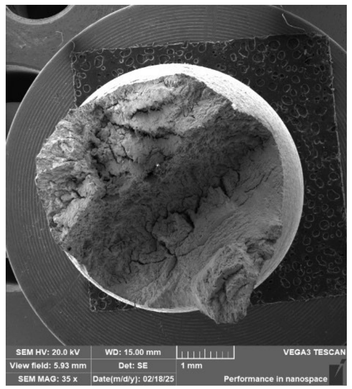


б)

Сталь Э5 (отпуск 650 °С, класс прочности L80) после одноосного растяжения при комнатных условиях (а) и в среде газообразного водорода (б)



а)



б)

Сталь Э6 (отпуск 750 °С, класс прочности L80) после одноосного растяжения при комнатных условиях (а) и в среде газообразного водорода (б)

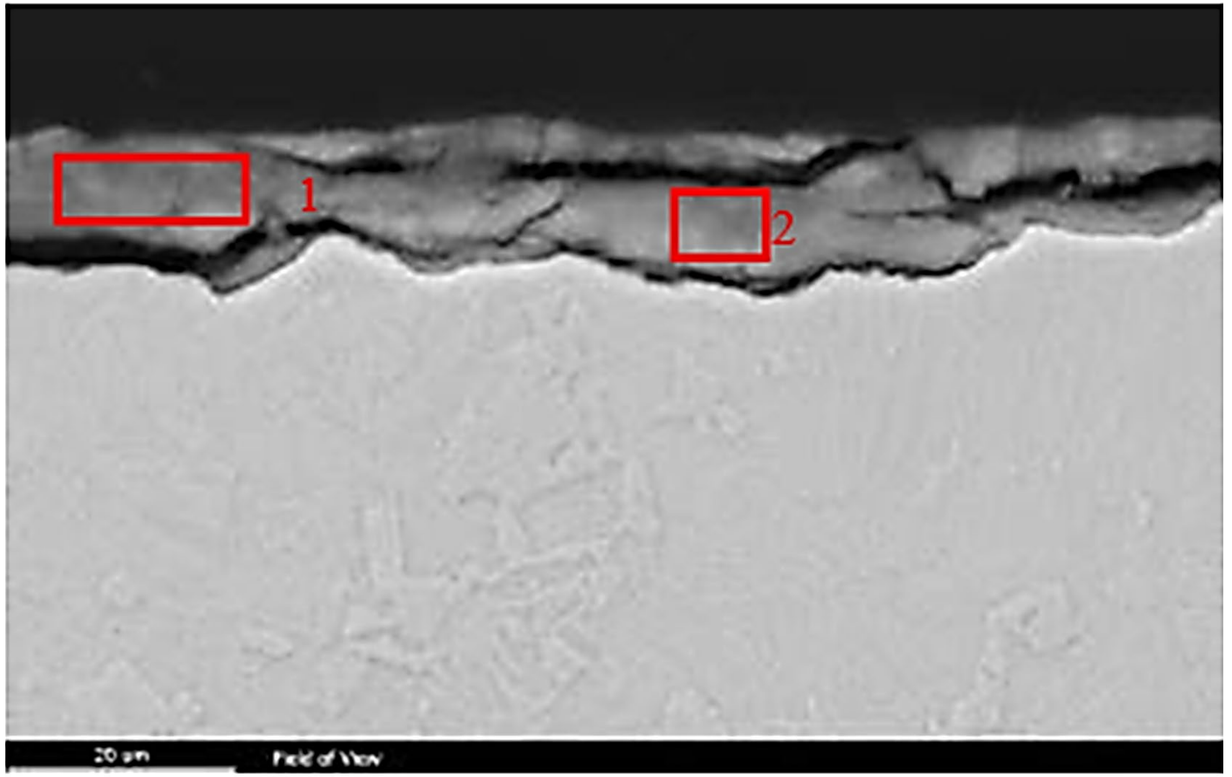
Результаты коррозионных испытаний в многокомпонентной среде CO_2+H_2S

Результаты коррозионных испытаний в многокомпонентной среде

Марка стали	Температура отпуска, °С	Класс прочности	Условия испытаний	Скорость коррозии, мм/год	Параметры среды		
					Т, °С	pH	Концентрация H_2S, мг/л
			5% NaCl Рпарц. CO_2 0.9 атм. + Рпарц. H_2S 0.1 атм.		50	4,25-5,01	93-153
Э2	650	L80		0,220			
Э3	650	L80		0,130			
Э5	650	K60		0,170			
Э6	750	L80		0,004			
Сталь 20	Нормализация 910 °С	-		0,280			

Нормативная документация: *ГОСТ 9.905-2007, 9.908-85*

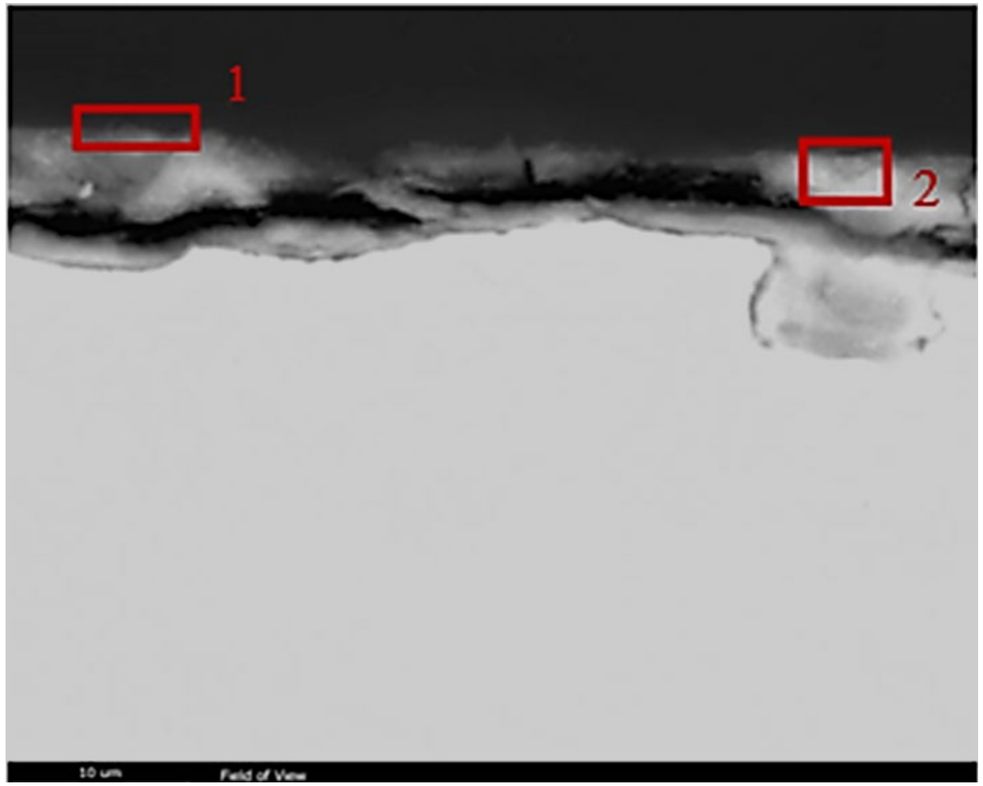
Анализ продуктов коррозии после испытаний в многокомпонентной среде CO2+H2S для стали Э2



№ п/п	C	O	S	Cr	Mn	Fe
1	16,39	3,84	14,26	7,61	-	56,21
2	7,60	4,35	17,25	8,85	-	60,42

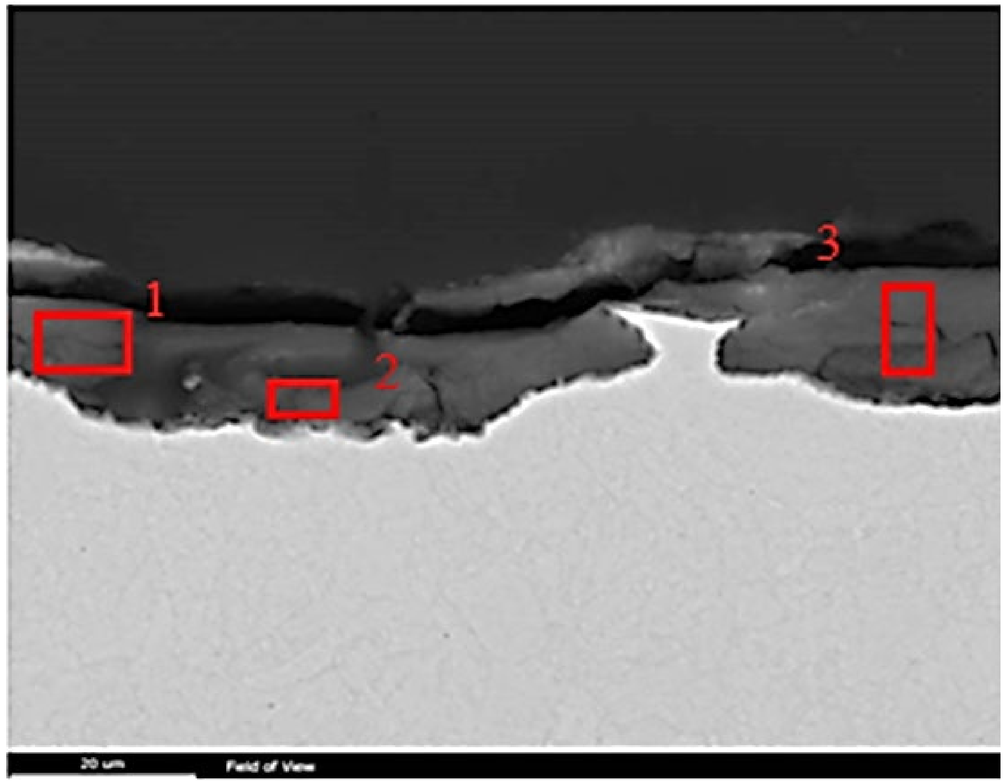
Продукты коррозии стали Э2 в поперечном сечении

Анализ продуктов коррозии после испытаний в многокомпонентной среде CO2+H2S для сталей Э3, Э5



№ п/п	C	O	S	Cr	Mn	Fe
1	1,96	-	2,37	2,55	1,27	91,84
2	2,53	1,75	4,34	3,24	1,31	86,16

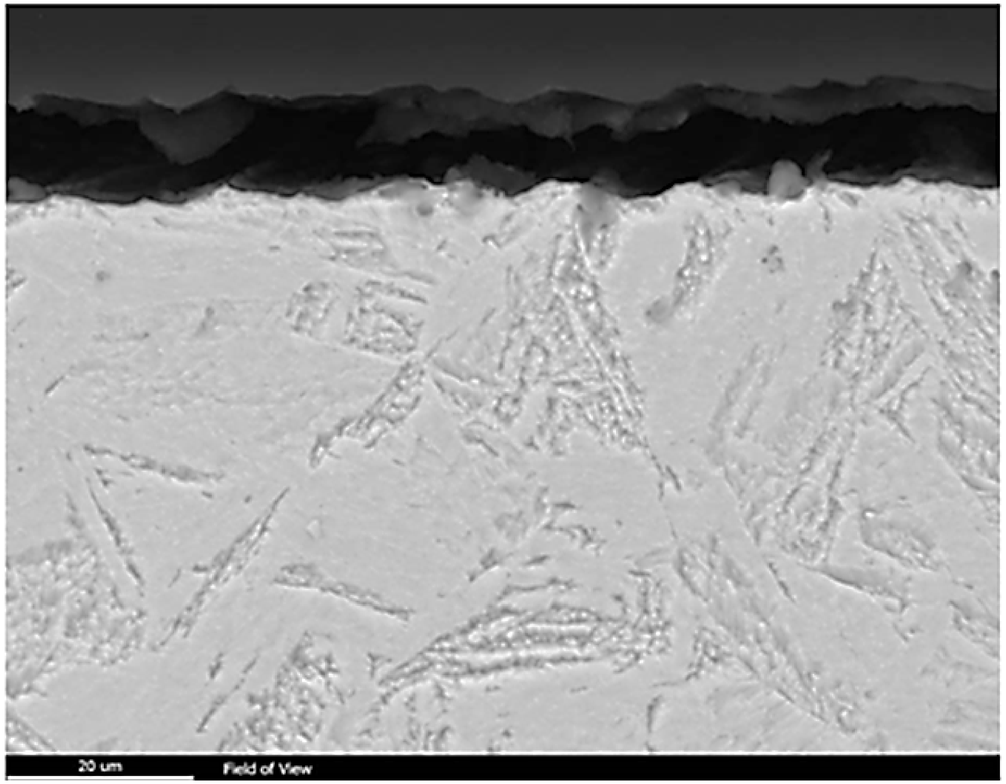
Продукты коррозии стали Э3 в поперечном сечении



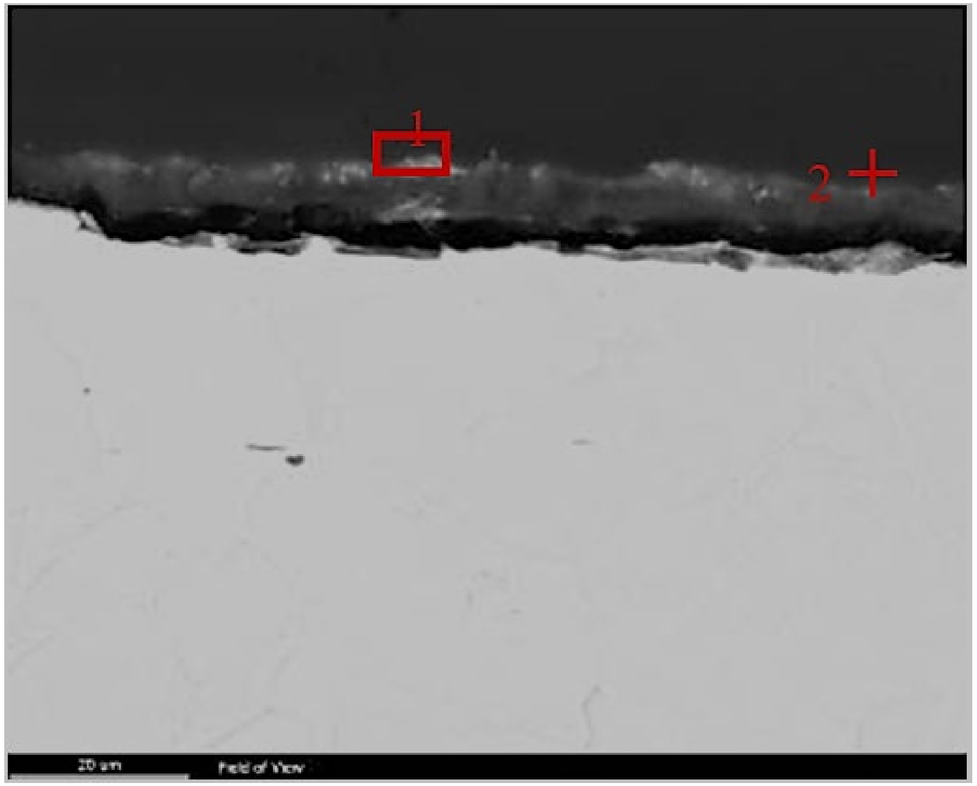
№ п/п	C	O	Si	S	Cl	Cr	Fe
1	16,43	8,18	0,51	7,91	0,36	23,76	42,85
2	46,36	8,06	0,70	1,37	0,92	31,05	9,88
3	20,17	11,13	1,06	5,65	0,69	36,60	23,47

Продукты коррозии стали Э5 в поперечном сечении

Анализ продуктов коррозии после испытаний в многокомпонентной среде CO2+H2S для сталей Э6, 20



Продукты коррозии стали Э6 в поперечном сечении **отсутствуют**



№ п/п	C	O	Si	S	Mn	Fe
1	31,14	2,35	0,66	6,52	0,75	58,17
2	1,23	-	-	0,37	0,66	97,74

Продукты коррозии стали 20 в поперечном сечении

Выводы

1) При проведении анализа основных нормативных документов ведущих нефтегазовых компаний Российской Федерации и аналитического литературного были сформированы перспективные химические составы с содержанием хрома в диапазоне от 1 до 9 % с дополнительным легированием сильными карбидообразующими элементами. Стали 15ХФ (изготовление бесшовных нефтегазопроводных труб) и 26ХМФБА (изготовление бесшовных нарезных труб) выступают в качестве материала сравнения.

2) Для исследуемых марок сталей предложены режимы термообработки, позволяющие достичь требуемых классов прочности (К60, L80).

3) Изучена эволюция структуры: показано изменение бейнитно-ферритных, бейнитно-мартенситных и мартенситно-бейнитных структур в процессе высокотемпературного отпуска.

4) Для проведения коррозионных исследований были отобраны наиболее оптимальные режимы ТО для сталей класса прочности К60 (Э4, Э5) и класса прочности L80 (Э2, Э3, Э6), которые выдержали испытание на СКРН и не были разрушены в течение 720 часов (кроме стали Э6 по причине наличия в её структуре частиц вторичной фазы с высоким содержанием молибдена.

5) Для определения кинетики коррозионных процессов в многокомпонентной среде с преобладанием диоксида углерода и малыми добавками сероводорода было экспериментально подтверждено, что с увеличением концентрации хрома до 9 % происходит монотонное снижение углекислотной коррозии до минимальных значений.

6) Несмотря на статистическую близкость показателей пластичности на воздухе и в среде водорода, фрактографический анализ выявил переход от вязкого к хрупкому разрушению с ростом содержания хрома (>2%) и мартенситной составляющей в низкоуглеродистых сталях. Высокое содержание углерода (0,25% в стали 26ХМФБА) способствует образованию трещин даже при наличии вязкого сорбита отпуска.

7) Для сред с высоким содержанием CO_2 рекомендуется применять стали с повышенным содержанием хрома (до 9%) в твердом растворе для минимизации общей коррозии. Для сред с риском СКРН: содержание хрома следует ограничивать (~5%) для сохранения стойкости к хрупкому разрушению. Выбор марки стали и содержания хрома должен основываться на конкретном составе коррозионной среды, соотношении агентов (CO_2/H_2S) и его возможных изменениях в течение времени эксплуатации.

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

Спасибо за внимание!

Работа была выполнена в рамках комплексного проекта по теме «Разработка и внедрение комплексных технологий производства бесшовных труб из сталей нового поколения с управляемой коррозионной стойкостью при осложненных условиях эксплуатации для топливно-энергетического комплекса Российской Федерации» в рамках Соглашения №075-11-2023-011 от 10.02.2023 г. по постановлению Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г.

Выражаю благодарность сотрудникам коллектива:
ИТЦ Выксунского завода ОМК,
кафедре ОМД НИТУ МИСИС,
а также НИЛ «ГНМ» НИТУ МИСИС.

Контакты:
email: edolgach@misis.ru
тел.: +7 925 267-27-29