МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

Микролегирование низкоуглеродистых сталей для обеспечения комплекса свойств металлопродукции нефтегазовой промышленности

Александр Комиссаров
К.т.н., директор ПИШ «Материаловедение, аддитивные и сквозные технологии», заведующий лабораторией «Гибридные наноструктурные материалы»

Дата проведения: 04 сентября 2026 г.

Актуальность. Коррозионная стойкость



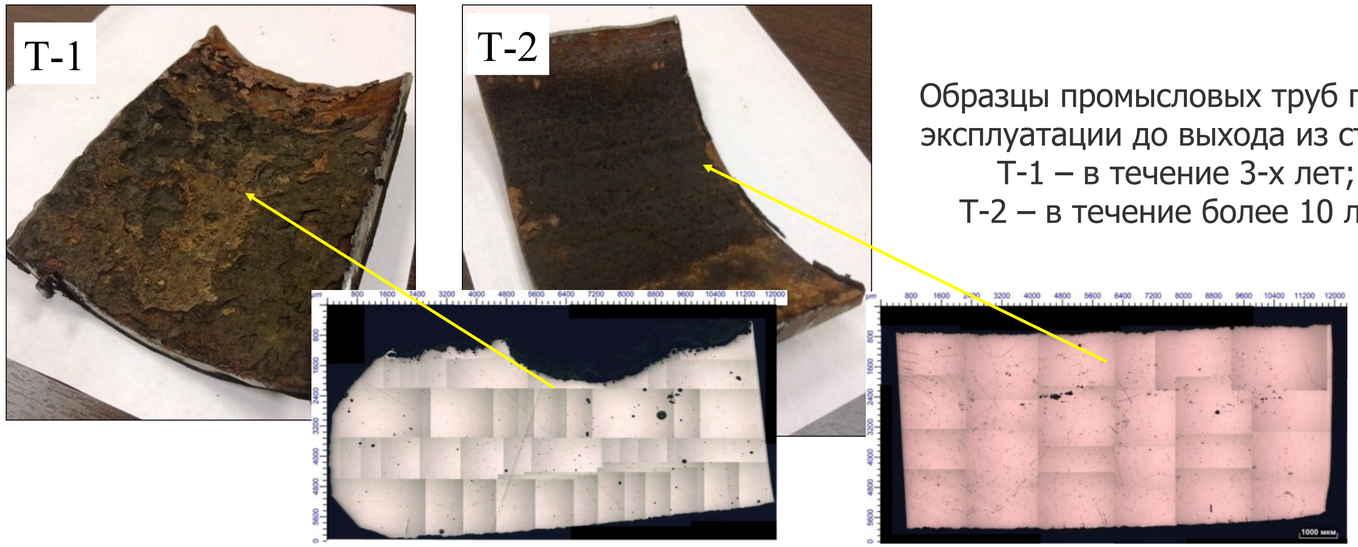
Характер локальной коррозии промысловых труб, используемый материал 09Г2С, 13ХФА

Факторы коррозионной активности углеводородного сырья при его транспортировке на промысловых участках

- Загрязнения в добываемой нефти
  - Абразивные включения
  - Минерализованная вода
  - Кислород
  - H_2S и/или CO_2
- Природные условия
  - Низкая температура эксплуатации

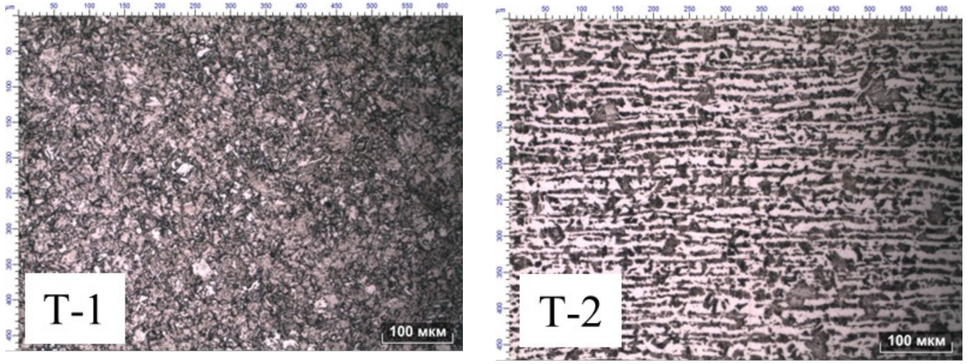
Актуальность. Коррозионная стойкость

Образец	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Ti	V
T-1	0,090	0,212	0,581	0,013	0,016	0,575	0,027	0,148	0,173	0,025	0,006	0,042
T-2	0,232	0,269	1,244	0,013	0,024	0,049	0,014	0,075	0,114	0,008	0,003	<0,005



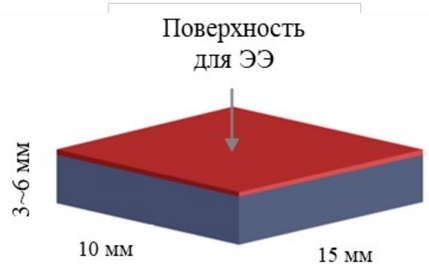
Образцы промысловых труб после эксплуатации до выхода из строя:
T-1 – в течение 3-х лет;
T-2 – в течение более 10 лет

Макрошлифы поперечного сечения исследуемых образцов



Микроструктура образцов

Метод объемного исследования характера распределения неметаллических включений с использованием электролитической экстракции (ЭЭ)



Образец для исследования

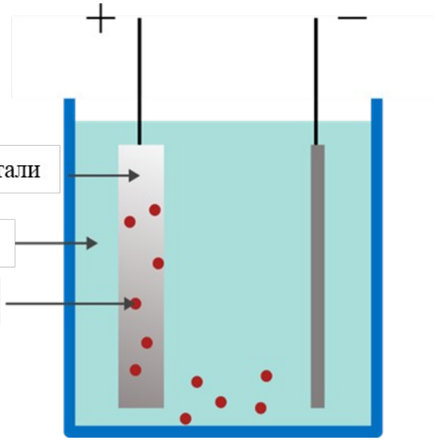
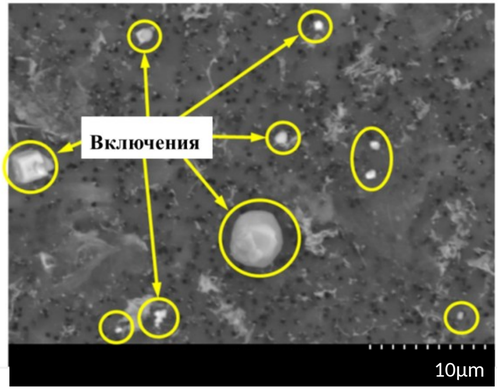


Схема процесса электролитической экстракции металлического образца



Общий вид неметаллических включений на поверхности поликарбонатного фильтра после ЭЭ

Коррозионно-активные неметаллические включения КАНВ:
сульфиды кальция и марганца,
алюминаты кальция,
магнезиальная шпинель

Актуальность. Огнестойкость



ТК «Зимняя вишня», г. Кемерово (2018 г) **65 погибших**

ФЗ 123

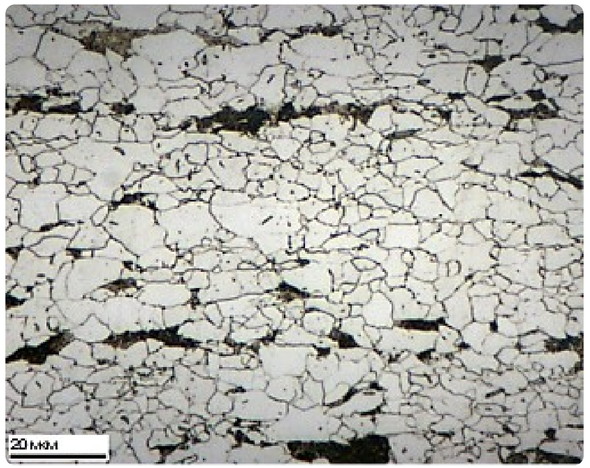
Технический регламент о требованиях пожарной безопасности

ГОСТ 27772-2015

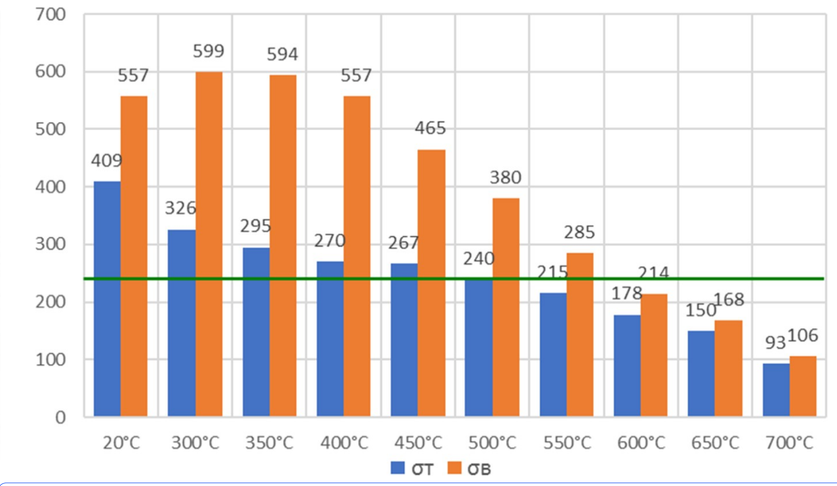
Прокат для строительных стальных конструкций

С355П

В ГОСТ 27772-2015 в РФ упоминается лишь одна марка огнестойкой стали **06МБФ**



Микроструктура стали 09Г2С



Прочностные свойства проката 09Г2С при нагреве, МПа

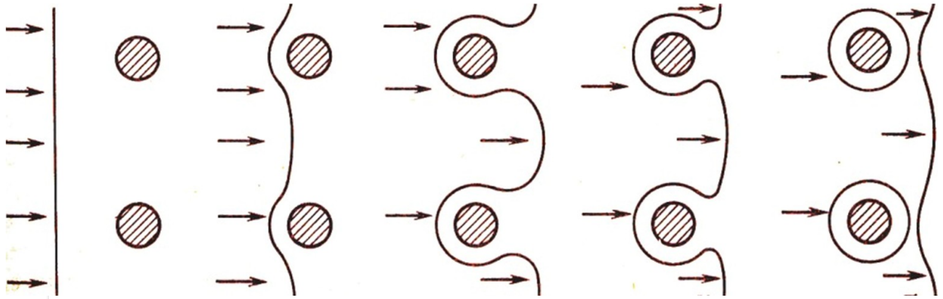
ЦНИИСК им В.А. Кучеренко
Соловьев Д.В «Исследование огнестойкости балок из новых сталей», 2007

ЦНИИчермет им И.П. Бардина
Муратов А.Н «Разработка и освоение промышленного производства проката из огнестойкой стали для строительных конструкций», 2007

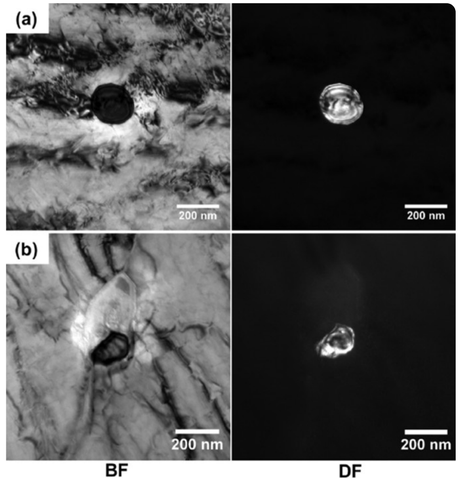
Текущее состояние

Специальное свойство	Металлопродукция	Марка стали	Недостаток
Огнестойкость	Рулонный прокат	Ст3сп, 09Г2С, 06МБФ	Недостаточная высокотемпературная прочность, низкий класс прочности
Коррозионная стойкость	Рулонный прокат, трубная заготовка	09Г2С, Ст20, 13ХФА	Высокая скорость локальной коррозии, нестабильные свойства

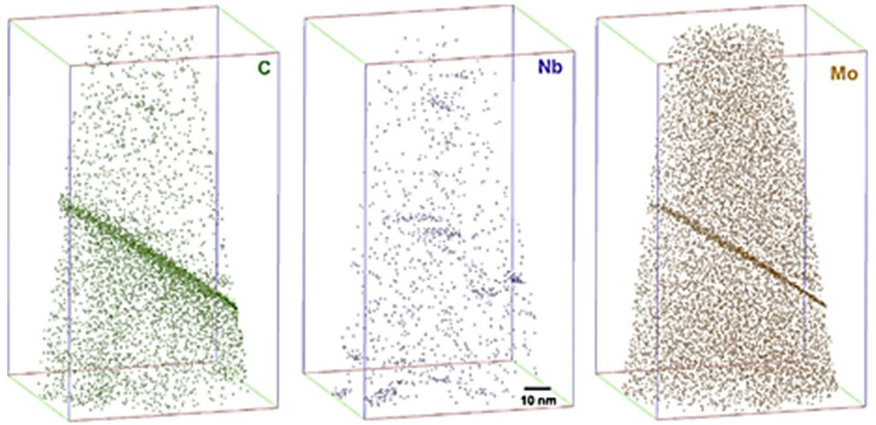
Идея: механизм сохранения механических свойств при повышенных температурах



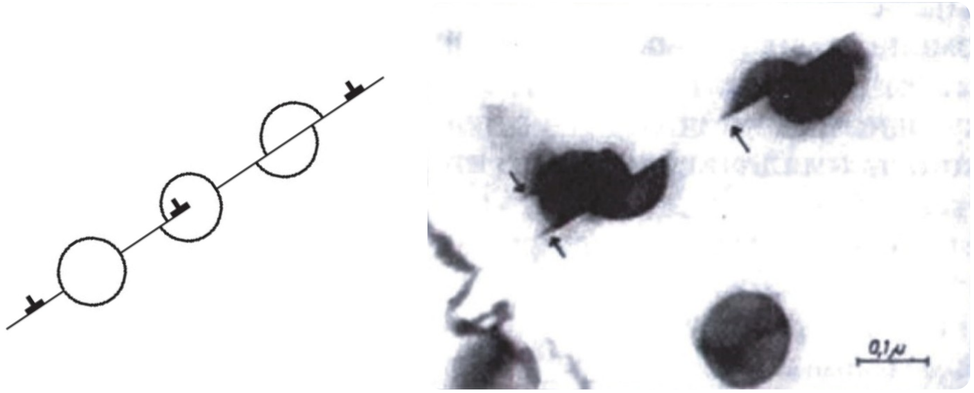
Теория Орована



(a) NbC; (b) (Nb,Mo)C



Атомно-зондовая томография*



Механизмы упрочнения (прогноз предела текучести):

$\sigma_y = \sigma_o + \sigma_{gs} + \sigma_{Or} + \sigma_{ss} + \sigma_d + \sigma_n$

σ_y – предел текучести;

σ_{Or} – дисперсионное твердение

Первая идея: прецизионное микролегирование карбидообразующими элементами для реализации механизма дисперсионного твердения

* Mechanisms for improving tensile properties at elevated temperature in fire-resistance steel with Mo and Nb. Hyo-Haeng Jo and others. Materials and Design. 194. 2020

Идея: механизм повышения коррозионных свойств

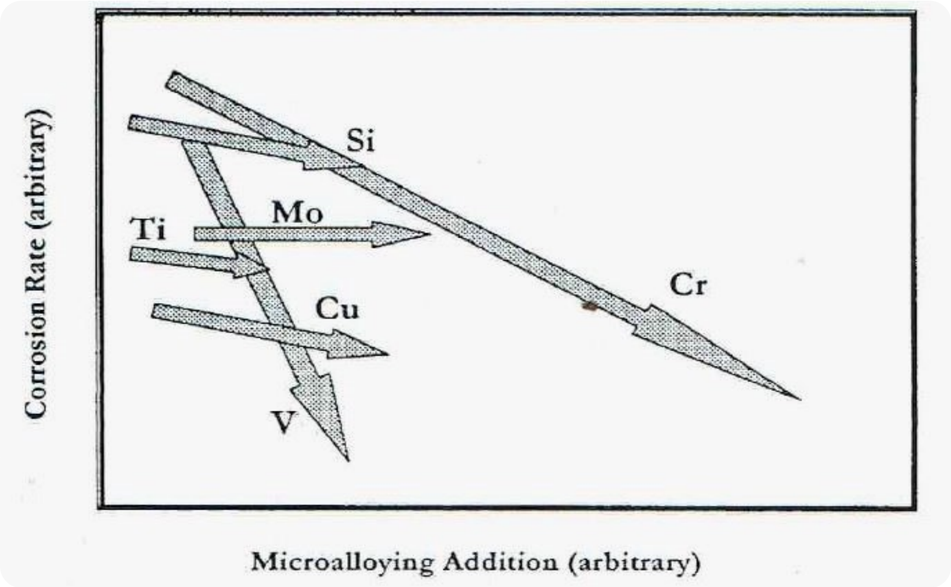
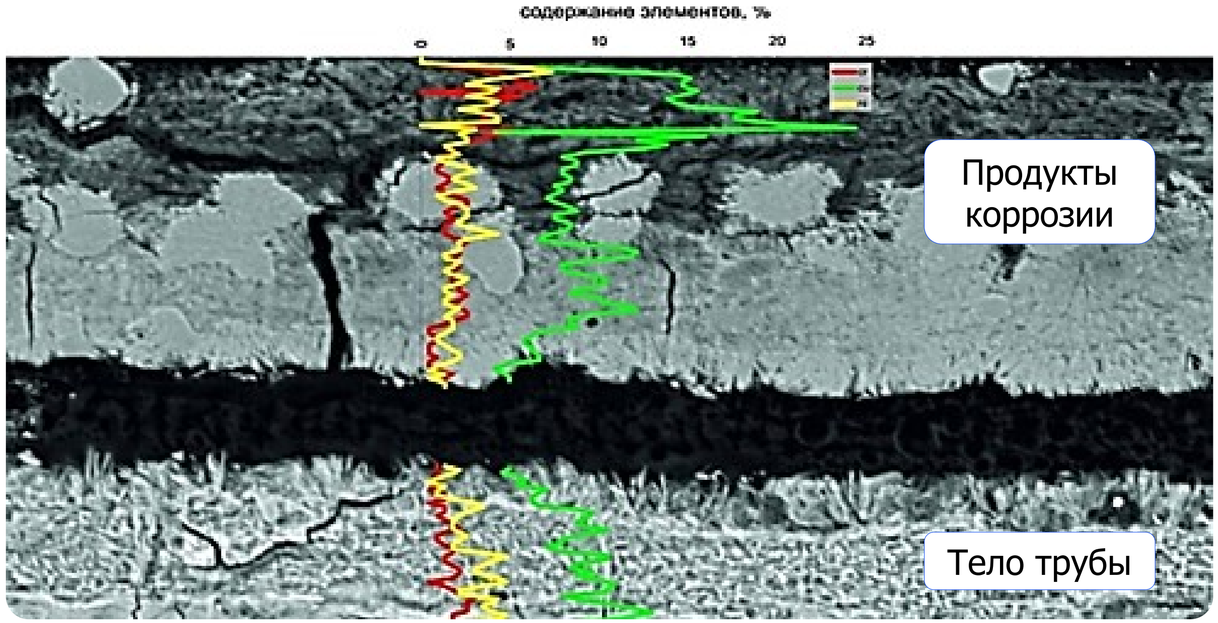


Диаграмма влияния химических элементов на скорость локальной коррозии на нефтепроводах



Картирование химического состава: от тела трубы к поверхности

V ⟶ **V_2O_5**

негативно сказывается на качестве продольного сварного соединения

Cu, **Cr** – защитный слой

Cu – антифрикционные свойства

Cu ⟶ **Ni**

устранение проявления поверхностного дефекта - чешуйчатости

	C	O	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Fe
масс %	42,64	16,95	0,54	**3,98**	-	2,50	**12,96**	ост

Вторая идея: повышение чистоты по коррозионно-активным неметаллическим включениям

Принципы микролегирования низкоуглеродистых сталей

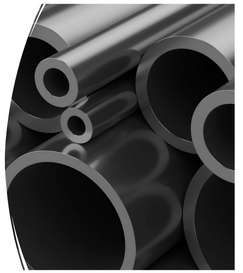
1. Пониженное содержание углерода, повышенное содержание хрома порядка 0,5-0,7 % присутствие ниобия и ванадия:
– Cr способствует повышению твердорастворного упрочнения.
– ↓C углерода уменьшает химическую неоднородность, позволяет хрому оставаться в твердом растворе.
– Nb+V сильные карбидообразующие элементы (карбиды Nb уменьшая размер зерна, повышают хладостойкость, а карбиды V обеспечивают прочностные характеристики и способствуют вторичному упрочнению при повышенных температурах свыше 600 °C).

Огнестойкие сталь
Fe-C-Cr-V-Nb



2. Пониженное содержание углерода, хром в диапазоне 0,3-0,4 %, повышенное содержание меди 0,2-0,3%, присутствие ниобия и титана:
– Cu образует защитный слой и усиливает эффективность хрома;
– Nb+Ti уменьшают размер зерна, повышают хладостойкость.

Сварная труба
Fe-C-Cr-Cu-Nb-Ti



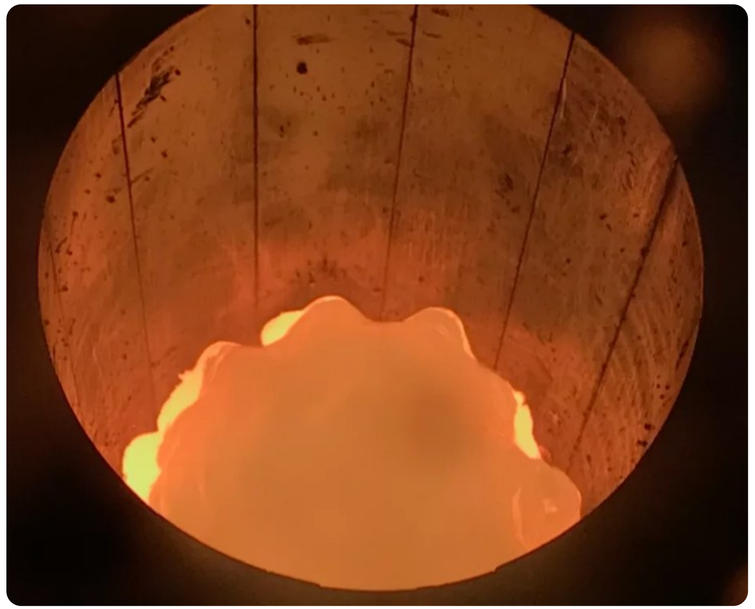
3. Пониженное содержание углерода, повышенное содержание хрома 0,4-0,6 %, присутствие ниобия и ванадия:
– Cr образует защитный слой;
– ↓C уменьшает осевую сегрегацию, позволяя Cr оставаться в твердом растворе;
– Nb уменьшает размер зерна, повышает хладостойкость;
– V обеспечивает прочностные характеристики.

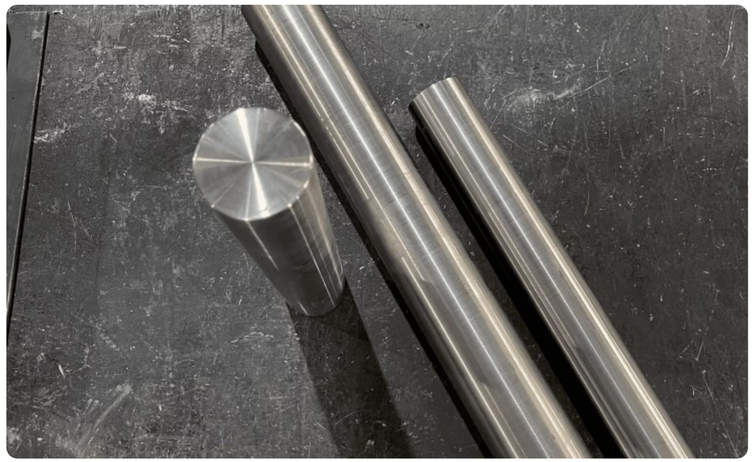
Бесшовная труба
Fe-C-Cr-V-Nb



Выплавка в лабораторных условиях









Основные этапы работы

01 Разработка систем легирования металла, отработка экспериментальных химических составов;

02 Подбор оптимальной термомеханической обработки (ТМО);

03 Проведение комплекс исследований физико-механических свойств, металлографические исследования. Анализ полученных результатов;

04 Проведение специализированных испытаний, имитирующих реальные условия эксплуатации: высокотемпературные испытания на растяжение, коррозионные и автоклавные испытания;

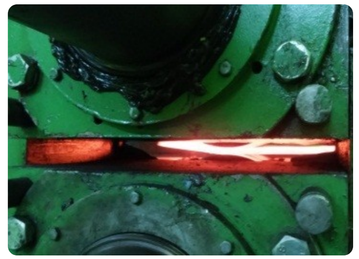
05 Выбор оптимального решения по легированию и ТМО для промышленного рулонного проката НШПС 2000 на базе ПАО «Северсталь» и трубной заготовки на стане ТПА 73-273 на базе АО «ВМЗ»;

06 Изготовление опытных образцов готовой продукции: двутавровая балка, прямошовная сварная труба, бесшовная труба;

07 Проведение опытно-промысловых испытаний труб, а также огневых испытаний на стендах ВНИИПО;

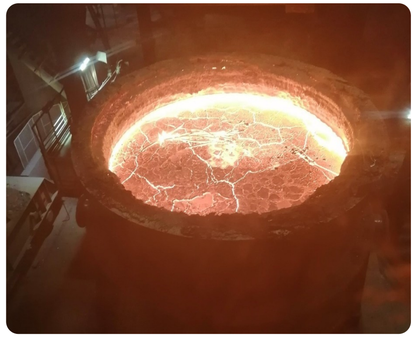
08 Разработка нормативно-технологической документации для производства металлопродукции со специальными свойствами.



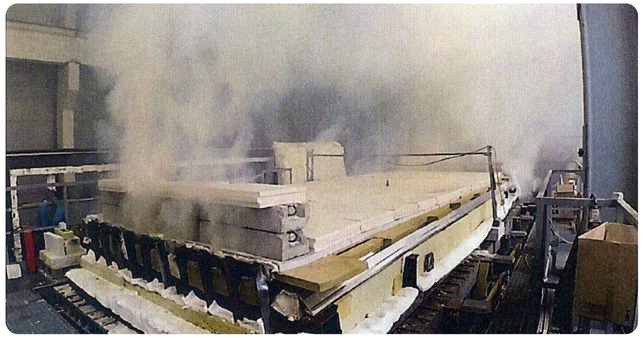














МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

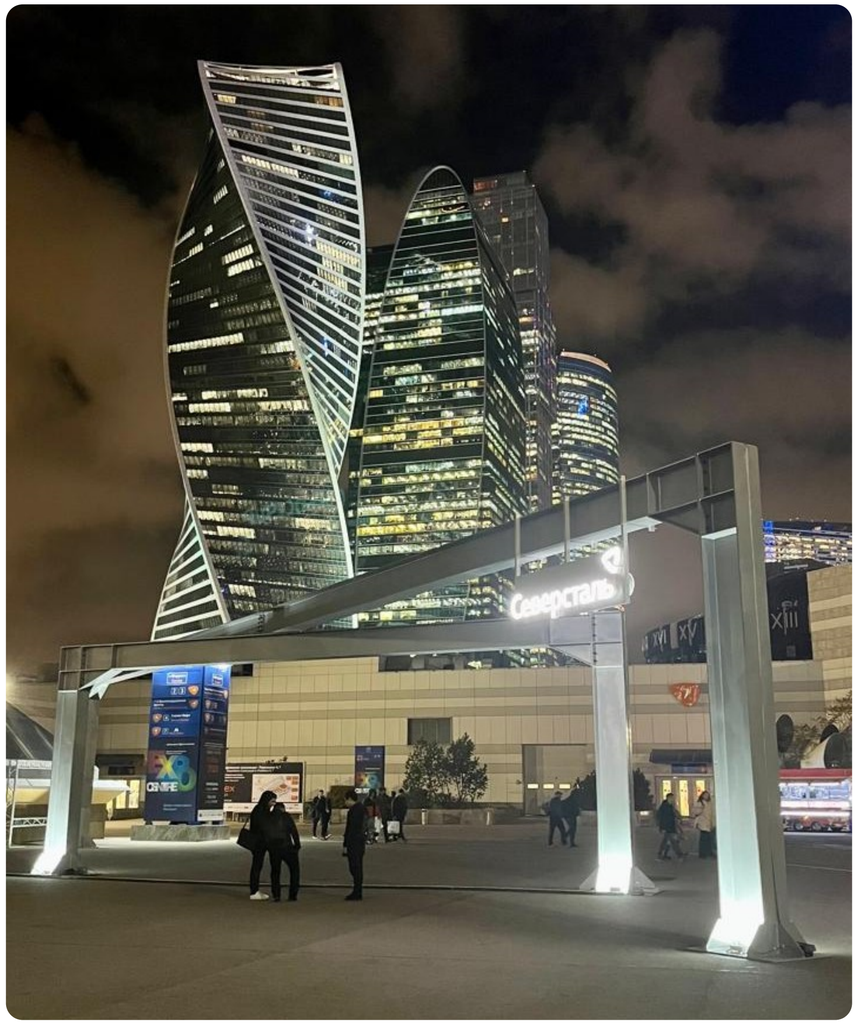
Огнестойкий прокат



Промышленная апробация







Объём производства огнестойкого проката С390П составил **более 100 тонн**

Испытания на огнестойкость стальных двутавровых балок



Балка до испытания

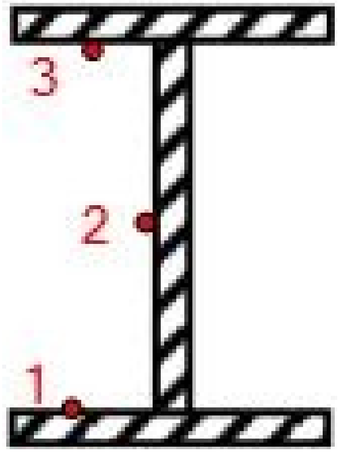


Схема расстановки термопар

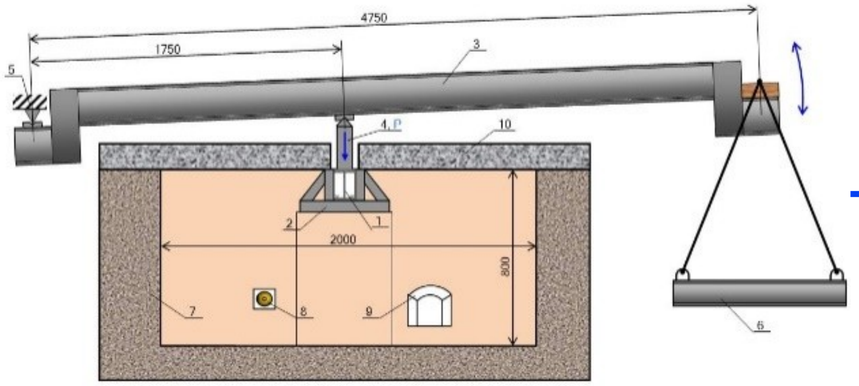


Схема рычажной установки для испытаний балок под нагрузкой



Подача воздушно-керосиновой смеси



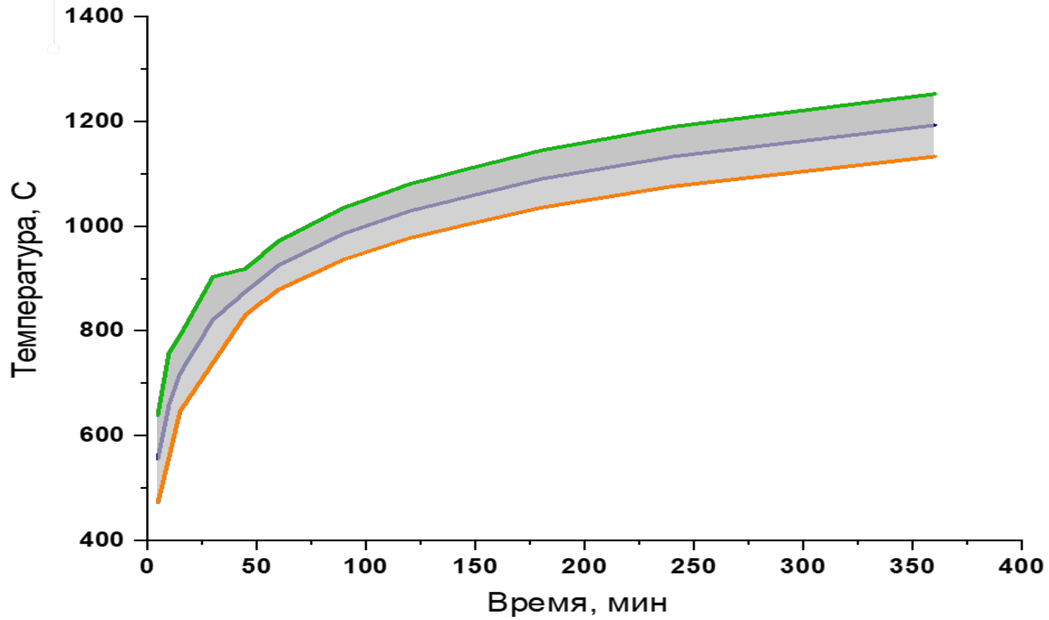
Замер прогиба балки



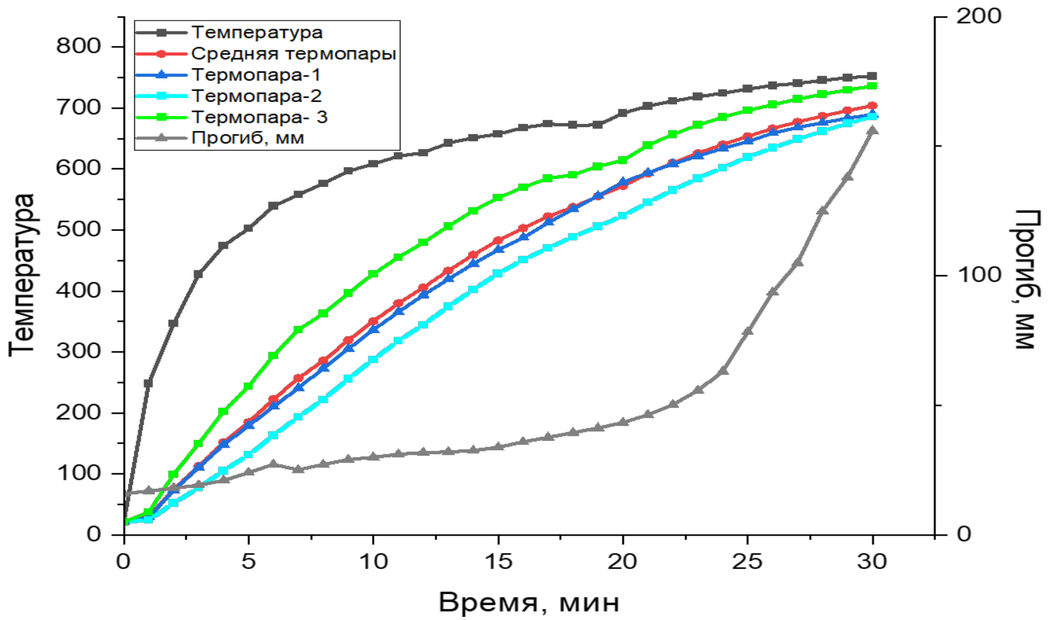
Балка после испытания

Испытания на огнестойкость стальных двутавровых балок

Марка стали	Нагрузка, кг	Время до потери несущей способности, мин	Температуры потери несущей способности, °С
Ст3сп (С255)	3887	14 – 15	469/498
09Г2С (С355)	5886	17 – 18	525/540
06МБФ (С355П)	5886	27 – 28	683/691
06ХБТФ (С390П)	**6593**	**24 – 31**	**693/704**



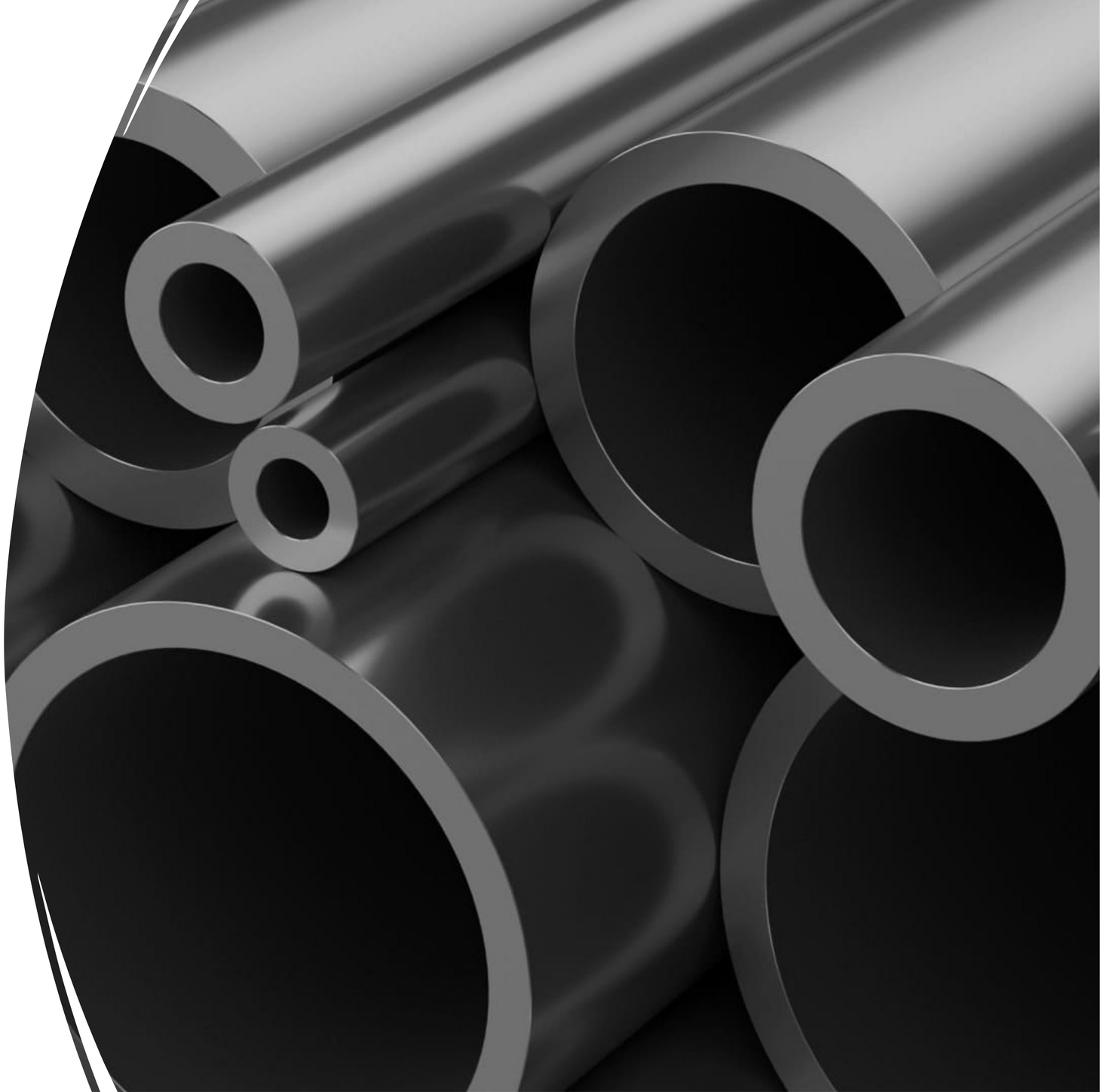
Кривая нагрева печи по ГОСТ 30247.0-94



Графики изменения температуры в огневой камере печи и величины соответствующего прогиба

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

Сварная труба



Промышленная апробация

Марка стали 07ХНД – прокат для нефтегазовых труб, обладающих долговечностью, устойчивостью к агрессивной среде и повышенной хладостойкостью.

01

Вид продукции

Труба прямошовная, классы прочности К52 - К60 (Х70)

02

Сортамент продукции

ТМСД (диаметр 114 – 508 мм, толщина стенки 6 – 12 мм),
ТБД (диаметр 530 – 1020 мм, толщина стенки 10 – 34 мм)

03

Хладостойкость

Значения ударной вязкости KCV_{-40} более 150 Дж/см^2

04

Эксплуатационные показатели

Плановый срок эксплуатации труб увеличится в 1,5-2 раза относительно марок сталей предшествующего поколения



Объём производства рулонного проката из стали 07ХНД **более 40 тыс. тонн**

Проведение испытаний ООО «Газпромнефть-Восток», Урманское месторождение

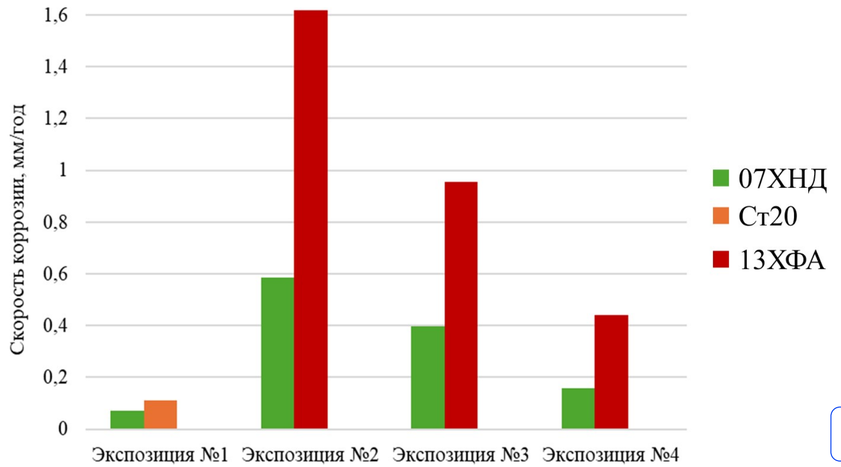
МИСИС УНИВЕРСИТЕТ

Результаты испытаний 1 этапа

№ ОСК	Дата установки	Дата изготовления	Сутки	Часы	Принятая скорость коррозии, мм/год	Оценка скорости коррозии
1 экспозиция Куст 4 Урманского м/р						
Ст20	07.08.2018	28.08.2018	21	504	0,1093	Скорость коррозии 07ХНД ниже на 33,6%
07ХНД	07.08.2018	28.08.2018	21	504	0,0426	
2 экспозиция Куст 4 Урманского м/р						
13ХФА	28.08.2018	19.09.2018	21	528	1,6179	Скорость коррозии 07ХНД ниже на 58-64%
07ХНД	28.08.2018	19.09.2018	21	528	0,5860	
3 экспозиция Куст 4 Урманского м/р						
13ХФА	19.09.2018	10.10.2018	21	504	0,9566	
07ХНД	19.09.2018	10.10.2018	21	504	0,3975	
4 экспозиция Куст 4 Урманского м/р						
13ХФА	10.10.2018	31.10.2018	21	504	0,4413	
07ХНД	10.10.2018	31.10.2018	21	504	0,1572	

Результаты испытаний 2 этапа

Катушка	**Период испытания**	**Величина глубочайшего дефекта, мм**	**Принятая скорость коррозии, мм/год**
Ст20 (1 катушка)	605 дней	1,2	0,7
Ст20 (2 катушка)	605 дней	1,8	1,8
07ХНД (1 катушка)	605 дней	**0,3**	**0,3**
07ХНД (2 катушка)	605 дней	**0,2**	**0,2**
13ХФА	605 дней	0,7	0,7





Образцы – свидетели коррозии



Общий вид испытательного стенда с установленными катушками

Опытно-промысловые испытания ООО «Иркутская нефтяная компания», Большетирское месторождение

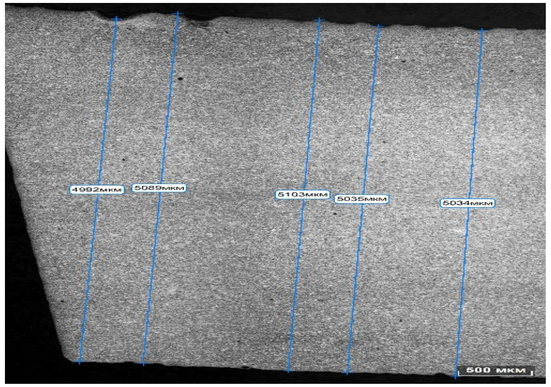
В период 06.04.2019-18.09.2020 (531 дней) были проведены испытания электросварной прямошовной **трубы Ø114х5мм марки 07ХНД** в составе байпасной линии.

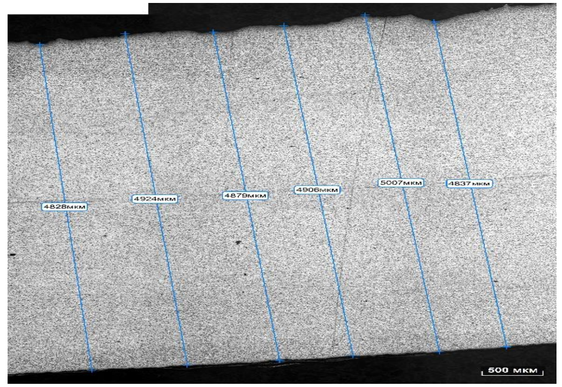


Внешний вид катушки 07ХНД с фланцем после ОПИ



Внутренняя поверхность нижней образующей трубы катушки 07ХНД после ОПИ





Измерение толщины металла трубы

Скорость общей коррозии катушки из стали 07ХНД не превышает 0,1 мм/год (среднее значение по десяти участкам замера толщины стенки трубы – 0,034 мм)

Результаты испытаний на стойкость к водородному растрескиванию и коррозионную стойкость материала трубы после ОПИ

Марка стали	Сорта мент, мм	Маркировка (испытываемая область)	Величина коэффициентов длины и толщины трещин водородного растрескивания по NACE TM0284		Скорость общей коррозии в H2S-содержащей среде, мм/год
			CLR, %	CTR, %	
07ХНД	114х5	07ХНД	0,00	0,00	<0,1

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

Бесшовная труба



Промышленная апробация

Технологическая линия Выксунского завода ОМК по производству бесшовной трубы ⌀114х8 из стали 10ХБ





Содержание химических элементов, массовая доля элементов, %											
Марка стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Nb
10ХБ*	0,07	0,25	0,92	0,006	0,004	0,64	0,02	0,09	0,014	0,011	0,031

Образец	Вид ТО			Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Ударная вязкость KCV^{-60}, Дж/см^2
	Режим закалки		Температура отпуска, °С				
	Температура, °С	среда					
10ХБ (ОМК)	910	вода	550	520	590	24,0	277
			600	480	550	24,0	253

*Бесшовная горячекатаная стальная труба и способ её изготовления. Регистрационная заявка на получение патента, декабрь 2024

Объём производства рулонного проката из стали 10ХБ более **100 тонн**

Лабораторные исследования термомеханических процессов

№ п/п	Содержание химических элементов, массовая доля элементов, %												
	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Nb	V	Ti	Al	N
Э-1	0,07	0,25	0,92	0,004	0,006	0,09	0,020	**0,64**	**0,031**	0,002	0,011	0,014	0,007
Э-2	0,07	0,17	0,81	0,004	0,008	0,10	0,020	0,41	0,005	**0,070**	0,002	0,008	0,003
Э-3	0,08	0,25	0,86	0,004	0,008	0,09	0,025	0,42	**0,029**	0,002	0,007	0,013	0,005



Прошивка на стане «МИСИС 130Д»





Внешний вид черновых гильз после горячей винтовой прошивки

Схема получения лабораторных образцов:

1) Нагрев исходных заготовок перед прошивкой;
2) Зацентровка исходных заготовок перед черновой прошивкой;
3) Прошивка гильз в черновую трубу промежуточных размеров;
4) Окончательное формирование диаметра и толщины стенки трубы.

Лабораторные исследования термомеханических процессов



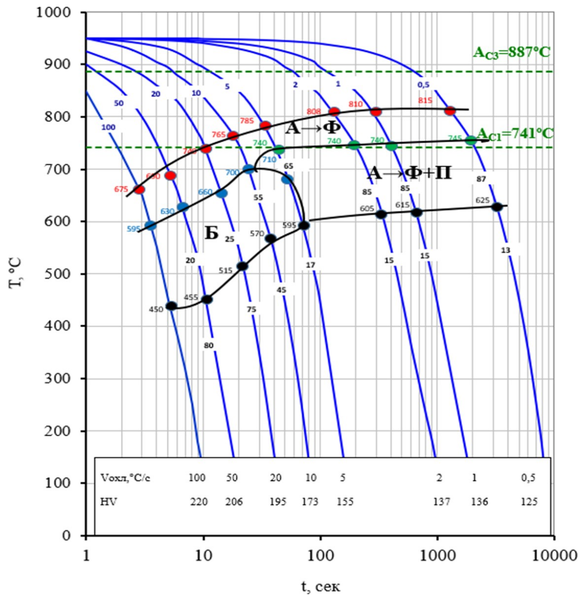
Нагревательная печь



Универсальный прокатный стан ДУО-210



Образцы после прокатки



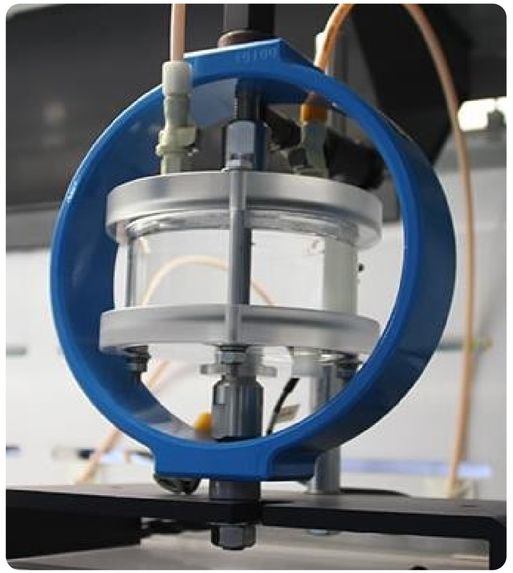
Термокинетическая диаграмма для экспериментального образца

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



Образцы после прокатки

Коррозионные испытания на СКРН





а)



б)

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

Для экспериментального образца были проведены дополнительные испытания с пороговым напряжением **80, 85, 90, 95 %** от минимального предела текучести для класса прочности К52.
Образцы успешно прошли испытания.

Параметры проведения СКРН

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

Образец	Температура отпуска, °С	Минимальный $\sigma_т$ для К52, МПа	Напряжение испытания, МПа (75% от $\sigma_т$ для К52)	Время до разрушения, часы	Наличие/отсутствие дефекта (трещина)
Э-1	550	372	280	720	**Без разрушения. Отсутствие трещин на поверхности образца**
	600				
Э-2	600				
	680				
Э-3	550				
	600				

Структура:
Сорбит отпуска

Рекомендуемая технология:
К52 - закалка + отпуск 600 °С

Итоговая таблица результатов исследования

Специальное свойство	Металлопродукция	Марка стали	Недостаток	Новая марка стали	Преимущества
Огнестойкость	Рулонный прокат	Ст3сп, 09Г2С, 06МБФ	Недостаточная высокотемпературная прочность, низкий класс прочности	06ХБТФ	Высокопрочное состояние, повышенный предел огнестойкости
Коррозионная стойкость	Рулонный прокат, трубная заготовка	09Г2С, Ст20, 13ХФА	Высокая скорость локальной коррозии, нестальбильные свойства	07ХНД, 10ХБ	Повышенная коррозионная стойкость в многокомпонентных высокоагрессивных средах

Апробация работы







2020: создание и освоение технологии производства низколегированного рулонного проката для нефтегазопроводных труб с повышенной хладостойкостью и коррозионной стойкостью марки стали 07ХНД класса прочности К52-К56

2023: разработка технологии производства низколегированного рулонного проката для строительных конструкции с нормируемым пределом огнестойкости категории прочности С390П

2024: разработка и внедрение комплексных технологий производства бесшовных труб из низколегированных сталей нового поколения для осложненных условиях эксплуатации нефтепромыслов Российский Федерации

Приглашаем к участию в круглом столе

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

«Материалы и трубные технологии для ТЭК: повышая надёжность и эффективность»

ДАТА И ВРЕМЯ
12 ноября 2026
10:00–13:00

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ
Санкт-Петербург
32-я межд. выставка

КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Бесшовные трубы
Материалы, технологии производства, качество и эксплуатационная надёжность

Сварные трубы
Современные технологические решения, свойства и повышение эффективности

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

Спасибо за внимание!

Александр Комиссаров
komissarov@misis.ru
+7 (495) 638 4583