МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ



Роль металловедческих исследований при разработке новых технологий и сталей для производства труб

Кудашов Дмитрий Викторович

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Эволюционные изменения сталей для нефтегазопроводных труб

Стали типа «ГС» - кремнемарганцовистые

Низкоуглеродистые и микролегированные стали

К50, хладостойкость до -20

+ хладостойкость до -40

К52,+ коррозия, хладостойкость до -60°С

Одновременное достижение прочности до К60, хладостойкости до -60 °С, устойчивости к разным видам коррозионного разрушения

СЕГОДНЯ

1960-1970-е

Марки:
09Г2С, 17Г1С
НТД:
ГОСТ 10705-63, ГОСТ 19282-73

1980-е

Марки:
09Г2С, 17Г1С-У
НТД:
ГОСТ 10705-80

1990-2000-е

Марки: 09Г2С, 20-КСХ, 13ХФА, 09ГСФ и др.
НТД: технические условия с потребителями

Марки: 06ГБ, Х42-Х70 (API 5L), 05ХГБ и др.
НТД: технические условия с потребителями

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Эволюционные изменения сталей для нефтегазопроводных труб

Стали типа «ГС» - кремнемарганцовистые

Низкоуглеродистые и микролегированные стали

К50, хладостойкость до -20

+ хладостойкость до -40

К52,+ коррозия, хладостойкость до -60°С

Одновременное достижение прочности до К60, хладостойкости до -60 °С, устойчивости к разным видам коррозионного разрушения

1960-1970-е

Марки:
09Г2С, 17Г1С
НТД:
ГОСТ 10705-63, ГОСТ 19282-73

1980-е

Марки:
09Г2С, 17Г1С-У
НТД:
ГОСТ 10705-80

1990-2000-е

Марки: 09Г2С, 20-КСХ, 13ХФА, 09ГСФ и др.
НТД: технические условия с потребителями

вчера

Марки: 06ГБ, Х42-Х70 (API 5L), 05ХГБ и др.
НТД: технические условия с потребителями

сегодня

ГОСТ
МУК, ЕТТ и др, где снова немного разные химсоставы и требования

Переход от кремнемарганцовистых сталей (типа «ГС») к низкоуглеродистым микролегированным

***Цель**: расширение классов прочности до К60, одновременное и стабильное обеспечение прочности, хладостойкости и коррозионной стойкости стальных труб.*

Концепция: управление структурой и свойствами за счет хим. состава и технологии производства.

С требованиями по коррозии

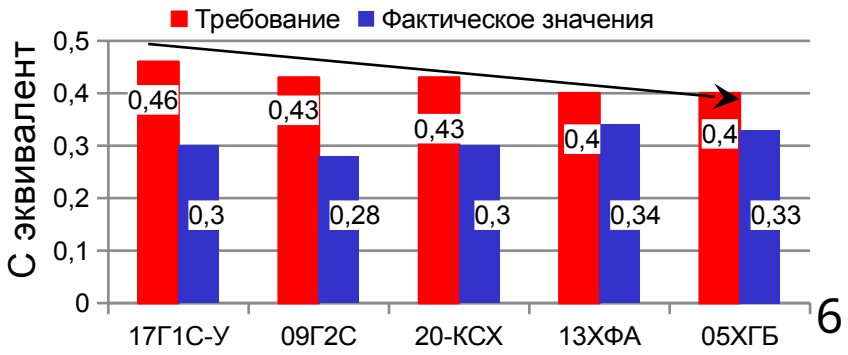
+ разработка технологии уровня «Ноу Хау»

Без требований по коррозии

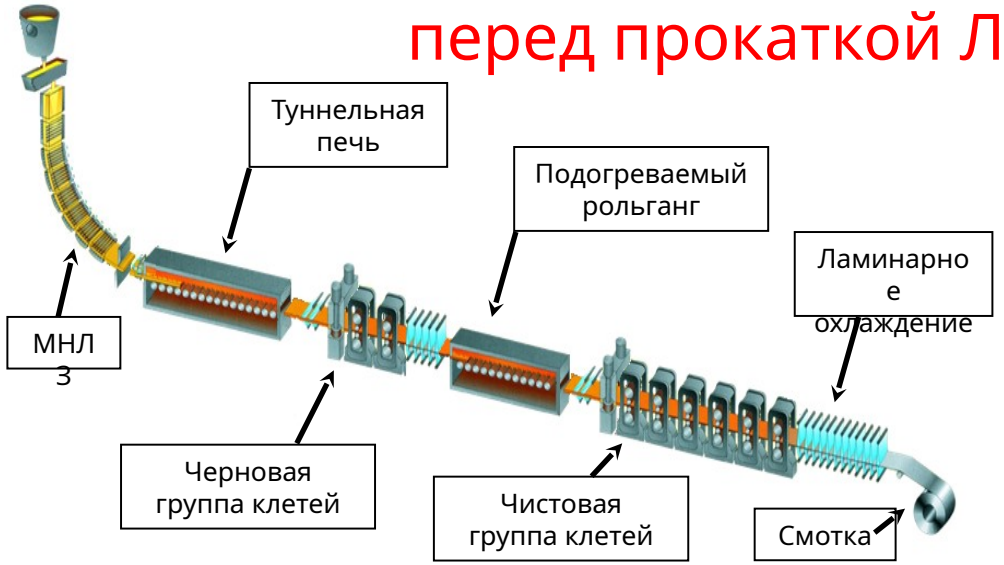
Низкоуглеродистые стали повышенной коррозионной стойкости типа 05ХГБ, Х46 – Х70 по PSL2 API 5L

Низкоуглеродистые стали типа 06ГБ, К42-К60 (Х46 – Х70 по PSL1 API 5L)

Дополнительно: снижение углеродного эквивалента для улучшения свариваемости, в том числе в трассовых условиях.



Сравнение исходного состояния структуры сляба
перед прокаткой ЛПК vs МКС стан 5000

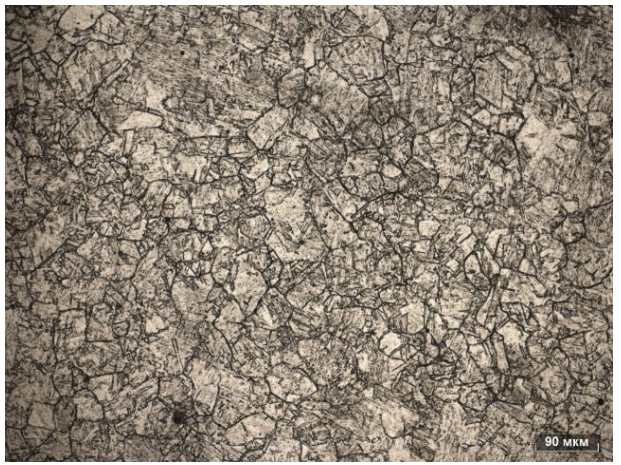






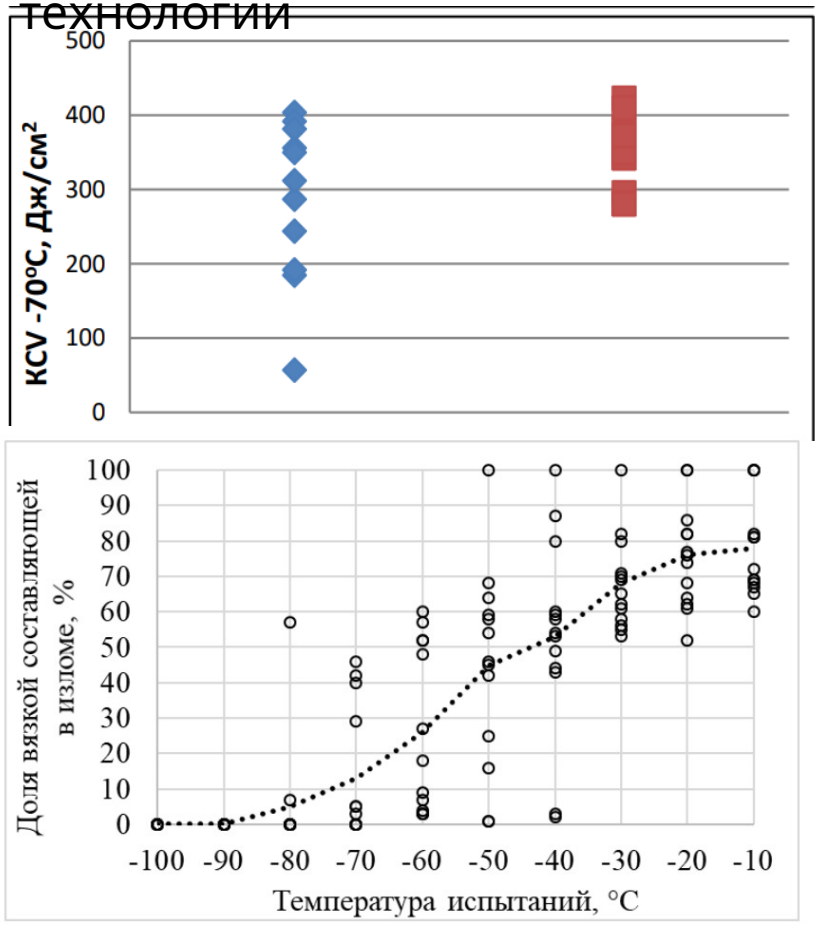
ЛПК
Суммарное обжатие ~7,5-10 крат Толщина сляба 70-90 мм D_γ=300-2000 мкм
Состояние микролегирующих: Частично выделены

Толстолистовой стан
Суммарное обжатие ~12-20 крат Толщина сляба 200-355 мм D_γ=60-100 мкм
Состояние микролегирующих: В твердом растворе (кроме TiN)



Показатели хладостойкоти и задача исследований

Ударная вязкость образцов разных партий проката, произведенный по одной технологии



Подобное поведение встречается и в прокате ЛПК и в прокате МКС
При этом:

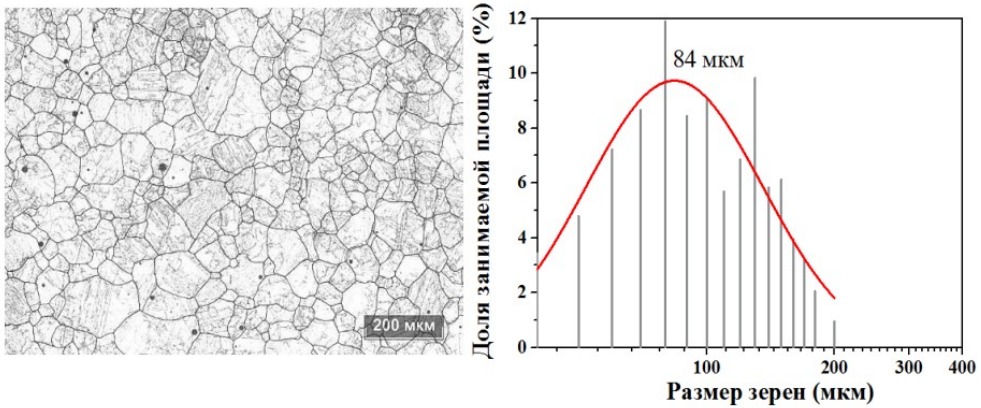
- Химический состав разных партий одинаков
- Отклонений по параметрам контролируемой прокатки нет
- Испытания в одной лаборатории и на одном оборудовании

Одна из возможных причин – неравномерное зерно аустенита перед чистовой или черновой прокаткой

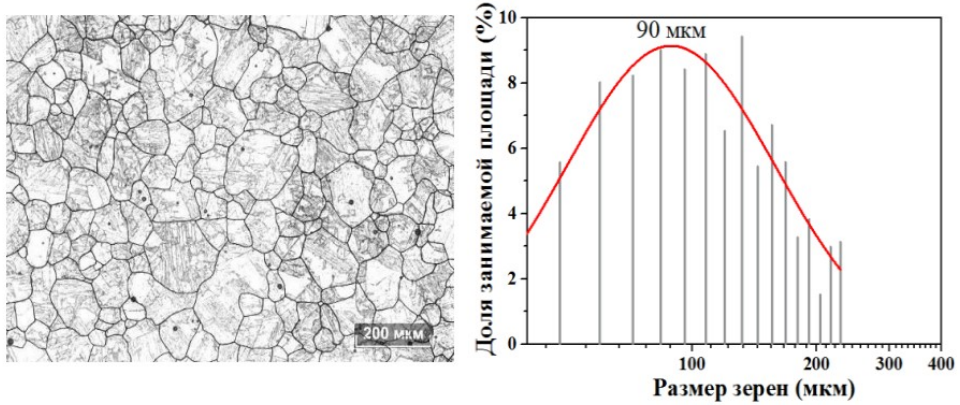
МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Аустенитная структура сталей после черновой прокатки ЛПК

1. Однородная структура после черновой прокатки

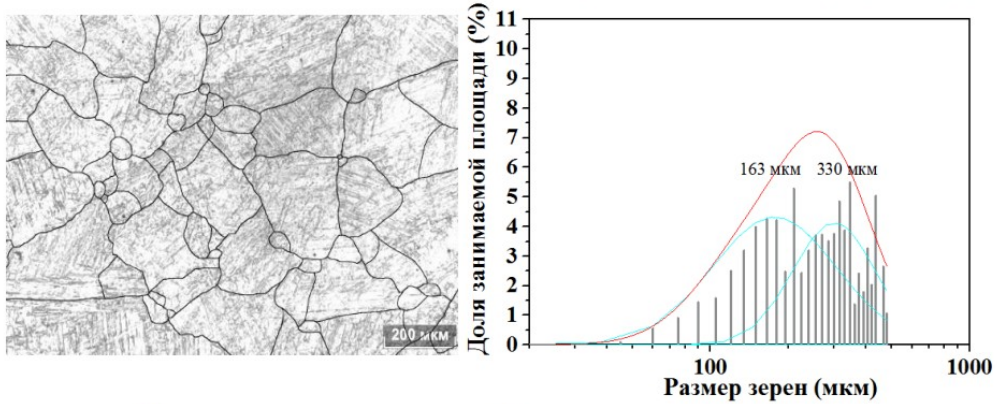


После черновой стадии

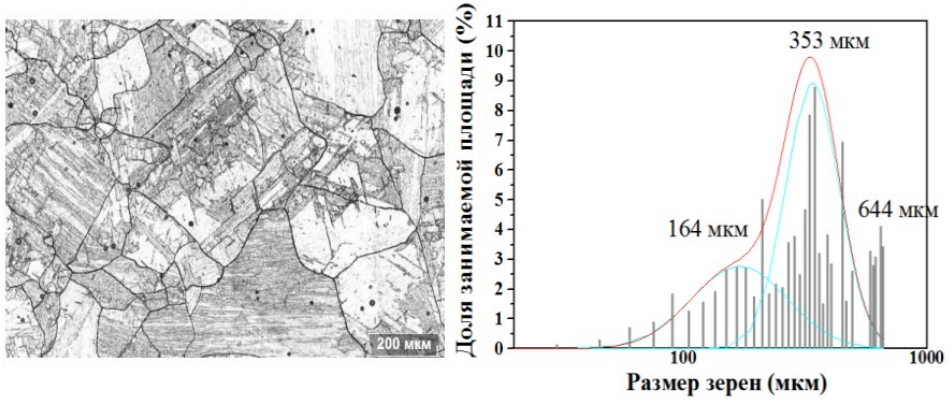


Перед чистовой стадией

2. Неоднородная структура после черновой прокатки



После черновой стадии

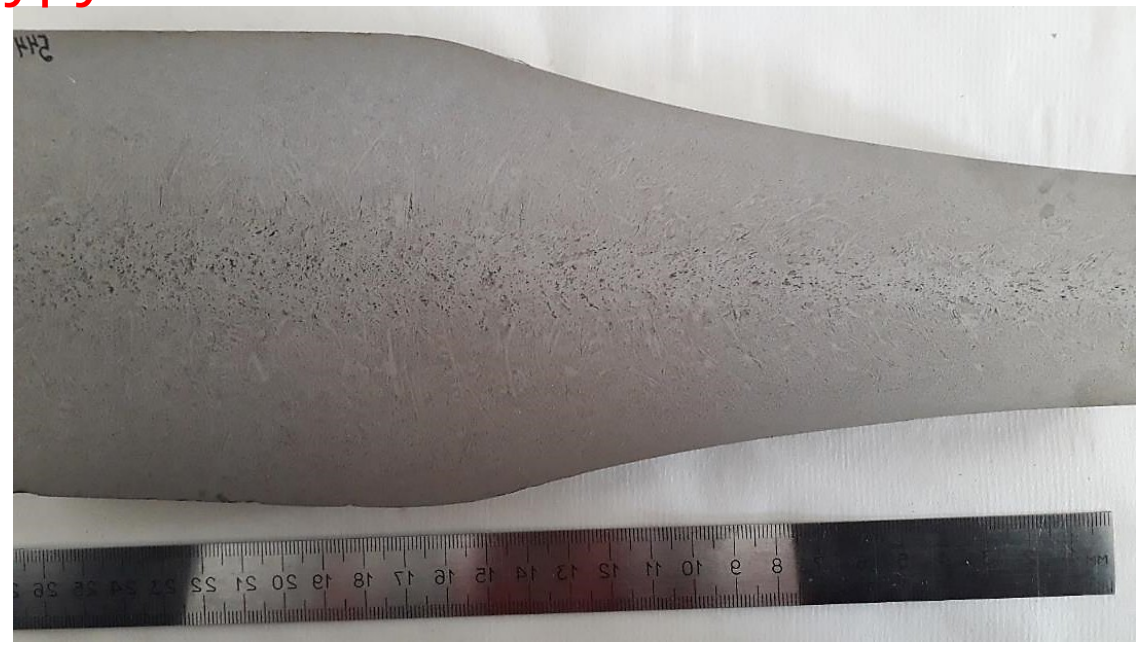


Перед чистовой стадией

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Эксперимент по оценке влияния черновой прокатки на структуру стали

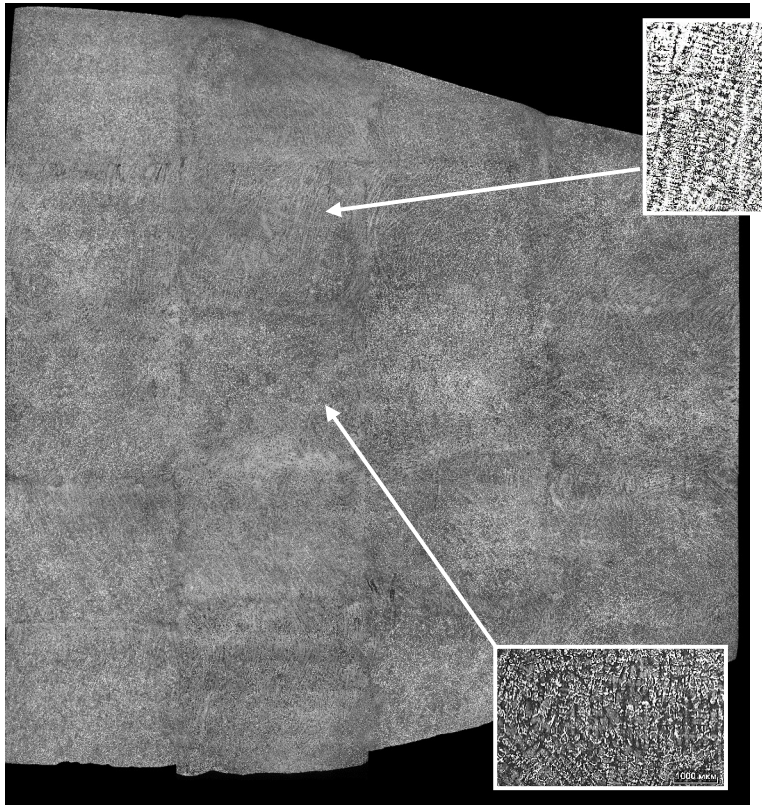




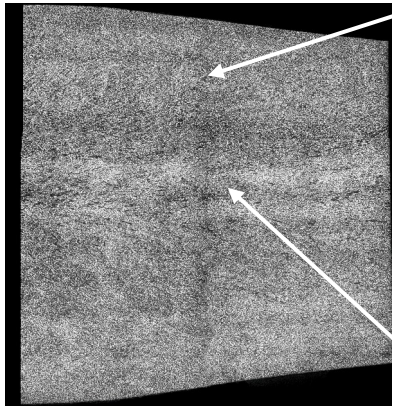


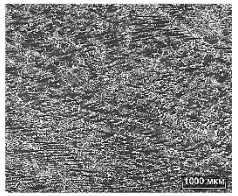
МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

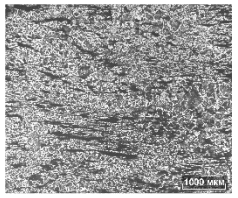
Изменение дендритной структуру в процессе черновой прокатки

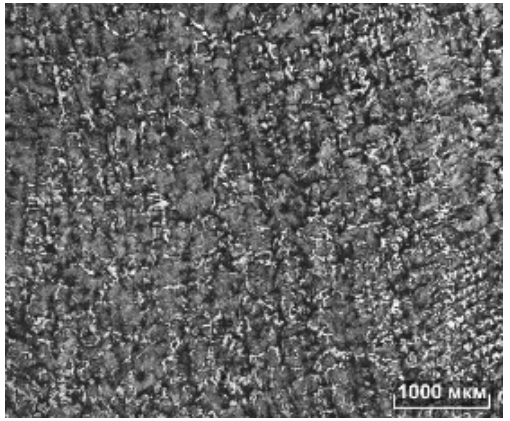


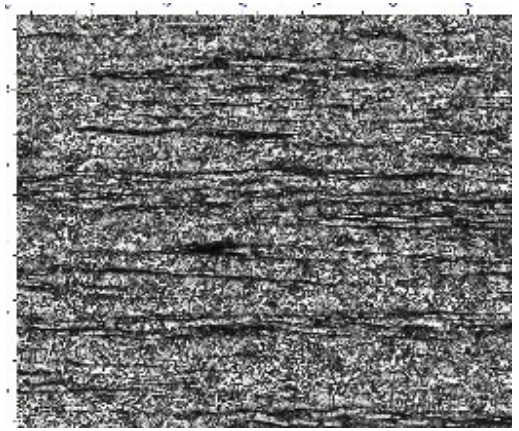








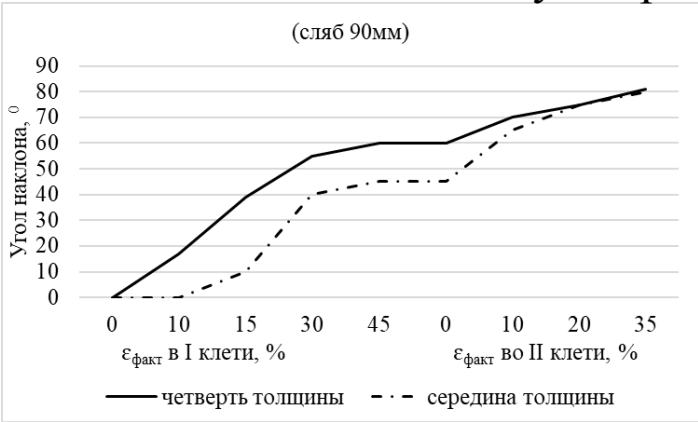


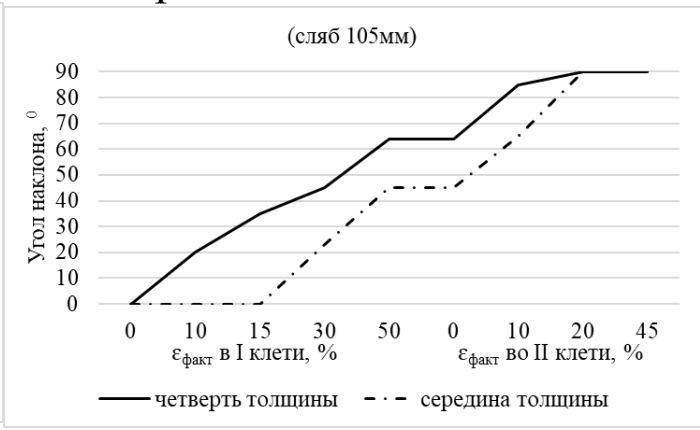


МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

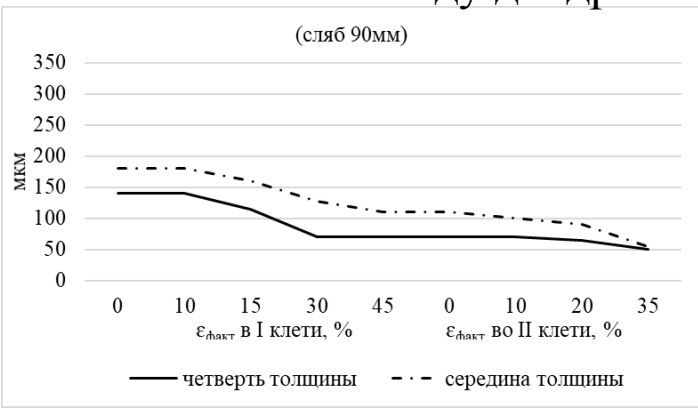
Изменение параметров дендритной структуру в процессе черновой прокатки

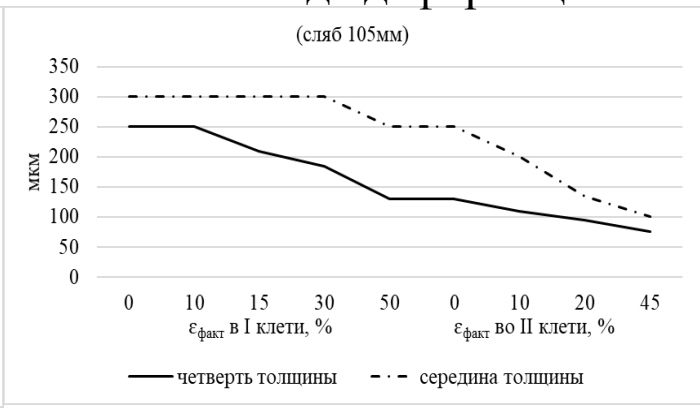
Изменение угла наклона осей первого порядка в ходе деформации по отношению к главному направлению роста





Расстояния между дендритными осями в ходе деформации





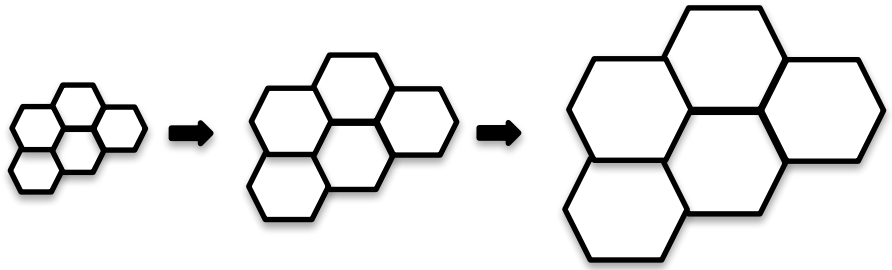
- Для разной толщины сляба на ЛПК необходимо обеспечить различные режимы черновой прокатки
- Для сляба 110 мм изменения расстояния между дендритными осями начинается при степени деформации более 30%, а в слябе 90 мм уже при 10-15%
- Возможно для разных толщин сляба подобрать режимы черновой прокатки обеспечивающие формирование равномерной аустенитной структуры

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

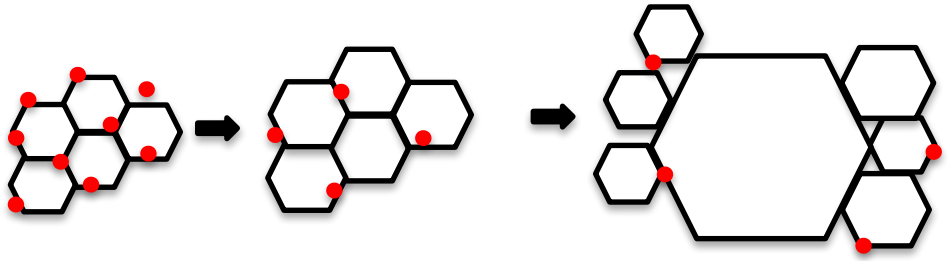
Схематичное структурообразовании аустенита при нагреве перед прокаткой



классический состав



состав с микролегированием



Микролегирования с точки зрения нагрева:
+ Снижение среднего размера аустенитного зерна
– Риск аномального роста аустенитного зерна

Задача нагрева – получить однородную структуру без аномального зерна аустенита, при этом максимально растворить частицы карбидов микролегирующих элементов.

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Влияние температуры нагрева на аустенитную структуру сталей

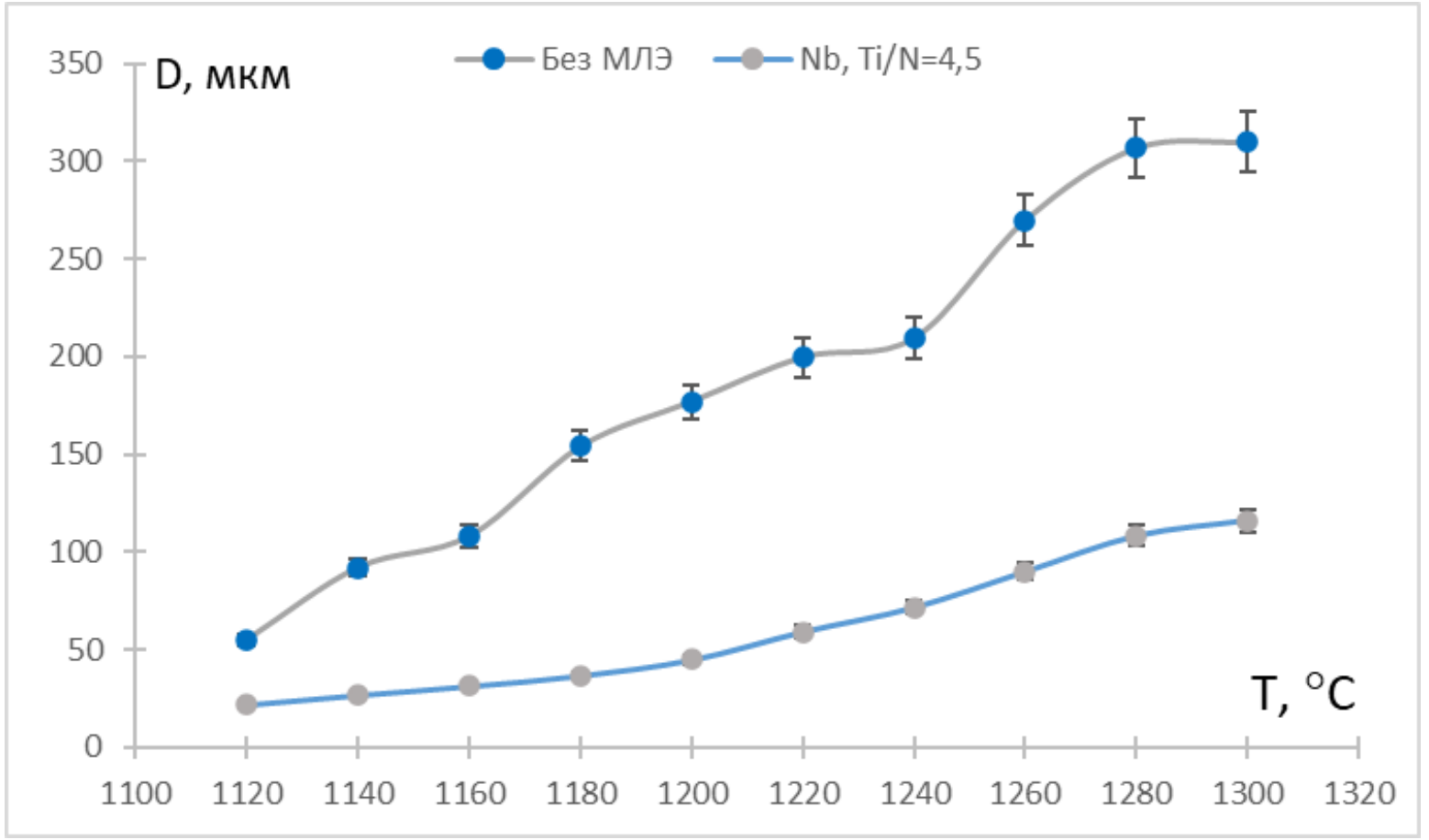


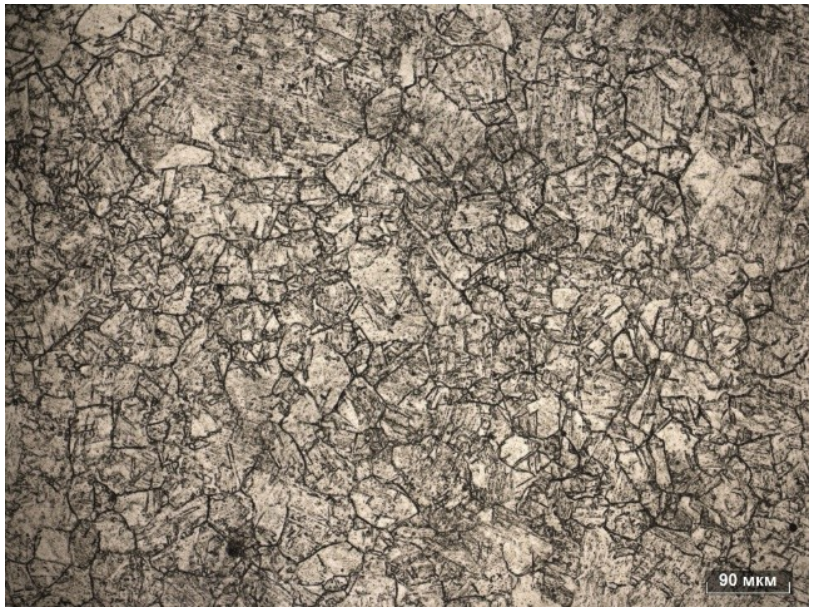
График зависимости среднего размера аустенитного зерна сталей «Без МЛЭ» и «Nb, Ti» от температуры нагрева при выдержки 30 минут

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Влияние химического состава стали на тип микроструктуры и средний размер зерна



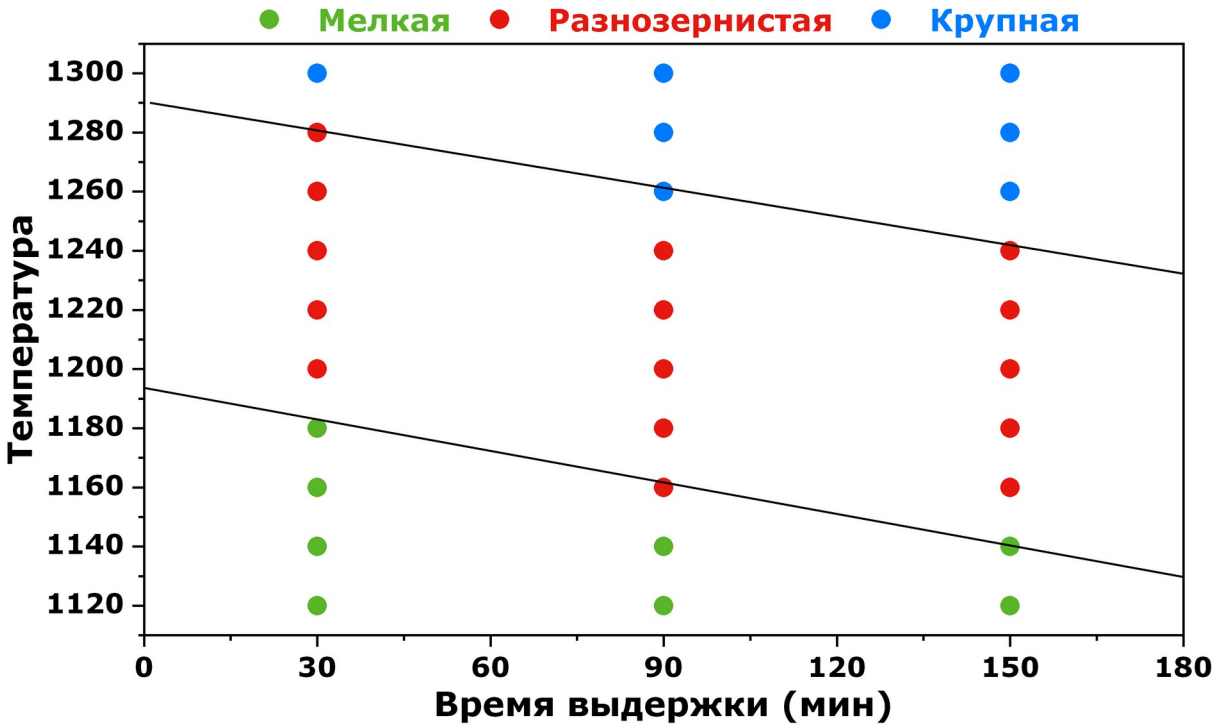




Без МЛЭ

С микролегированием

Структурная карта при варьировании параметров нагрева сляба

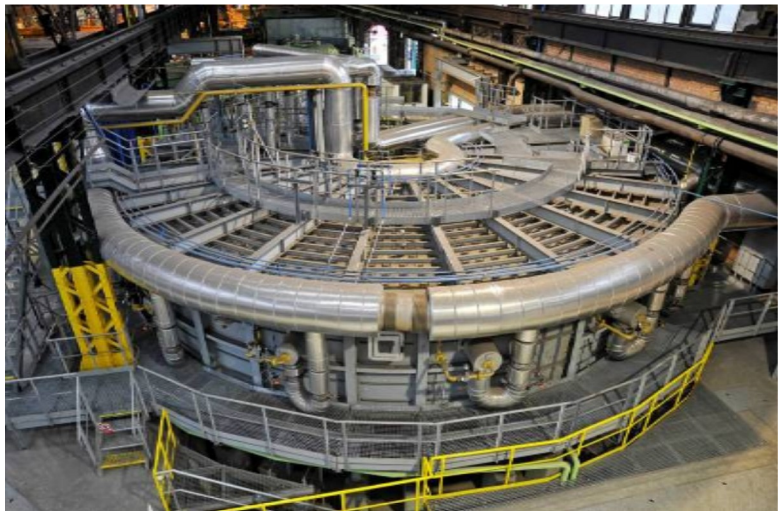


Карта структурных состояний аустенита для стали «Nb, Ti/N=2,25»

- При разработке новых сталей необходимо учитывать влияние температуры и времени выдержки при нагреве под прокатку
- Температуру нагрева необходимо выбирать из условий предотвращения развития разнозернисти аустенита
- Один из методов оценки аустенитной структуры-построение карт нагрева с выделением зон

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Нагрев металла исходной заготовки



Максимальная температура нагрева 1200…1250 °С

Кроме коррозионной стойкости необходимо достичь хладостойкости до температур -60

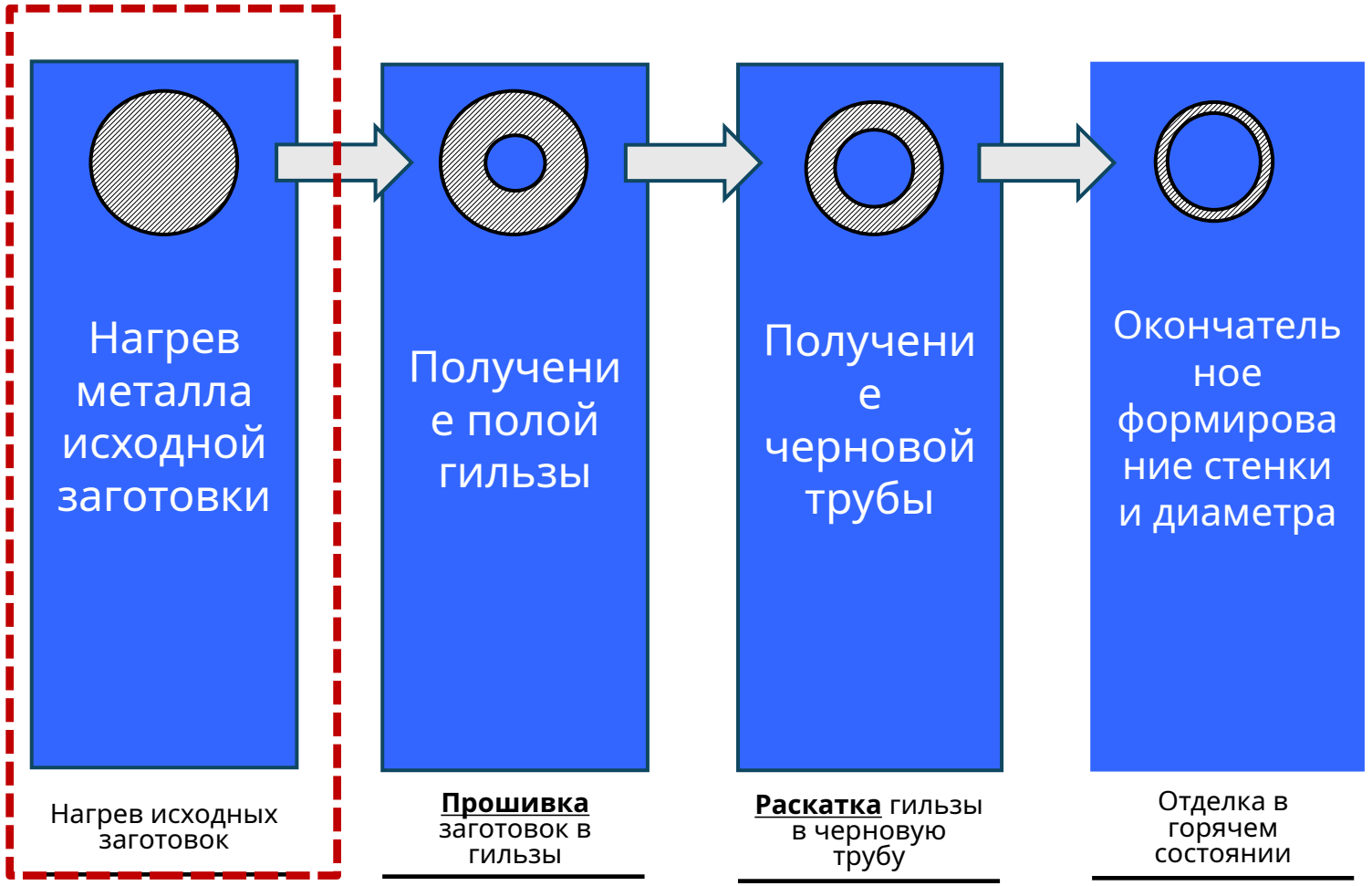
Задачи

Предотвратить полное растворение карбидов микролегирующих элементов и рост зерна аустенита

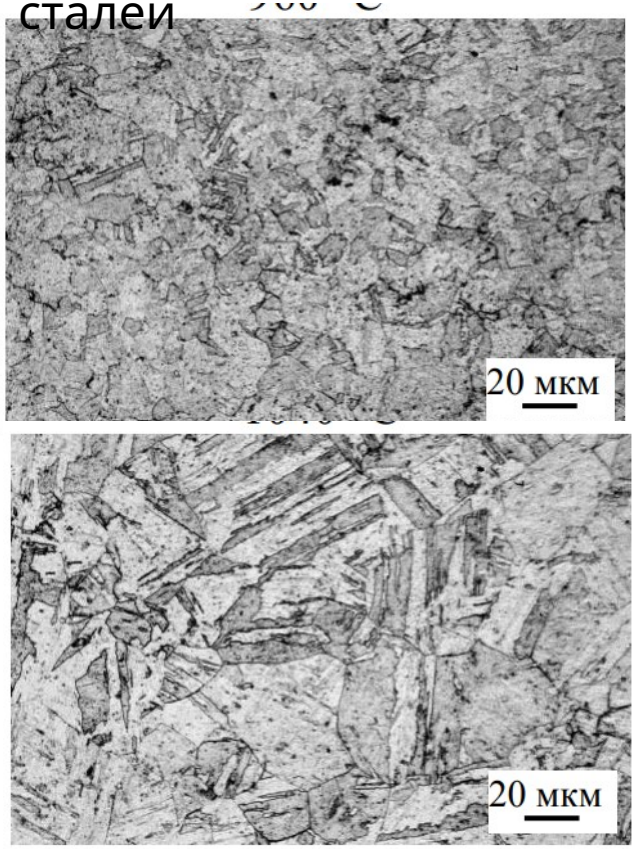
Предотвратить или минимизировать образование дельта феррита (может сохраняться до комнатной температуры и снижать хладостойкость

Термодинамические расчеты для разных содержаний никеля, углерода и микролегирующих элементов

Этапы производства бесшовных труб



Термообработка сталей



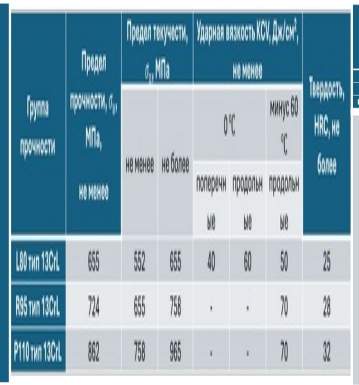
Разница в температуре нагрева под закалку 100oC для сталей типа 13Cr

Требования к химическому составу и механическим свойствам НКТ для сталей типа 13Cr с дополнительным требованием по хладостойкости

Группа прочности	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S	Si	Mo
	не более или в пределах								
L80 тип 13Cr R95 тип 13Cr	0,12 - 0,22	0,25 - 1,00	12,50 - 14,00	2,50	0,25	0,020	0,010	1,00	-
P110 тип 13CrL	0,10	0,25 – 0,60	12,50 - 14,00	2,50 – 4,50	0,25	0,020	0,010	0,50	0,90 – 1,80

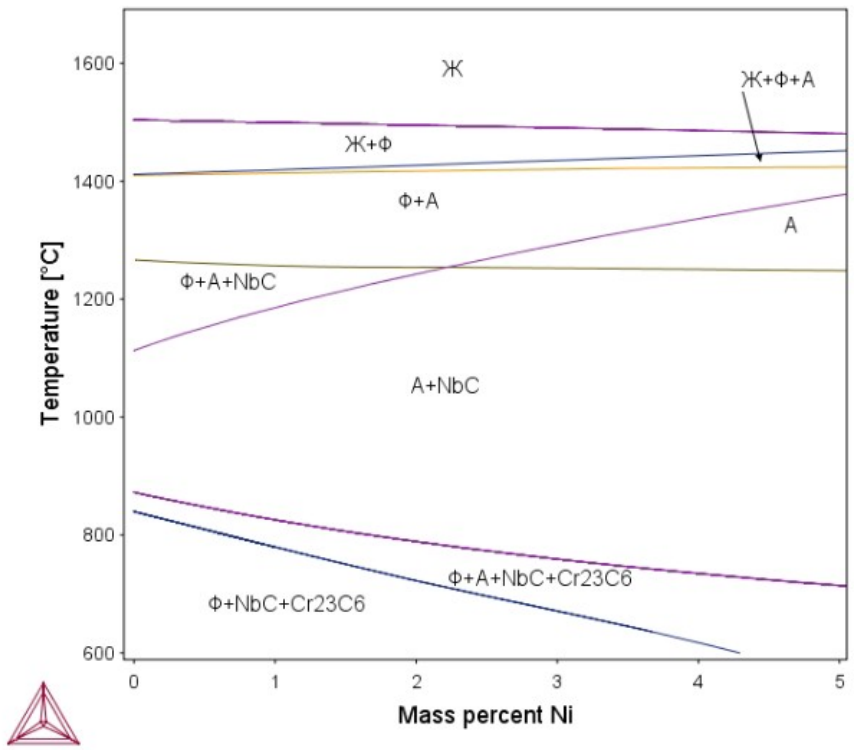
Допускается для получения мелкозернистой структуры микролегирование алюминием, титаном, ниобием, ванадием

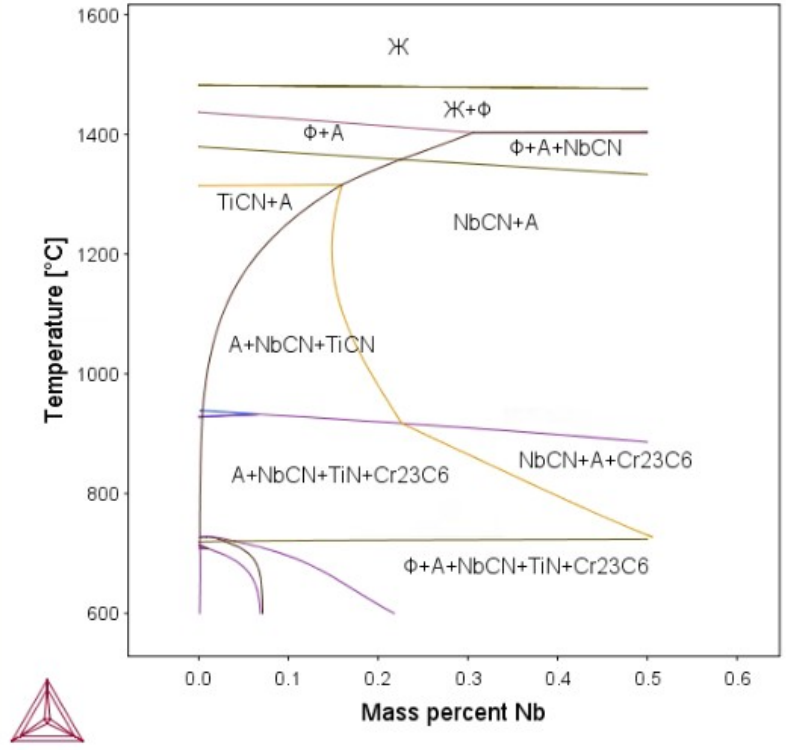
В соответствии с требованиями величина исходного аустенитного зерна должна быть не крупнее 8 номера по ГОСТ 5639



Группа прочности	Предел прочности, $\sigma_в$, МПа, не менее	Предел текучести, $\sigma_т$, МПа		Ударная вязкость KCV, Дж/см², не менее			Твердость, HRC, не более
		не менее	не более	0 °C		минус 60 °C	
				поперечные	продольные	продольные	
L80 тип 13CrL	655	552	655	40	60	50	25
R95 тип 13CrL	724	655	758	-	-	70	28
P110 тип 13CrL	862	758	965	-	-	70	32

Результаты расчетов политермических разрезов сталей типа 13Cr



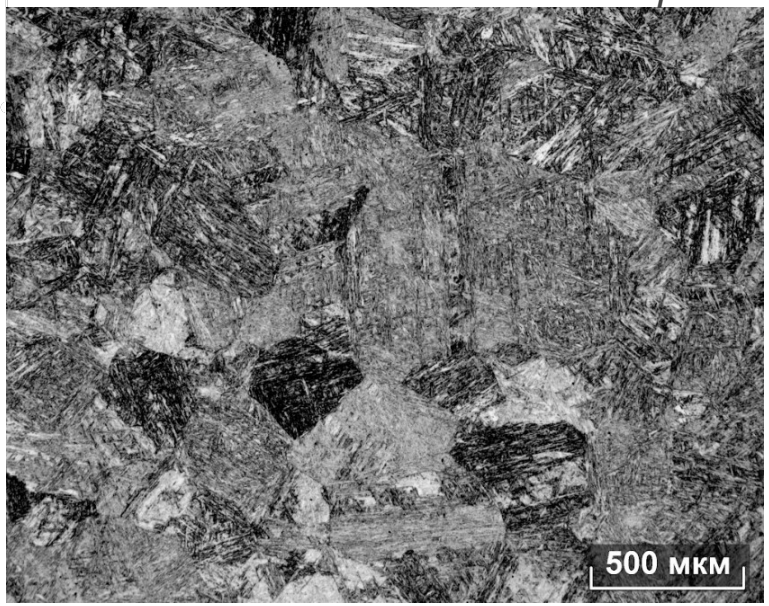


- Повышение содержание никеля значительно увеличивает температуру появления дельта феррита и снижает температуру растворения карбидов хрома
- Ниобий незначительно снижает Т начала выделения дельта феррита и Т растворения карбидов хрома
- При содержании ниобия от 0,1 до 0,15 полное растворение карбидов ниобия при нагреве под прошивку не происходит

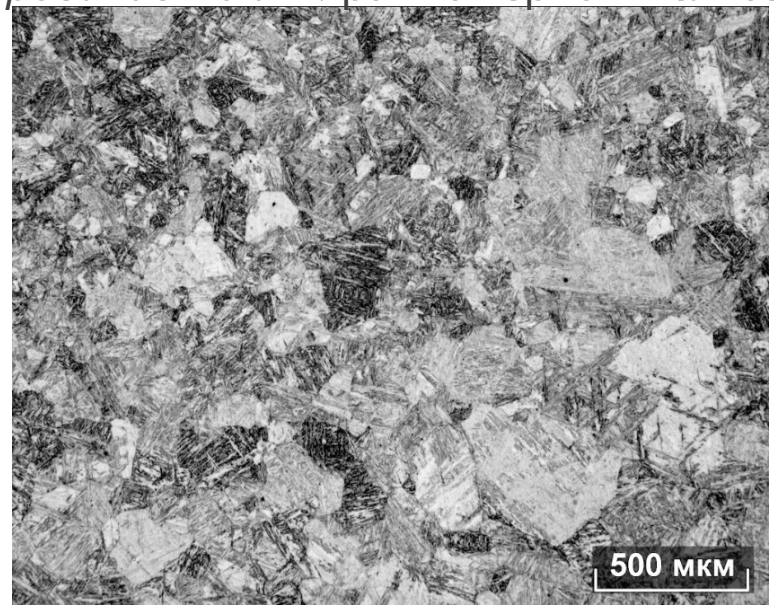
Структура

Нагрев до 1200 °С
выдержка 90 минут

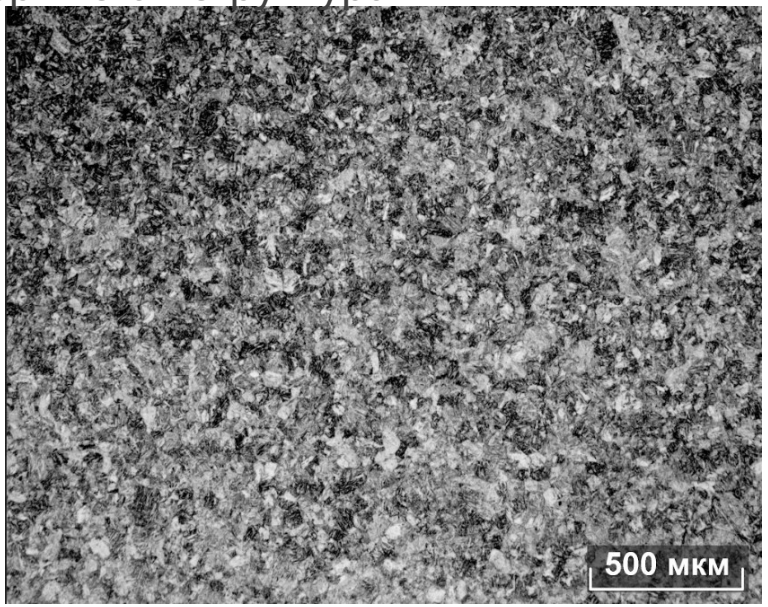
без микролегирования: неравномерная крупнозернистая структура
микролегирование Nb: неравномерная структура с крупными зернами
микролегирование Nb и Ti: равномерная мелкозернистая структура



15Х13Н2



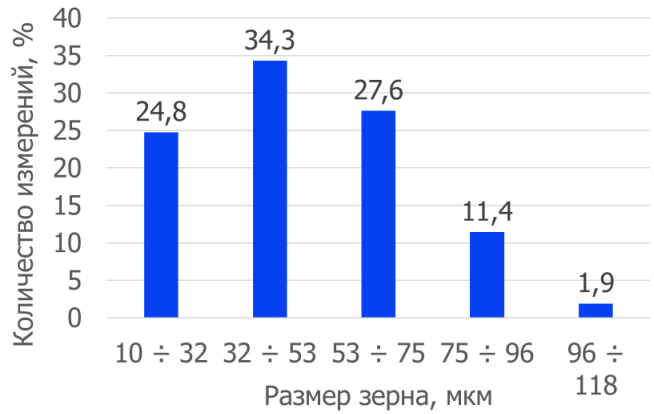
10Х13Н3М1Б

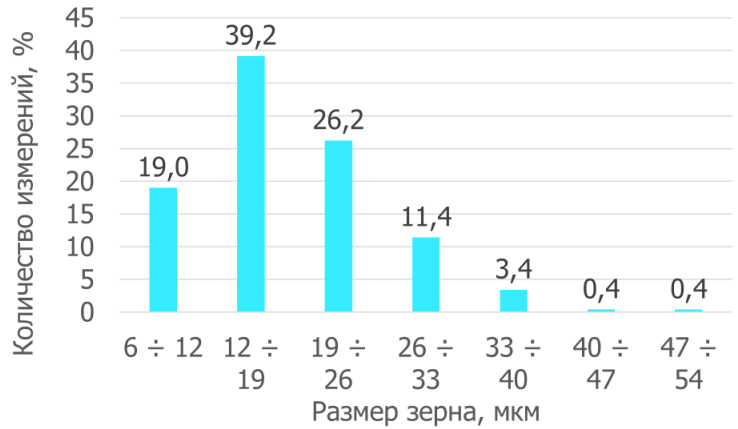


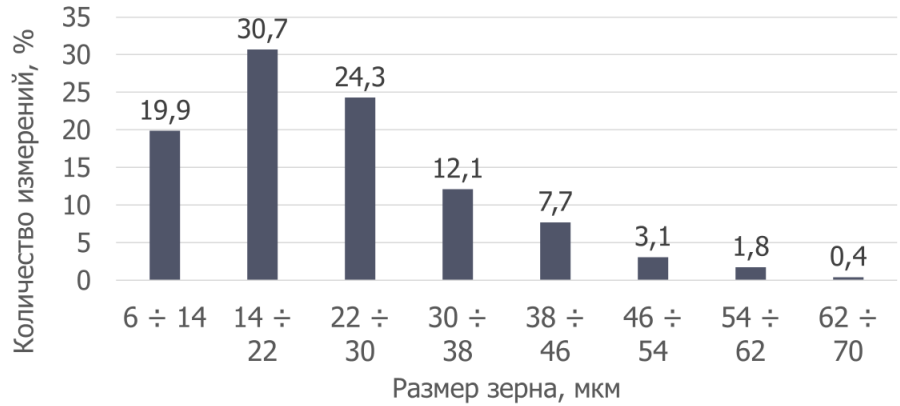
10Х13Н4М1БТ

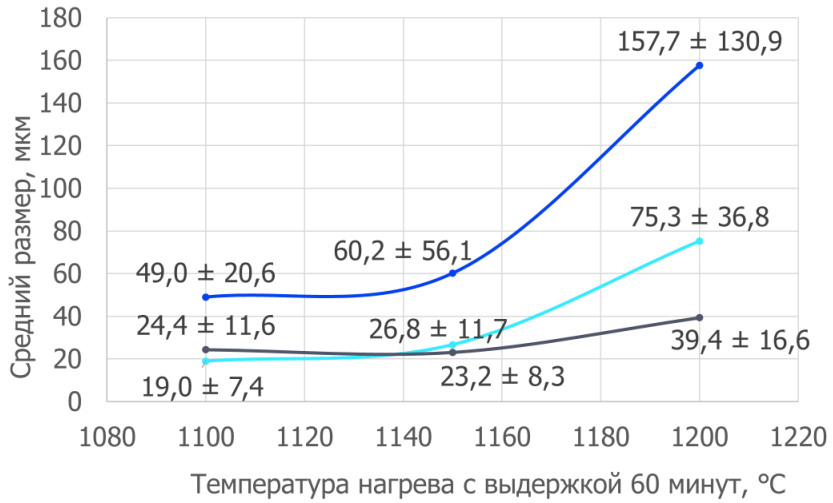
Структура

нагрев до 1100 °С, выдержка 60 минут

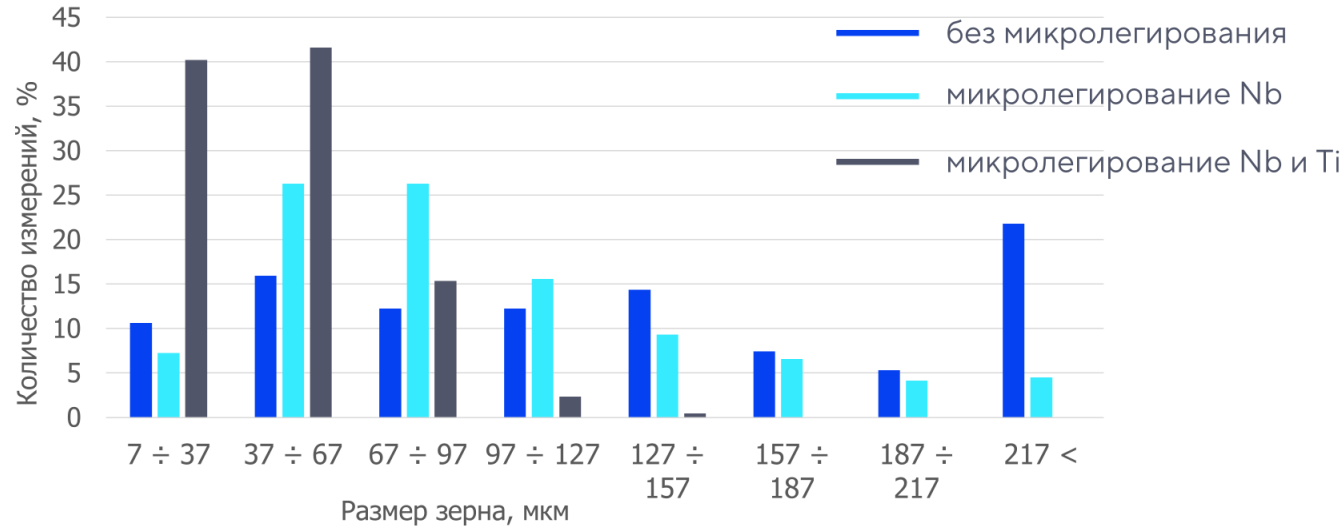




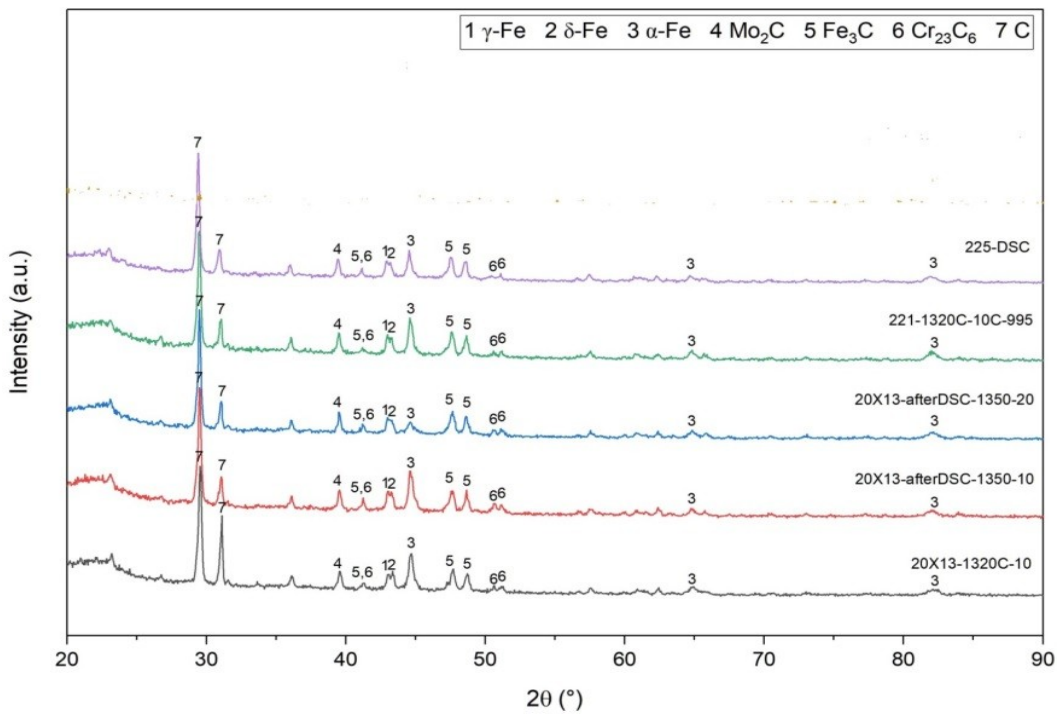


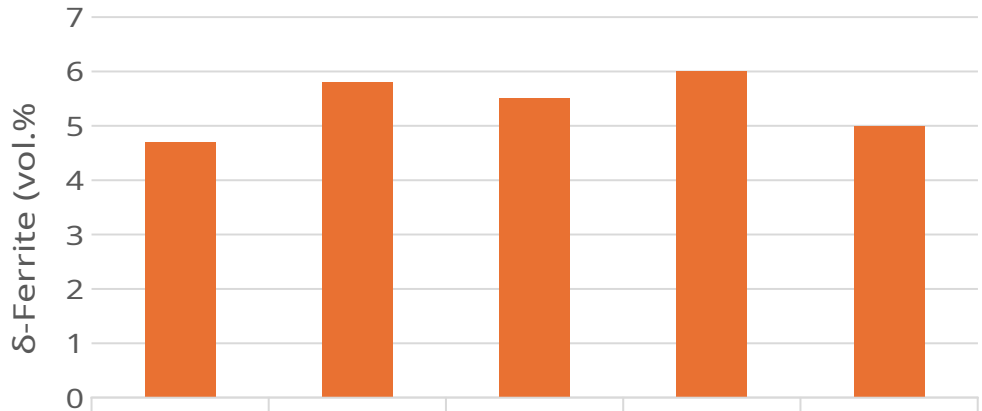


нагрев до 1200 °С, выдержка 90 минут



Анализ содержания дельта фазы после высокотемпературной выдержки





	225	221-1320°C-10°C/min	20X13-1350°C-20°C/min	20X13-1350°C-10°C/min	20X13-1320-10°C/min
δ-Ferrite (vol.%	4,7	5,8	5,5	6	5
STD	± 0.2	± 0.1	± 0.2	± 0.2	± 0.1

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Механические свойства и ударная вязкость разработанных

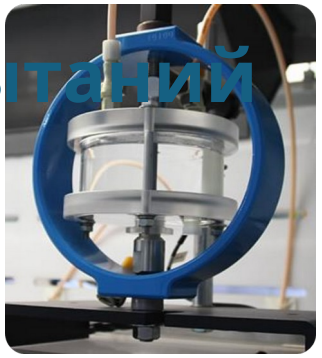
Марка стали		$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	KCV^{-20}, Дж/см^2	KCV^{-60}, Дж/см^2
15Х13Н2	L80	621	774	19	156	103
	P110	826	950	15	85	47
10Х13Н3М1БТ	P110	771	895	21	175	99
10Х13Н3М1Б	R95	697	825	16	162	79

В разработанных с помощью термодинамических расчетах сталях возможно достижение всех требуемых прочностных уровней с хладостойкостью до -60С

Результаты коррозионных испытаний

Условия проведения испытания к SSC
Стандарт NACE TM0177 и ГОСТ 31446

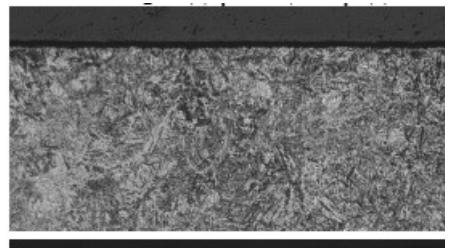
Время испытания: 720 ч
Температура испытания: 22…24 ℃
PH среды: 3,5
Раствор насыщения: 10 кПа H2S
Материал: 15Х13Н2, ТО: 950+760+700
Размеры образцов: 120х15х10 мм



Напряжение испытания, МПа	Процент от минимального σт, МПа	Наличие/ отсутствие дефекта
414	75	Не обнаружено
479	86	Не обнаружено

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

Время испытания: 72 ч
Температура испытания: 60 ℃
Испытательная среда: водный раствор 5% NaCl, насыщенный CO2
Давление: 40 атм.
Материал: 15Х13Н2 , ТО: 950+760+700
Размеры образцов: 25х10х4 мм



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

Скорость коррозии: Vср = 0,01 мм/год

В бесшовных трубах из стали 15Х13Н2 полученных в условиях АО «ОМК»:

- достигнут высокий уровень стойкости к СКРН при невысоком парциальном давлении сероводорода (пороговое напряжение выше 86 % от минимального предела текучести уровня прочности L80)
- скорость общей коррозии при испытании в автоклаве не превышает 0,001

Результаты разработки линейки продуктов

В лабораторных условиях изготовлены образцы из 15 плавок различного химического состава сталей мартенситного класса с 13 % хрома.

CrOMK/10-18

Для стали 15Х13Н2 сначала в лабораторных условиях, а затем и производстве опытной партии труб показано, что возможно достижение группы прочности L80 в хладостойком исполнении.
достигнут высокий уровень стойкости к СКРН при невысоком парциальном давлении сероводорода (пороговое напряжение выше 86 % от минимального предела текучести уровня прочности L80)
скорость общей коррозии при испытании в автоклаве не превышает 0,001 мм/год

Произведена опытно-промышленная партия бесшовных труб размером 168,28х8,96 мм из стали 15Х13Н2 в условиях АО «ОМК».

Среди лабораторных плавок определены химические составы и режимы термической обработки позволяющие получать группы прочности от L80 до P110 с высоким уровнем хладостойкости до -60С.
Ударная вязкость лабораторных образцов сопоставима с показателями низкоуглеродистых сталей линейки продуктов CrOMK/0-1

Спасибо за внимание!

Работа по стали 13Cr 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.