

На правах рукописи

Подузов Денис Павлович

**ПОВЫШЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ
СИСТЕМОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ УТЯЖЕЛЕННЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ**

Специальность: 05.16.09 – Материаловедение (металлургия)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Пермь – 2019

Работа выполнена на кафедре «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Симонов Юрий Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры «Материаловедение и физико-химия материалов»,
Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ),
г. Челябинск
Окишев Константин Юрьевич

кандидат технических наук, доцент,
главный научный сотрудник лаборатории прочностных и
климатических испытаний АО «ЦНИИ «Буревестник»
Воробьев Роман Александрович

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова» («МГТУ им. Г.И. Носова»), г. Магнитогорск

Защита состоится «02» марта 2020 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.06 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 423б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «20» января 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

В.Б. Кульметьева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Требования к современным машинам и механизмам, предполагают необходимость достижения такого комплекса эксплуатационных характеристик, который классические улучшаемые марки сталей не в состоянии обеспечить, либо реализация данного комплекса технически ограничена. Сочетание ряда ключевых характеристик, таких как высокая прочность, надежность, технологичность, коэффициент использования металла и трудоемкость является сложно реализуемой задачей. При этом известно, что высокая прочность необходима для снижения металлоемкости деталей и конструкций, высокая надежность исключает вероятность внезапного хрупкого разрушения, а технологичность, в т.ч. трудоемкость, производительность, коэффициент использования материала, определяет окончательную стоимость изделия.

Известно, что основные свойства конструкционных сталей, такие, как конструкционная прочность и надежность определяются химическим составом и микроструктурой. Например, для традиционных конструкционных среднеуглеродистых сталей, существует проблема низкой устойчивости переохлажденного аустенита. Для достижения требуемой структуры (чаще мартенсита или бейнита или бейнитно-мартенситной смеси) такие стали подвергают закалке в жидкие среды, даже при небольших сечениях. Для получения сбалансированного комплекса прочностных и пластических характеристик, а также ударной вязкости на закаленной стали проводят высокий отпуск. Применение закалочных сред также оказывает влияние на качество продукции. Высокий уровень остаточных напряжений, возникающий при охлаждении в жидких средах, может спровоцировать образование закалочных трещин и повышенное коробление. Кроме того, применение жидких сред при закалке оказывает существенное влияние на экологию и пожарную безопасность производственного объекта. Наибольшему воздействию при закалке в жидкие среды подвергаются изделия сложной конфигурации.

Одним из наиболее тяжелонагруженных и габаритных изделий нефтегазового машиностроения являются бурильные трубы. Бурильные трубы предназначены для создания осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент при строительстве канала скважин. Длина труб достигает 18 м, вес 2000 кг и более. Традиционно в качестве материала для изготовления бурильных труб и переводников используются среднеуглеродистые низко- и среднелегированные стали перлитного и бейнитного классов: 40ХГМА, 40ХН2МА, 40Х2Н2МА, 38ХН3МФА (российский производитель); 42CrMo4V, 34CrNiMo (европейский производитель), AISI4145, AISI4340 (США). Указанные стали имеют ряд особенностей, обуславливающих технологию и себестоимость производства. Основные недостатки сталей данного класса: ограниченная технологичность, низкая прокаливаемость, длительный цикл производства, высокие удельные производственные энергозатраты, низкая экологичность производственного процесса. Так, например, формирование эксплуатационных свойств данного типа сталей происходит при выполнении закалки с температур выше точки $A_{с3}$ и последующем охлаждении в жидких средах - водо-воздушной смеси или при комплексном охлаждении через воду в масло с заданной скоростью охлаждения.

Принципиальное повышение показателей технологичности и надежности бурильных труб возможно обеспечить при разработке и внедрении низкоуглеродистых сталей, обладающих повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита в сравнении с классическими среднеуглеродистыми сталями. Повышенная устойчивость переохлажденного аустенита позволяет проводить закалку стали непосредственно с кузнечного нагрева, без применения жидких закалочных сред, а низкое содержание углерода позволяет формировать в стали требуемую структуру пакетного мартенсита или бейнита, обеспечивающую высокий комплекс прочностных и пластических характеристик, ударной вязкости и надежности.

Высокие требования по обеспечению надежности (ресурс штанг составляет от 5 млн. циклов, ресурс замковых резьб для бурильных труб 400 циклов «свинчивание-развинчивание») Усложнение условий эксплуатации изделий, связанное с современными тенденциями конструирования скважин и климатическими особенностями регионов добычи (усложнение

конструкции скважин и увеличение их глубины, освоение арктических и шельфовых месторождений), ставят задачу повышения надежности бурильных труб в ряд наиболее актуальных проблем современного нефтедобывающего машиностроения.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиями вопросов повышения надежности и технологичности сталей со структурой пакетного мартенсита и бейнита занимались такие ученые как: Курдюмов Г.В., Энтин Р.И. с соавторами, Счастливцев В.М. с соавторами, Симонов Ю.Н. с соавторами, Калетин А. Ю. с соавторами, Клейнер Л.М., Bhadeshia H. K. D. H., Caballero F. G. и др. Исследованию вопросов закалки из МКИТ и формированию структуры пакетного мартенсита посвящены работы таких ученых как Фонштейн Н. М., Швейкин В.П., Голованенко С.А, Маковецкий А.Н., Заяц Л.Ц., Панов Д.О. и др. Однако следует отметить, что полученные результаты исследований имеют некоторые практические ограничения, связанные либо с сечением применяемых заготовок (менее 100 мм), либо с проведением дополнительной термомеханической обработки, либо авторы предлагают использовать дополнительное легирование, например, таким дорогостоящим элементом как никель с массовой долей 1,25 % и более. Разработка и внедрение низкоуглеродистых сталей, системно легированных карбидообразующими элементами и кремнием, позволяет исключить применение никеля, и в то же время обеспечить высокую устойчивость переохлажденного аустенита и необходимый уровень прокаливаемости стали.

Таким образом, разработка и промышленное опробование новых безникелевых, системно легированных, высокотехнологичных сталей для серийного производства современных бурильных труб, несомненно, является актуальной задачей отечественного машиностроения.

Цель работы – разработка, исследование и внедрение безникелевой низкоуглеродистой системнолегированной стали, способной приобретать мартенситную или бейнитно-мартенситную структуру в достаточно больших сечениях при естественном охлаждении на спокойном воздухе, обеспечивающую формирование необходимой структуры и свойств.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. На основе анализа литературных данных определить/выбрать систему легирования, обеспечивающую сочетание требуемой надежности, технологичности, производственной себестоимости.

2. Исследовать влияние режимов термической обработки на превращения, структуру и механические свойства пробных составов низкоуглеродистых безникелевых системно легированных сталей типа 10X3ГЗМФ.

3. Установить закономерности формирования структуры и свойств исследуемой марки стали 12X3Г2МФС при закалке из межкритического интервала температур.

4. Разработать режимы термической обработки из межкритического интервала температур, для обеспечения сочетания высоких показателей прочности и ударной вязкости.

5. Разработать математическую модель и на ее основе построить унифицированные кривые нагрева и охлаждения заготовок бурильных труб из марки стали 12X3Г2МФС.

6. Разработать технологию производства опытной партии образцов безникелевой низкоуглеродистой системнолегированной стали (выплавка, обработка давлением, термическая обработка) и провести промышленное опробование стали для серийного производства утяжеленных бурильных труб. Провести оценку экономической эффективности от внедрения марки стали 12X3Г2МФС.

Научная новизна работы:

1. Экспериментальное подтверждение принципа экономного легирования низкоуглеродистых сталей, обеспечивающего существенное повышение устойчивости переохлажденного аустенита.

2. Разработанные составы низкоуглеродистых системнолегированных безникелевых сталей с высокой устойчивостью переохлажденного аустенита, обеспечивающие требуемый уровень прокаливаемости и конструкционной прочности при термическом упрочнении крупногабаритных изделий путем охлаждения с деформационного нагрева без использования жидких закалочных сред (Патенты РФ №№ 2532628 и 2477333).

3. Установленные закономерности превращений, формирования структуры и изменения характеристик механических свойств стали 12Х3Г2МФС после охлаждения из аустенитной области и из МКИТ, определенные экспериментально критические точки превращений переохлажденного аустенита стали 12Х3Г2МФС при охлаждении из аустенитной области и из МКИТ.

4. Установленные закономерности влияния температуры нагрева в МКИТ на уровень прочности, пластичности, ударной вязкости и твердости стали 12Х3Г2МФС, позволяющие управлять комплексом эксплуатационных характеристик и надежностью изделий сечением до 200 мм и более.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложено использование вновь разработанной (Патент РФ № 2532628) безникелевой низкоуглеродистой системнолегированной стали 12Х3Г2МФС для серийного производства утяжеленных бурильных труб.

2. Установлены технологические возможности марки стали 12Х3Г2МФС. Показана возможность/способность стали упрочняться в процессе охлаждения с деформационного нагрева на спокойном воздухе до твердости 380-400 НВ в сечениях до 280 мм. Определены наиболее эффективные режимы термической обработки, с закалкой из МКИТ, позволяющие обеспечить требуемый комплекс механических характеристик (предел текучести более 690 МПа, предел прочности более 931 МПа, ударную вязкость KCV^{+20} более 600 кДж/м²).

3. В условиях ПАО «Мотовилихинские заводы» освоена и внедрена в производство технология серийного производства утяжеленных бурильных труб из марки стали 12Х3Г2МФС, которая позволила исключить операции предварительной механической обработки и закалки в жидкие среды из технологического процесса производства и получить экономический эффект в размере 18 300 руб. на одно изделие (в ценах 2017 года).

Методология и методы диссертационного исследования:

Методологической основой для диссертации послужили труды ведущих отечественных и зарубежных ученых в области металловедения и термической обработки, в том числе в области разработки низкоуглеродистых сталей мартенситного класса, закалки из межкритического интервала температур, области математического моделирования процессов термической обработки, Государственные стандарты РФ и зарубежные стандарты.

Для достижения поставленной цели и задач в диссертационной работе были использованы следующие методы: фотоэлектрический спектральный анализ, dilatометрический анализ, металлографический анализ, световой и электронный фрактографический анализ, дюрометрический метод, метод испытания на одноосное растяжение и ударную вязкость.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты работы:

1. Закономерности влияния химического состава низкоуглеродистых безникелевых системнолегированных сталей 10Х3Г3МФ, 10Х3Г3МФС, 10Х3Г3МФТ, 12Х3Г2МФС на механические свойства, размер зерна аустенита, устойчивость переохлажденного аустенита.

2. Установленные критические точки и температурные интервалы фазовых превращений переохлажденного аустенита марки 12Х3Г2МФС при закалке с температур полной аустенитизации (920 °С) и из межкритического интервала (860-800 °С) со скоростями охлаждения от 100 до 0,05 °С/с.

3. Научно обоснованные режимы термической обработки заготовок утяжеленных бурильных сбалансированных труб из марки 12Х3Г2МФС, позволяющие обеспечить высокий комплекс эксплуатационных характеристик и надежности изделий при закалке из межкритического интервала температур без использования жидких охлаждающих сред.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении - ИТММ», Пермь 2016г.; Международной конференции «Неделя металлов в Москве», Москва, 2017г.; XXIV Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», Магнитогорск, 2018г., Международной конференции молодых ученых «Научное наследие Д.К. Чернова» Москва, ГНЦ

РФ ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П.Бардина», 2018 г.; научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении - ИТММ», Пермь 2019г.

Степень достоверности результатов диссертации определяется использованием комплекса современных приборов и инструментов, современных пакетов компьютерных программ, а также – воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов, полученных различными методами.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели и задач работы, непосредственном участии в проведении исследований, обработке и анализе результатов, формулировании выводов, написании статей и заявок на патенты.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 работ, в том числе 4 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК, получено 4 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6-ти глав, заключения и списка литературы; изложена на 174 страницах, включает 57 рисунков, 28 таблиц, 3 приложения, список литературы содержит 145 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ преимуществ и недостатков традиционно применяемых материалов, требований и технологий при производстве бурильных труб. Рассмотрены принципы легирования для повышения устойчивости переохлажденного аустенита, влияния углерода на структуру и механические свойства сталей, проведена оценка содержания углерода для перспективных сталей и разработка общих подходов к созданию прогрессивной системы легирования. Рассмотрены закономерности влияния закалки из межкритического интервала температур для повышения надежности изделий. На основе анализа литературных данных определены два варианта перспективных систем легирования, обеспечивающих высокую устойчивость переохлажденного аустенита: первый - системное многокомпонентное легирование карбидообразующими элементами с постепенно увеличивающейся склонностью к карбидообразованию, причем, по мере повышения карбидообразующей способности, их концентрация должна в определенной пропорции уменьшаться (система легирования типа X2Г2МФТ или X3Г3МФ); второй – к первой системе легирования вместо самого сильного карбидообразователя (титана) вводится кремний в количестве 1,0-1,5% (система легирования типа X3Г2МФС).

Во второй главе представлены используемые в работе материалы и методы исследований. В качестве материалов использованы стали марок: 10Х3Г3МФ, 10Х3Г3МФТ, 10Х3Г3МФС и 12Х3Г2МФС (таблица 1). Стали изготовлены на ПАО «Мотовилихинские заводы» г. Пермь.

Технология изготовления сталей 10Х3Г3МФ, 10Х3Г3МФТ и 10Х3Г3МФС: выплавка в индукционной печи (ИСП-160) с разливкой в слитки развесом 40 кг + ковка на кузнечном молоте.

Технология изготовления стали 12Х3Г2МФС: выплавка в дуговой сталеплавильной печи (ДСП-60) + доведение химического состава в агрегате комплексной обработки стали (АКОС) + разливка в блюмы 450х540 мм на установке непрерывной разливки стали (УНРС) + вакуумирование металла (метод VD) + ковка на радиально-ковочной машине (РКМ).

Окончательная заготовка: сталь 10Х3Г3МФ, 10Х3Г3МФТ и 10Х3Г3МФС поковки диаметром 19 мм, сталь 12Х3Г2МФС – поковки диаметром 241-254 мм.

Химический состав полученных сталей контролировали по ГОСТ 18895-97 методом фотоэлектрического спектрального анализа, с использованием спектрометра «Spectro», модель SpectromaxxM. Для калибровки прибора использовали стандартные образцы согласно ГОСТ 8.315-97.

Термическую обработку проводили в лабораторных печах СНО и в промышленной вертикальной шахтной печи, с пределами регулирования температуры ± 5 °С. Температуры нагрева под закалку: от 800 до 1000 °С, отпуск проводили в интервале температур 250 - 640 °С, время выдержки для лабораторных образцов – 1 час при закалке, 2 часа при отпуске.

Структуру сталей после различных режимов термообработки изучали на поперечных микрошлифах, приготовленных на половинках ударных образцов и на торцевых частях дилатометрических образцов. Травитель - 3% раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Структуру изучали с помощью светового инвертированного микроскопа «Meiji Techno Co, LTD» серия IM 7200 и светового микроскопа Olympus GX-51 при увеличениях от 100 до 1000 крат.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Химический состав, % масс.									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti
10X3ГЗМФ	0,10	0,34	2,81	0,020	0,009	2,77	0,16	0,40	0,12	0,002
10X3ГЗМФТ	0,10	0,37	2,70	0,020	0,009	2,78	0,16	0,40	0,12	0,021
10X3ГЗМФС	0,10	1,25	2,51	0,019	0,008	2,75	0,16	0,40	0,12	0,004
12X3Г2МФС	0,12	1,15	1,8	0,016	0,008	2,43	0,26	0,44	0,12	0,005

Макрофрактографические исследования выполняли на световом стереомикроскопе Olympus SZX-16. Для исследований использовали изломы разрушенных ударных образцов тип 19 ГОСТ 9454-78. Обработку результатов проводили при помощи программного пакета Olympus Stream motion, V1.8. При электроннофрактографических исследованиях изучали микромеханизмы разрушения в тех участках излома, где трещина распространялась в условиях плоской деформации (центральная часть изломов). Исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S3400-N при увеличении от 300 до 2000 крат и ускоряющем напряжении 20 кВ.

Оценку характеристик прочности и пластичности выполняли методом испытаний на одноосное растяжение по ГОСТ 1497-84. Использовали образцы тип III №4, с диаметром рабочей части 10 мм (d_0) и пятикратной длиной ($l_0 = 5 d_0$). Испытания проводили на разрывной машине Inspekt 250, мод. EDC2/900W, усилием 250кН., оснащенной системой автоматической записи диаграммы растяжения с определением параметров предела прочности и предела текучести.

Испытания для определения ударной вязкости проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78, на маятниковом копре мод. 2130KM-0,3, с энергией 300 Дж. Для испытаний использовали образцы с видом концентратора U (тип 1), V (тип 11) и T (тип 19). Для выращивания трещины использовали вибратор Дроздовского. Значения характеристик механических свойств рассчитывали как среднее арифметическое из результатов испытаний 3-4 образцов.

Дилатометрические исследования проводили на дилатометре «Linseiss RITA L78». Изменение линейных размеров образца определяли с помощью индукционного датчика продольного перемещения Schaevitz HR100MC. Для исследований применяли образцы длиной 10^{+1} мм, диаметром $3,5 \pm 0,1$ мм, с параллельностью сторон 0,03. Изменение температуры образцов фиксировали с помощью откалиброванной термопары K-типа (Ni-NiCr), которую приваривали к поверхности образца в его средней части.

В третьей главе на основании разработанных принципов легирования выплавлены опытные марки системнолегированных низкоуглеродистых безникелевых сталей 10X3ГЗМФ, 10X3ГЗМФТ и 10X3ГЗМФС. Приоритет разработанных составов подтвержден патентом РФ № 2477333. Исследованы превращения, структура и свойства указанных марок сталей. Построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. Показано, что все три стали обладают высокой устойчивостью переохлажденного аустенита: при охлаждении со скоростями до 0,3 °C/с включительно фиксируется только мартенситное превращение ($M_n \approx 390$ °C); бейнитное превращение фиксируется только при охлаждении со скоростью 0,05 °C/с, что приблизительно соответствует охлаждению на воздухе заготовки диаметром до 100 мм.

Показано, что в исходном, – горячекованом, состоянии (охлаждение послековки – на спокойном воздухе) все стали, при высоком уровне прочности ($\sigma_{0,2} \approx 1000$ МПа, $\sigma_B \approx 1300$ МПа) и пластичности ($\delta \approx 16$ % $\Psi \approx 60$ %), обладают вполне удовлетворительной ударной вязкостью, $KCU^{+20} \approx 1000$ кДж/м², $KCT^{+20} \approx 250$ кДж/м², $KCV^{+20} \approx 590-600$ кДж/м². Наиболее высокий предел прочности на растяжение - 1319 МПа наблюдается у стали 10X3ГЗМФС, что можно объяснить влиянием кремния, который существенно упрочняет феррит за счет искажений кристаллической решетки. Наиболее высокий условный предел текучести наблюдается у стали 10X3ГЗМФТ, это связано с тем, что карбиды титана повышают сопротивление малым пластическим деформациям.

Таким образом, уровень характеристик механических свойств для сталей 10Х3Г3МФ, 10Х3Г3МФТ и 10Х3Г3МФС в исходном – горячекованом, состоянии практически полностью соответствует требованиям, предъявляемым к бурильным трубам ($\sigma_{0,2} \geq 689$ МПа, $\sigma_B \geq 931$ МПа, $\delta \geq 13\%$, $KCV^{+20} \geq 600$ кДж/м²).

Исследована зависимость механических свойств сталей 10Х3Г3МФ, 10Х3Г3МФТ, 10Х3Г3МФС от температуры аустенитизации при 930, 1050 и 1150 °С. Показано, что последующая термическая обработка значительно снижает ударную вязкость у всех трех исследуемых сталей, что может быть связано с выделением неметаллических фаз по межзеренным границам, негативно влияющих на сопротивление хрупкому разрушению. Прочность и пластичность, при повышении температуры аустенитизации, изменяются незначительно, оставаясь на вполне удовлетворительном уровне. Так, при 930/1050/1150 °С для стали 10Х3Г3МФ: $\sigma_{0,2} = 901/874/912$ МПа, $\sigma_B = 1229/1192/1218$ МПа, $\delta = 16,8/14,2/13,7$ %, $\Psi = 64,5/57,7/58,7$ %, $KCV^{+20} = 300/370/310$ кДж/м²; для стали 10Х3Г3МФТ: $\sigma_{0,2} = 896/895/878$ МПа, $\sigma_B = 1206/1206/1204$ МПа, $\delta = 16,9/17,3/17,6$ %, $\Psi = 63,2/64,2/65,5$ %, $KCV^{+20} = 230/480/330$ кДж/м²; для стали 10Х3Г3МФС: $\sigma_{0,2} = 917/911/907$ МПа, $\sigma_B = 1286/1275/1266$ МПа, $\delta = 17,4/17,1/15,4$ %, $\Psi = 58,2/56,7/54,2$ %, $KCV^{+20} = 350/380/190$ кДж/м².

Исследовано влияние температуры нагрева под закалку на размер зерна аустенита. Показано, что до 930 °С размер зерна для всех сталей практически идентичен и соответствует 11-12 мкм. При температуре 1100 °С размер зерна аустенита составляет 43 мкм для стали 10Х3Г3МФ, 17 мкм для 10Х3Г3МФТ и 26 мкм для 10Х3Г3МФС, а при 1200 °С – 235 мкм, 27 мкм и 90 мкм соответственно. Таким образом, установлено, что максимальной склонностью к росту зерна аустенита при нагреве обладает сталь 10Х3Г3МФ, минимальной – сталь 10Х3Г3МФТ, а в стали 10Х3Г3МФС зерно растет быстрее, чем в 10Х3Г3МФТ, но значительно медленнее, чем в 10Х3Г3МФ. Активный рост зерна для стали 10Х3Г3МФ наблюдается при нагреве выше 1100 °С, для стали 10Х3Г3МФС при нагреве выше 1150 °С, а для стали 10Х3Г3МФТ активного роста зерна не наблюдается и при нагреве до 1200 °С.

Установлено, что механические свойства всех трех исследуемых сталей, вне зависимости от скорости охлаждения, находятся примерно на одном уровне с небольшой тенденцией к повышению прочности при уменьшении скорости охлаждения (таблица 2). Ударная вязкость имеет обратную тенденцию и снижается при уменьшении скорости охлаждения.

Таблица 2. Зависимость механических свойств исследуемых сталей от скорости охлаждения

Скорость охлаждения, °C /с																	
1,5 °C/с						0,31 °C /с						0,054 °C /с					
Характеристики механических свойств																	
σ _{0,2} , МПа	σ _В , МПа	δ, %	Ψ, %	KCV ⁺²⁰	KCT ⁺²⁰	σ _{0,2} , МПа	σ _В , МПа	δ, %	Ψ, %	KCV ⁺²⁰	KCT ⁺²⁰	σ _{0,2} , МПа	σ _В , МПа	δ, %	Ψ, %	KCV ⁺²⁰	KCT ⁺²⁰
				кДж/м ²						кДж/м ²						кДж/м ²	
10Х3Г3МФ																	
901 ±10	1229 ±14	16,8 ±0,6	64,5 ±2,5	300 ±20	130 ±15	902 ±8	1235 ±10	16,6 ±1,4	62,5 ±1,6	290 ±10	80 ±5	889 ±10	1250 ±8	17,0 ±0,5	60,0 ±0,8	250 ±15	70 ±10
10Х3Г3МФТ																	
896 ±8	1206 ±10	16,9 ±1,2	63,2 ±1,3	230 ±15	100 ±10	908 ±6	1232 ±8	16,9 ±0,6	59,2 ±1,0	280 ±20	100 ±15	897 ±5	1233 ±10	15,3 ±0,6	60,7 ±0,5	160 ±10	90 ±5
10Х3Г3МФС																	
917 ±5	1286 ±12	17,4 ±0,6	58,0 ±2,0	350 ±15	70 ±5	920 ±11	1291 ±14	16,5 ±2,5	58,5 ±1,5	330 ±5	130 ±10	906 ±8	1308 ±5	16,0 ±0,2	56,2 ±1,6	340 ±10	90 ±5

Экспериментально установлено, что при отпуске вплоть до температуры 350 °С микроструктура, прочность, пластичность исследуемых сталей изменяется незначительно

(рисунок 1, а-в). Условный предел текучести и предел прочности имеют экстремумы при температурах отпуска 350 и 500 °С соответственно. Ударная вязкость сталей с повышением температуры отпуска снижается, при этом для сталей легированных титаном и кремнием наблюдаются локальные области ее повышения при отпуске 200 °С (рисунок 1, б-в).

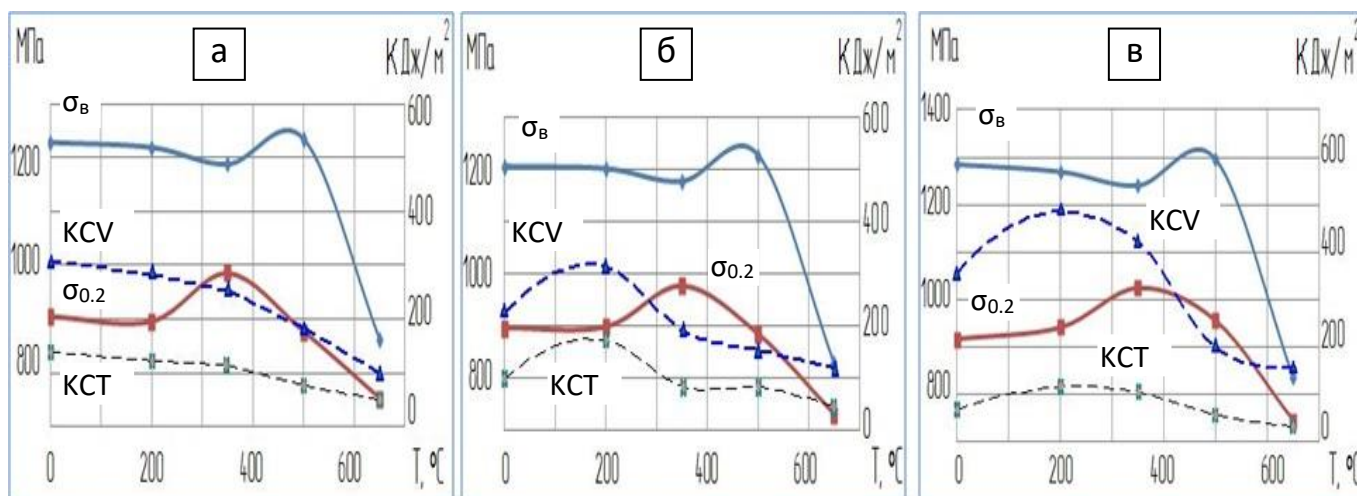


Рисунок 1. Зависимость механических свойств марок сталей 10X3Г3МФ (а), 10X3Г3МФТ (б), 10X3Г3МФС (в) от температуры отпуска. Экспериментальный разброс данных укладывается в высотный габарит точек

Глава 4. Разработана и выплавлена сталь 12X3Г2МФС, в которой было снижено содержание марганца примерно на 0,8-1,0% и содержание хрома на 0,3-0,5% относительно марок сталей с системой легирования X3Г3МФ, исследованных в главе 3. Приоритет разработки данной стали подтвержден патентом РФ (Патент РФ 2532628).

Проведены комплексные - дилатометрические, металлографические, и микродюрметрические исследования превращений переохлажденного аустенита стали 12X3Г2МФС при полной аустенитизации (920 °С) и из межкритического интервала температур (860, 830, 800 °С) в интервале скоростей охлаждения от 100 до 0,05 °С/с, позволившие построить термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита данной стали (рисунок 2).

Исследовано влияние температуры нагрева на рост аустенитного зерна стали 12X3Г2МФС. Установлено, что интенсивный рост зерна аустенита наблюдается только при нагреве на температуры выше 1100 °С, при этом зерно в стали 12X3Г2МФС растет быстрее, чем в стали 10X3Г3МФ, но медленнее, чем в стали 10X3Г3МФС и при нагреве на 1200 °С в течение 40 минут размер зерна аустенита в стали 12X3Г2МФС составляет примерно 135 мкм.

Показано, что для температур нагрева 920 и 860 °С, при скоростях охлаждения от 100 до 1,5 °С/с, наблюдается только мартенситное превращение. При меньших скоростях охлаждения мартенситному превращению предшествует бейнитное, а при скоростях менее 0,3 °С/с наблюдается выделение избыточного феррита. Установлено, что при температурах 830 и 800 °С при всех скоростях охлаждения сдвиговое бездиффузионное превращение предваряется промежуточным, а при скоростях от 1,5 °С/с и менее – нормальным превращением.

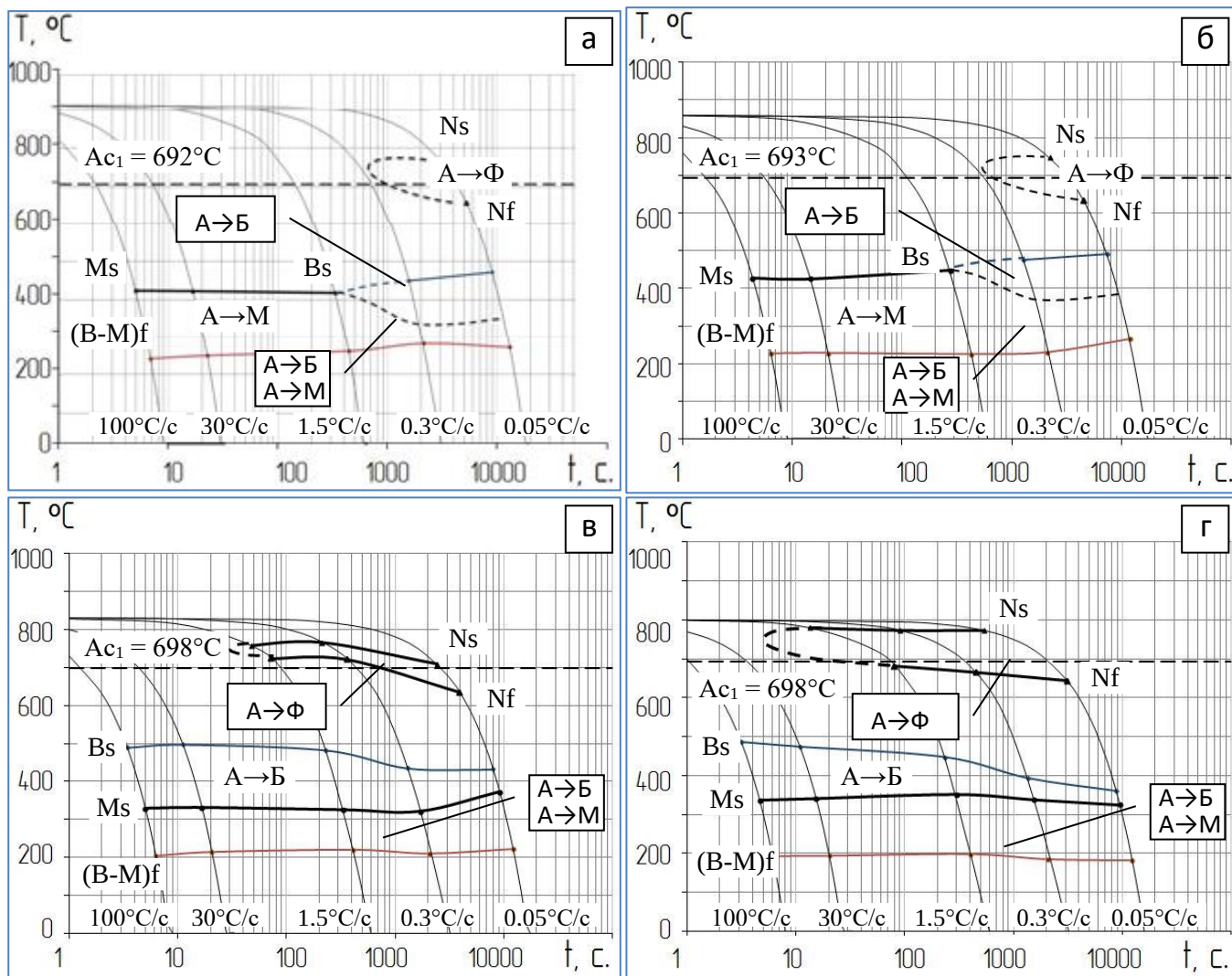


Рисунок 2. Термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита стали 12Х3Г2МФС, при нагреве на 920(а), 860(б), 830(в) и 800 °С (г)

Проведены исследования влияния температур нагрева (от 920 до 800 °С) на микроструктуру стали 12Х3Г2МФС в широком интервале скоростей охлаждения – от 100 до 0,05 °С/с (рисунок 3).

Показано, что при температурах 920 и 860 °С, сталь 12Х3Г2МФС обладает повышенной устойчивостью аустенита, обеспечивая получение структуры пакетного мартенсита при скоростях охлаждения до 1,5 °С/с включительно (рисунок 3, а; 3, д), при скоростях от 1,5 °С/с и менее наблюдается предварительное формирование структуры верхнего бейнита (рисунок 3, б-г, е-з), а также выделение избыточного феррита при скоростях охлаждения менее 0,3 °С/с (рисунок 3, в-г, ж-з). Доля исходной альфа фазы при полной аустенитизации и для верхней области МКИТ незначительна. При замедленных скоростях охлаждения доминирующими структурными составляющими являются избыточный феррит и верхний бейнит (рисунок 3, г, з).

Установлено, что при охлаждении с температур 830 и 800 °С, при всех скоростях охлаждения микроструктура представляет собой бейнитно-мартенситную смесь с наличием исходной высокоотпущенной альфа-фазы (рисунок 3, и-р), а при скорости 1,5 °С/с и менее, дополнительно наблюдается выделение избыточной α -фазы (рисунок 3, к-м, о-р). При снижении скорости охлаждения доля избыточной α -фазы, расположенной вдоль границ аустенитных зерен, увеличивается, а при снижении температуры нагрева в МКИТ увеличивается количество исходной альфа-фазы.

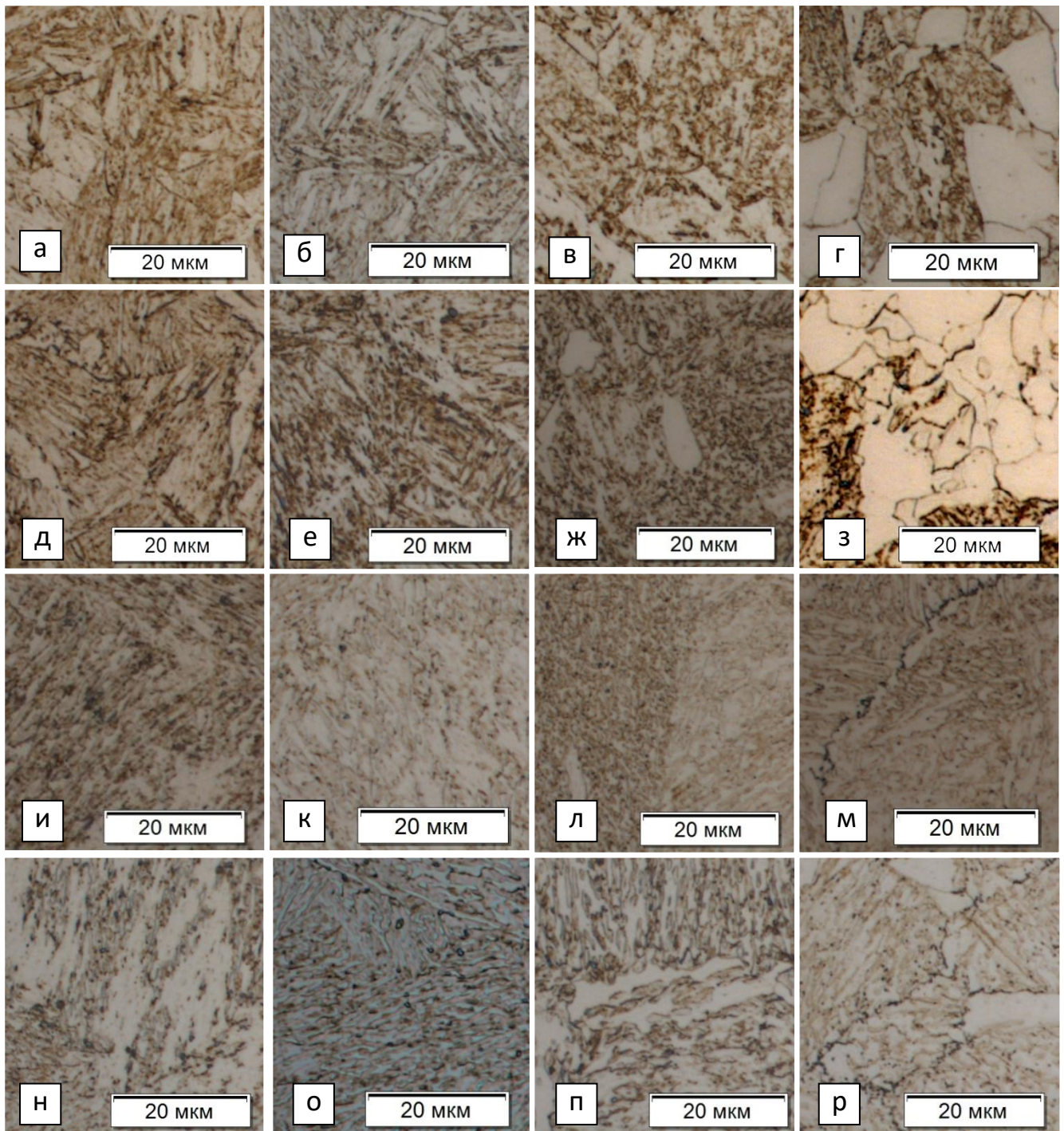


Рисунок 3. Микроструктура марки стали 12Х3Г2МФС, после охлаждения: с 920 °С со скоростью 100 °С/с (а), 1,5 °С/с (б), 0,3 °С/с (в), 0,05 °С/с (г); с 860 °С со скоростью 100 °С/с (д), 1,5 °С/с (е), 0,3 °С/с (ж), 0,05 °С/с (з); с 830 °С со скоростью 100 °С/с (и), 1,5 °С/с (к), 0,3 °С/с (л), 0,05 °С/с (м); с 800 °С со скоростью 100 °С/с (н), 1,5 °С/с (о), 0,3 °С/с (п), 0,05 °С/с (р). Увеличение 1000 крат

Доля верхнего бейнита и исходной высокоотпущенной альфа-фазы возрастает для 800 °С, по сравнению с нагревом на 830 °С. При скорости 0,05 °С/с наблюдается образование полиэдров избыточного феррита размерами около 20 мкм и непрерывных цепочек карбидных выделений по границам зерен бывшего аустенита (рисунок 3, р).

Проведено исследование влияния температур закалки на механические свойства стали 12Х3Г2МФС (таблица 3). Установлено, что наиболее сбалансированный комплекс механических характеристик (прочность, пластичность и ударная вязкость) получен при режимах обработки лабораторных образцов при температуре 800 °С. Повышение значений ударной вязкости с 325 до

735 кДж/м² связано с образованием однородной смеси структур бейнита и исходной α -фазы, а также выделением избыточного феррита по границам бывших зерен аустенита, что позволяет значительно повысить надежность материала. Длительность выдержки образцов при нагреве под закалку составляла 1 час.

Таблица 3. Зависимость механических свойств стали 12Х3Г2МФС от температуры заковки

Режим термической обработки	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCV ⁺²⁰ , кДж/м ²
Требуемый уровень мех. свойств	не менее 689	не менее 931	не менее 13	-	не менее 600
1. Закалка 920 °С, охлаждение - воздух	880±12	1250±15	15,0±1,0	65,0±2,0	325±20
2. Закалка 860 °С, охлаждение - воздух	845±8	1215±10	15,5±0,5	63,5±0,5	440±10
3. Закалка 830 °С, охлаждение - воздух	835±5	1200±14	15,5±0,5	61,0±1,0	630±25
4. Закалка 800 °С, охлаждение - воздух	745±10	1125±8	16,5±0,6	61,0±1,0	735±15

В главе 5 проведено построение моделей нагрева и охлаждения поковок бурильных труб из марки стали 12Х3Г2МФС с использованием средств программного продукта ANSYS.

Осуществлена разработка математической модели технологического процесса нагрева поковки диаметром 400 мм. Определены основные параметры нагрева. Установлено, что наибольший градиент температур поверхности и сердцевины, для условий равномерного нагрева (нагреваемая заготовка с температурой 20 °С помещается в замкнутую систему с температурой 800 °С), возникает в начальный период, при этом полное время прогрева поковки по сечению составляет 300 мин (рисунок 4).

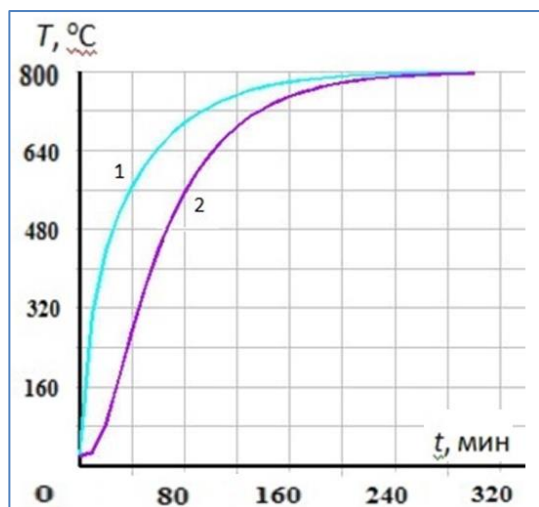


Рисунок 4. Изменение температуры в процессе нагрева: на поверхности (1) и в центре поковки (2)

Построена картина распределения температуры в центральном сечении поковки для трех моментов времени от начала процесса нагрева 100, 200 и 300 мин (рисунок 5).

Осуществлена разработка математической модели технологического процесса охлаждения на воздухе цилиндрических поковок различных типоразмеров. Построены унифицированные кривые охлаждения для поковок диаметрами 50, 80, 100, 200 и 400 мм на спокойном воздухе (рисунок 6).

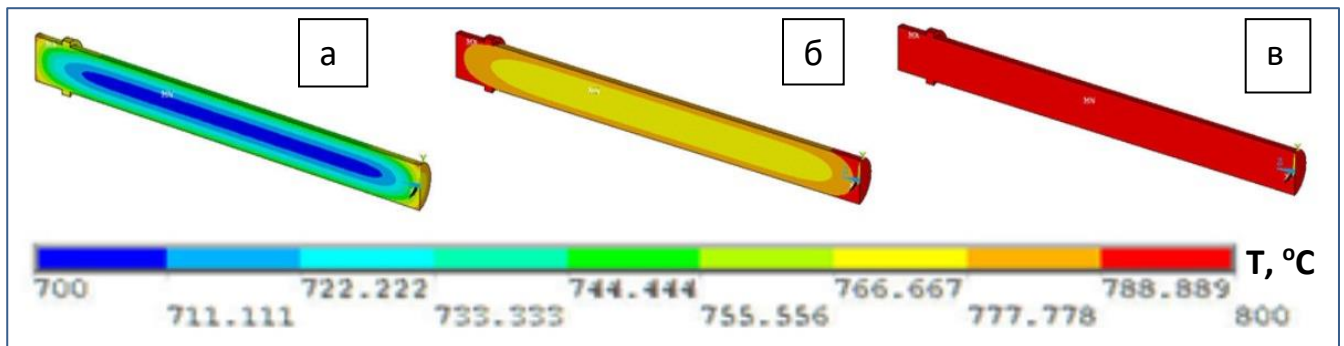


Рисунок 5. Поле температуры в центральном сечении поковки в моменты времени от начала нагрева: 100 мин (а), 200 мин (б), 300 мин (в)

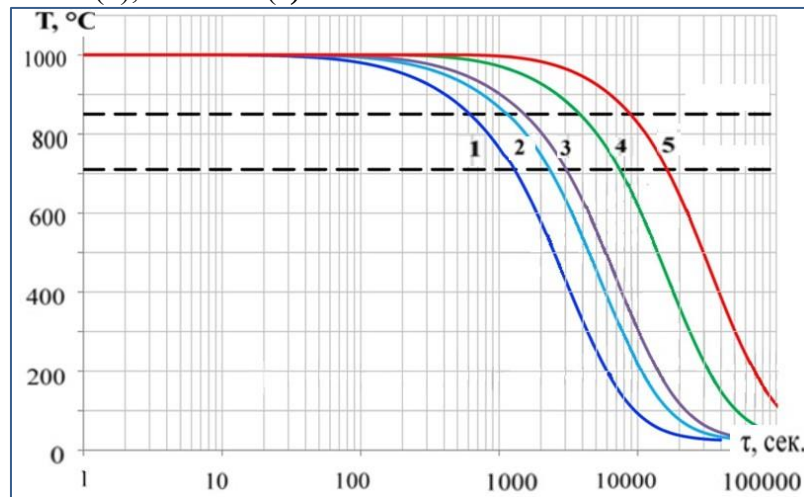


Рисунок 6. Унифицированные кривые охлаждения на воздухе для поковок с диаметрами 50 (1), 80 (2), 100 (3), 200 (4) и 400 (5) мм

Проведено совмещение термокинетических диаграмм превращения переохлажденного аустенита исследуемой стали 12Х3Г2МФС и полученных унифицированных кривых охлаждения для определения основных структурных составляющих для поковок диаметрами от 50 до 400 мм при охлаждении на спокойном воздухе (рисунок 7).

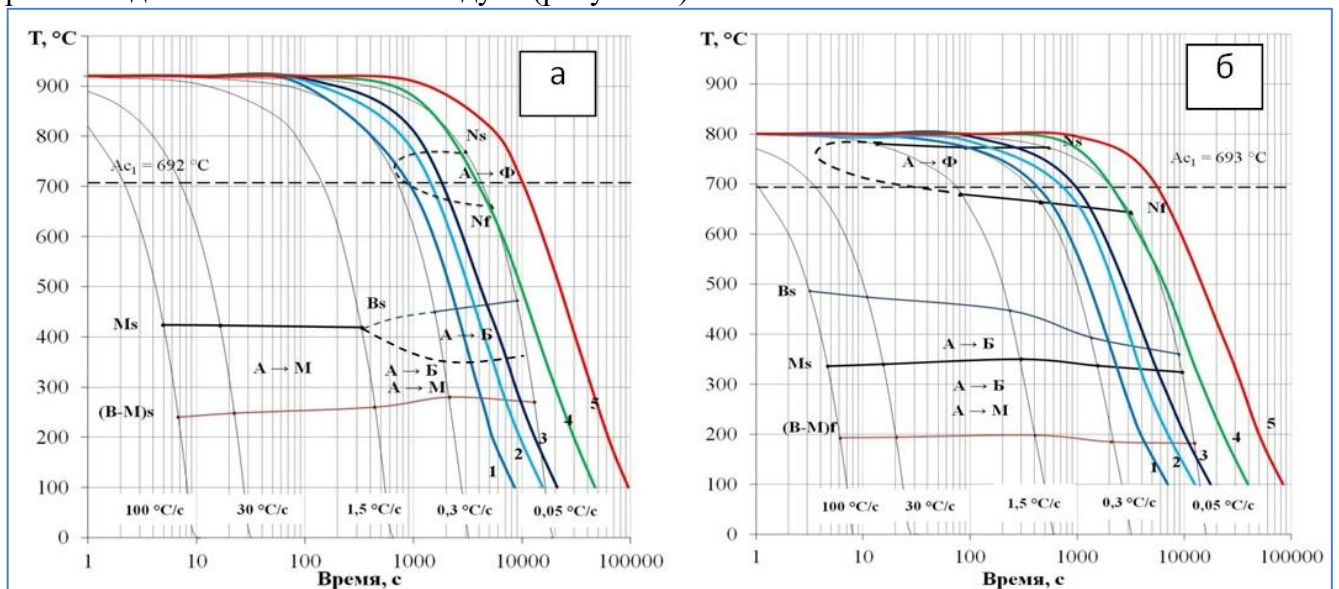


Рисунок 7. Унифицированные кривые охлаждения на воздухе для поковок с диаметрами 50 (1), 80 (2), 100 (3), 200 (4) и 400 (5) мм, наложенные на термокинетическую диаграмму превращений переохлажденного аустенита для стали 12Х3Г2МФС, при температуре аустенитизации 920 °C (а) и 800 °C (б)

Дополнительно в главе 5 выполнена верификация разработанных математических моделей, с применением альтернативных источников. Максимальная полученная погрешность методик составила 3%.

В главе 6 представлены результаты внедрения в серийное производство технологии изготовления бурильных труб из низкоуглеродистой безникелевой системно-легированной стали марки 12Х3Г2МФС.

Изготовлена опытная партия бурильных труб УБТС-229 из марки 12Х3Г2МФС. Показана технологичность новой марки стали: из технологического процесса исключены операции предварительной механической обработки и закалки в жидкие среды.

На опытной партии УБТС-229 из марки 12Х3Г2МФС получен комплекс механических характеристик и поверхностной твердости, в полной мере соответствующий требованиям конструкторско-технологической документации (таблица 4).

Таблица 4. Механические свойства приемочной партии заготовок после термической обработки в шахтных печах

Номер трубы	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	KCV ⁺²⁰ , кДж/м ²	Твердость, НВ
Требуемый уровень мех. свойств	не менее 689	не менее 931	не менее 13	-	не менее 600	302-364
№2	840±10	940±8	20±0,5	50±1,0	961±44	302
№4	840±12	940±5	20±1,0	48±1,0	836±20	302

Проведены периодические испытания УБТС-229 из марки 12Х3Г2МФС с полным ресурсным испытанием на 400 циклов «Свинчивание-развинчивание». Получено положительное заключение о результатах периодических испытаний при использовании горячего фосфатирования.

Определен экономический эффект от внедрения технологии производства УБТС-229 из марки 12Х3Г2МФС, составляющий – 18 300 руб. на изделие.

По результатам работ получен Акт внедрения технологического процесса изготовления УБТС-229 из стали марки 12Х3Г2МФС (15Х3Г3МФС) ТУ 0893-270-07500243-2012 плавка № М5-1304 в серийное производство (Акт приемочных испытаний от 26.02.2014).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально подтвержден принцип экономного легирования низкоуглеродистых сталей, обеспечивающий существенное повышение устойчивости переохлажденного аустенита, заключающийся в легировании сталей непрерывным рядом карбидообразующих элементов с постепенно увеличивающейся карбидообразующей способностью и с соответствующим уменьшением их содержания, а также - с дополнительным введением кремния в количестве 1,0-1,5%. С использованием данного принципа разработаны составы низкоуглеродистых безникелевых сталей с высокой устойчивостью переохлажденного аустенита: 10Х3Г3МФ, 10Х3Г3МФТ и 10Х3Г3МФС.

2. Исследованы превращения, структура и свойства специально выплавленных сталей 10Х3Г3МФ, 10Х3Г3МФТ и 10Х3Г3МФС. Показано, что все три стали обладают высокой устойчивостью переохлажденного аустенита: при охлаждении со скоростями до 0,3 °С/с включительно фиксируется только мартенситное превращение ($M_n \approx 390$ °С); бейнитное превращение фиксируется только при охлаждении со скоростью 0,05 °С/с, что приблизительно соответствует охлаждению на воздухе заготовки диаметром 100 мм. Установлено, что в исходном, – горячекованом, состоянии все стали, при высоком уровне прочности ($\sigma_{0.2} \approx 1000$ МПа, $\sigma_B \approx 1300$ МПа), обладают вполне удовлетворительной ударной вязкостью $KCV^{+20} \approx 590-600$ кДж/м². Этот уровень характеристик механических свойств практически полностью соответствует требованиям, предъявляемым к бурильным трубам по ТУ 3 РГ 200-2003 ($KCV^{+20} \geq 600$ кДж/м²).

3. Проведены исследования превращений переохлажденного аустенита стали 12Х3Г2МФС при полной аустенитизации (920 °С) и из межкритического интервала температур (от 860 до 800 °С) в интервале скоростей охлаждения от 100 до 0,05 °С/с. Установлено, что для температур нагрева 920 и 860 °С, при скоростях охлаждения от 100 до 1,5 °С/с, наблюдается только мартенситное превращение. При меньших скоростях охлаждения мартенситному превращению предшествует бейнитное, а при скоростях менее 0,3 °С/с наблюдается выделение избыточной, - ферритной, фазы. При температурах 830 и 800 °С при всех скоростях охлаждения сдвиговое бездиффузионное превращение предваряется промежуточным, а при скоростях от 1,5 °С/с и менее – нормальным превращением.

4. Экспериментально установлено, что наиболее высокий уровень прочностных характеристик стали 12Х3Г2МФС ($\sigma_{0.2} = 880$ и $\sigma_B = 1250$ МПа) достигается при закалке с температуры полной аустенитизации - 920 °С, при этом значения ударной вязкости минимальны ($KCV^{+20} = 325$ кДж/м²). По мере последовательного снижения температуры закалки в области МКИТ (860-800 °С), наблюдается контролируемое снижение прочностных характеристик с одновременным повышением ударной вязкости, с максимумом при 800 °С ($\sigma_{0.2} = 750$ МПа, $\sigma_B = 1125$ МПа, $KCV^{+20} = 735$ кДж/м²).

5. Разработаны и адаптированы математические модели нагрева-охлаждения цилиндрических заготовок различных типоразмеров. Построены унифицированные кривые охлаждения для поковок диаметрами от 50 до 400 мм на спокойном воздухе. Разработан метод оценки структурных составляющих для заготовок диаметром до 400 мм (совмещение унифицированных кривых и термокинетических диаграмм).

6. Показано, что одновременное повышение показателей технологичности и надежности утяжеленных бурильных сбалансированных труб возможно обеспечить при внедрении безникелевых низкоуглеродистых сталей, обладающих повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита. На основании проведенных исследований разработана и внедрена в серийное производство технология производства бурильных труб из стали марки 12Х3Г2МФС (15Х3Г3МФС) ТУ 0893-270-07500243-2012 плавка № М5-1304 (Акт приемочных испытаний от 26.02.2014). Исключены операции предварительной механической обработки и закалки в жидкие среды. Экономический эффект от внедрения технологии производства УБТС-229 из марки 12Х3Г2МФС, составил – 18 300 руб. на изделие (производственная себестоимость) в ценах 2017 года.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ:

1. Симонов, Ю. Н. Превращения, структура и свойства системно-легированных низкоуглеродистых безникелевых сталей / Ю. Н. Симонов, М. Ю. Симонов, Д. П. Подузов, А. В. Смирнов, И. А. Галимова // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 11 (689). С. 4-11.

Simonov, Yu. N. Transformations, structure and properties of system-alloyed low-carbon nickel-free steels / Yu. N. Simonov, M. Yu. Simonov, I. A. Galimova, D. P. Poduzov, A. V. Smirnov // Metal Science and Heat Treatment. 2013. Т. 54. № 11-12. С. 558-564.

2. Подузов, Д. П. Исследование превращений, структуры и свойств системно-легированной низкоуглеродистой стали 12Х3Г2МФС промышленной выплавки / Д. П. Подузов, М. Ю. Симонов, А. Н. Юрченко, Ю. Н. Симонов, А. Д. Бухалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19. № 4. С. 41-60.

3. Подузов, Д. П. Разработка и внедрение системно-легированной НМС стали 12Х3Г2МФС для производства тяжелонагруженных изделий нефтегазового машиностроения / Д. П. Подузов // Проблемы черной металлургии и материаловедения». 2018. №1. С. 68-72.

4. Подузов, Д. П. Исследование превращений, структуры и свойств стали 12Х3Г2МФС после закалки из межкритического интервала температур / Д. П. Подузов, Ю. Н. Симонов, А. Н. Юрченко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического

университета. Машиностроение, материаловедение. - 2019. - Т. 21. № 3. - С. 14-23. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.02

Полученные патенты:

5. Пат. 2477333 РФ. С 22 С 38/38. Низкоуглеродистая легированная сталь / Ю.Н. Симонов, Д.О. Панов, М.Ю. Симонов, А.В. Касаткин, Д.П. Подузов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». заявл. 29.08.2011; опубл. 10.03.2013 // Бюл. № 7. 10 с.

6. Пат. 2498262 РФ. G01N 1/32, G01N 33/20. Способ контроля структурного состояния закаленных низкоуглеродистых сталей / Ю.Н. Симонов, Д.О. Панов, М.Ю. Симонов, Д.П. Подузов, А.В. Смирнов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». заявл. 02.07.2012; опубл. 10.11.2013 // Бюл. № 31. 13 с.

7. Пат. 2578873 РФ. С 22 С 38/38. Сталь с бейнитной структурой / Ю.Н. Симонов, М.Ю. Симонов, Е.Н. Орлова, А.Н. Шаманов, Д.П. Подузов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». заявл. 25.11.2014 ; опубл. 27.03.2016 // Бюл. № 9. 11 с.

8. Пат. 2532628 РФ. С 22 С 38/38. Сталь для изготовления изделий с повышенной прокаливаемостью / Ю. Н. Симонов, М. Ю. Симонов, Г. С. Шайманов, Д. П. Подузов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». заявл. 18.06.2015 ; опубл. 10.10.2016 // Бюл. № 31. – 7 с.

Публикации в прочих изданиях:

9. Подузов, Д. П. Освоение режимов термической обработки системно-легированной НМС для тяжело нагруженных изделий нефтегазового машиностроения / Д. П. Подузов // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXIV Уральская школа металловедов-термистов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. С 147-148.

10. Подузов, Д. П. Исследование превращений низкоуглеродистой системно-легированной безникелевой стали 12Х3Г2МФС при закалке из межкритического интервала температур / Д. П. Подузов // Сборник тезисов международной конференции молодых ученых «Научное наследие Д.К. Чернова». –ГНЦ ФГУП «ЦНИИЧермет» им. И.П. Бардина, 2018. С 66-68.

11. Подузов, Д. П. Разработка и внедрение системно-легированной НМС стали 12Х3Г2МФС производства тяжело нагруженных изделий нефтегазового машиностроения / Д. П. Подузов // Неделя металлов в Москве. 13 – 17 ноября 2016 г. Сборник трудов конференций. – М. «Ваш формат», 2018 г. С 434-441.

12. Подузов, Д. П. Исследование превращений структуры и свойств стали 12Х3Г2МФС после закалки из межкритического интервала температур (МКИТ) / Д. П. Подузов, Ю. Н. Симонов, А. Н. Юрченко // Материалы 4-й научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении», Пермь, ПНИПУ, 2019. С. 209-213.

13. Подузов, Д. П. Моделирование процессов нагрева и охлаждения поковок сечением до 400 мм из стали 12Х3Г2МФС / Д. П. Подузов, Ю. Н. Симонов, И. Н. Шардаков // Материалы 4-й научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении», Пермь, ПНИПУ, 2019. С. 213-216.

14. Юрченко, А. Н. Исследование микротвердости стали 12Х3Г2МФС после непрерывного охлаждения с различной температуры нагрева/ А. Н. Юрченко, Д. П. Подузов, А. А. Скачкова // Материалы 4-й научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении», Пермь, ПНИПУ, 2019. С. 309-311.