

На правах рукописи
УДК 669.15.194.2:621.785



Коротовская Светлана Владимировна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ УНИФИКАЦИЮ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ И
ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ЗА СЧЕТ
ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ И
СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**

Специальность 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2014

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей».

Научный руководитель: доктор технических наук
Орлов Виктор Валерьевич

Официальные оппоненты:

Титова Татьяна
Ивановна доктор технических наук,
генеральный директор ООО «ТК «ОМЗ-Ижора»,
г.Санкт-Петербург, Колпино

Ильинский Вячеслав
Игоревич - кандидат технических наук, главный специалист по
исследованиям ИТЦ ОАО «Выксунский
металлургический завод», г.Выкса

Ведущее предприятие: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Центральный научно-
исследовательский институт черной металлургии
И.П. Бардина», г.Москва

Защита диссертации состоится "10" декабря 2014 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей».

По адресу: 191015, г. Санкт – Петербург, ул. Шпалерная, д.49

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте www.cris-m-prometey.ru.

Автореферат разослан " ____ " октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д411.006.01
Заслуженный деятель науки РФ,

доктор технических наук, профессор



Малышевский В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время, в связи с масштабным освоением Арктики, шельфа северных морей России и Северного морского пути возрастает потребность в крупногабаритном листовом прокате из хладостойких хорошо свариваемых сталей для танкеров, судов ледового плавания, морских стационарных платформ для добычи углеводородов и трубопроводов для их транспортировки. Помимо требуемой прочности и хорошей свариваемости эти стали должны обладать высоким уровнем вязкости и хладостойкости. Наиболее простым решением является применение дополнительного легирования базовых композиций сталей. Однако использование дорогостоящих легирующих элементов существенно повышает стоимость стали, что делает применение таких материалов экономически нецелесообразным.

Многочисленные исследования, проведенные на конструкционных сталях для судостроения, доказали, что для сталей высокой прочности лишь формирование квазиоднородной мелкодисперсной структуры обеспечивает требуемое сочетание физико - механических свойств. При термомеханической обработке мелкодисперсная структура формируется за счет протекания процессов рекристаллизации (динамической, метадинамической и статической рекристаллизации), однако в экономнолегированных сталях управлять этими процессами сложно из-за высокого содержания микролегирующих элементов. В большинстве случаев процессы рекристаллизации проходят неравномерно и не в полном объеме, что либо приводит к разнотекстурности структуры, либо при выбранных режимах деформации способствуют формированию ориентированной структуры, как, например, в трубных сталях. Для судостроительных сталей такая структура не обеспечивает требуемого комплекса свойств, в первую очередь, изотропного волокнистого строения излома крупногабаритных проб при статическом изгибе.

Наиболее интересным представляется возможность использования стали близкого химического состава для судостроения и магистральных трубопроводов.

В последние десятилетия были разработаны новые и усовершенствованы уже известные методы измельчения структуры с помощью интенсивной пластической деформации, имеющей ограниченное применение в промышленных масштабах. Они основаны на формировании ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры за счет явления фрагментации – разбиения аустенитного зерна на субзерна (фрагменты) границами деформационного происхождения, которые играют роль, по сути, границ зерен, обеспечивая повышение прочности стали, но при этом обладают большей проницаемостью, улучшая сопротивление разрушению.

В связи с вводом нового прокатного оборудования с автоматизированным управлением на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» стало возможным прецизионно управлять термо-деформационными параметрами прокатки (температурой, степенью и дробностью деформации, а главное - скоростью прокатки). Вышеизложенное определило основную задачу настоящей работы –

изучение взаимосвязи режимов деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации аустенита с параметрами структуры (фазовым составом, размером структурных элементов, углами разориентировки, их долей в малоугловом и большеугловом спектрах) для определения условий создания ультрамелких зерен (менее 5 мкм) с развитой субструктурой в экономнолегированных сталях высокой прочности.

Целью работы является определение условий формирования ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры и разработка технологических режимов термопластической обработки судостроительных сталей с пределом текучести 420-460 МПа, унифицированных по химическому составу с трубными сталями категории прочности К65.

Для ее достижения в работе **решены следующие задачи:**

1. Выбраны и обоснованы наиболее эффективные способы получения ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры в прокате низколегированных низкоуглеродистых сталей толщиной до 50 мм.

2. Исследовано влияния термомеханических параметров прокатки на фазовые превращения и их кинетику в низколегированных низкоуглеродистых сталях, а также сделан количественный анализ конечной структуры в зависимости от режимов горячей и теплой пластической деформации.

3. Разработан унифицированный химический состав для сталей различного назначения с учетом формирования структуры ультрамелкозернистого и субмикроструктурного размера.

4. Выполнено имитационное моделирование режимов термомеханической обработки на пластометре GLEEBLE 3800 судостроительных и трубных сталей с единым химическим составом.

5. Разработаны технологические режимы термомеханической обработки, обеспечивающие формирование ультрамелкозернистой структуры при изготовлении судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа.

6. Проведены сравнительные исследования качества опытных партий изготовленного листового проката в условиях ОАО «ММК» судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа и трубной стали категории К65 из слэбов единого химического состава.

7. Проведены сертификационные испытания и подтверждена работоспособность разработанной судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа, изготовленной на толстолистовом прокатном оборудовании ОАО «ММК».

Основные положения, вынесенные на защиту:

1. Новая композиция легирования высокопрочных судостроительных сталей с пределом текучести 420-460 МПа со сниженным содержанием дорогостоящих легирующих и микролегирующих элементов.

2. Взаимосвязь предварительной пластической деформации при различных температурах и параметров структуры (размер структурных элементов, их доля и углы разориентировки между ними) судостроительной стали с гарантированным

пределом текучести 420-460 МПа, обеспечивающие хладостойкость стали при температурах до минус 40°C.

3. Технология термомеханической обработки, обеспечивающая формирование ультрамелкозернистой структуры в листовом прокате толщиной 16-50 мм из судостроительных сталей с пределом текучести 420-460 МПа.

Научная новизна полученных результатов определена следующими положениями:

1. Показано, что требуемый комплекс механических свойств судостроительных сталей с пределом текучести 420-460 МПа толщиной до 50 мм и трубных сталей с пределом текучести 550-620 МПа толщиной до 27,7 мм достигается при изготовлении из слэбов унифицированного химического состава за счет варьирования технологических режимов на чистой стадии прокатки.

2. Установлено, что при сниженном содержании основных легирующих элементов в судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа формирование квазиоднородной структуры по толщине проката после термомеханической обработки с ускоренным охлаждением обеспечивается за счет строгой регламентации степени деформации и количества междеформационных пауз при температуре ниже температуры рекристаллизации на 150-200°C.

3. Показано, что при пониженном содержании легирующих элементов формирование феррито-бейнитной структуры с доминирующим размером структурного элемента 2-4 мкм обеспечивает достижение требуемых характеристик работоспособности в хладостойких судостроительных сталях с пределом текучести 420-460 МПа, причем структура характеризуется наличием малоугловых границ с разориентировками 8-10° в количестве 20-25%.

4. Предложен метод определения пороговых температуры и степени деформации динамической рекристаллизации низколегированных низкоуглеродистых сталей марганцевой композиции легирования по дилатометрическим кривым, основанный на определении повышения температуры начала $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и изменения характера кинетики превращения после горячей пластической деформации.

Личный вклад автора состоит в получении, анализе и обобщении научных результатов, изложенных в диссертации, и заключается в следующем:

1. В исследовании фазовых и структурных превращений низколегированных низкоуглеродистых сталей с феррито-бейнитной структурой;

2. В исследовании влияния параметров горячей пластической деформации на морфологию структурных составляющих, размер и разориентировки структурных элементов в низколегированных низкоуглеродистых сталях;

3. В проведении имитационного моделирования на пластометре GLEEBLE 3800 специальной термомеханической обработки с целью получения ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры;

4. В разработке химического состава и технологических параметров двухстадийной термомеханической обработки с ускоренным охлаждением судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа;

5. В сопровождении изготовления по разработанным режимам листового проката и проведения сертификационных испытаний.

Достоверность основных результатов, положений, выводов и рекомендаций подтверждена:

- большим объемом проведенных лабораторных и промышленных экспериментов на современном оборудовании и проанализированных данных, на основании которых сделаны научные выводы и разработаны рекомендации для промышленного производства листового проката, содержащиеся в диссертационной работе;

- опытом внедрения результатов работы в производство при изготовлении судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа, унифицированной с трубными сталями категории К65 на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»;

- положительными результатами испытаний при сертификации стали с пределом текучести 420-460 МПа по требованиям Российского морского регистра судоходства.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана технология производства листового проката из высокопрочных хладостойких судостроительных сталей с химическим составом, унифицированным с трубными сталями класса прочности К65, отвечающего всем требованиям Российского морского регистра судоходства (РМРС), которая обеспечивает получение требуемого комплекса механических свойств, в том числе гарантированного предела текучести 420-460 МПа, и характеристик работоспособности при низких температурах.

2. Разработаны и утверждены технические условия, распространяющиеся на технологический процесс изготовления горячекатаного листового проката толщиной от 8 до 50 мм включительно из стали высокой прочности для судостроения.

3. Разработана и внедрена сквозная технология производства листового проката толщиной до 50 мм из судостроительной стали с пределом текучести не менее 420, 460 МПа на стане «5000» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

4. Освоено производство листового проката с пределом текучести 420-460 МПа в толщинах до 50 мм на толстолистовом прокатном стане «5000» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» по технологии термомеханической обработки.

Разработанная технология производства судостроительных и трубных сталей унифицированного химического состава позволяет снизить ресурсо- и энергозатраты при производстве заказов ограниченного сортамента.

Внедрение результатов в рамках выполненной работы заключается:

- в разработке и внедрении нормативной и технологической документации на изготовление листового проката толщиной до 50 мм из стали с пределом текучести 420-460 МПа на ОАО «ММК»;

- в изготовлении опытно-промышленных партий листовых прокатов судостроительной и трубной сталей из слябов единого химического состава на толстолистовом прокатном стане «5000» ОАО «ММК», подтвержденных актом внедрения;

- в сертификации разработанной судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа по программе Российского морского регистра судоходства.

Итогом работы стала разработка эффективных технологических режимов производства судостроительных сталей с пределом текучести 420-460 МПа толщиной до 50 мм, унифицированных по химическому составу с трубными сталями категории К65, применительно к современному прокатному оборудованию, обеспечивающих гарантированные высокие значения прочностных, вязко-пластических свойств и сопротивление хрупкому разрушению при низких температурах за счет формирования ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры.

Апробация работы. Основные результаты докладывались на международных научно-технических конференциях, семинарах и совещаниях: VI, VII, VIII и X научно-технических конференциях молодых ученых и специалистов, ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», г.Санкт-Петербург, 2007, 2008, 2009, 2011 и 2013 гг.; XIX Международной научно-технической конференции «Уральская школа металлостроителей», УГТУ УПИ, г.Екатеринбург, 2007; XIV и XV международных научно-технических конференциях «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций», СПбГУНиПТ, г.Санкт-Петербург, 2008г. и 2009г.; IX Международной научно-технической конференции «Уральская школа-семинар металлостроителей-молодых ученых», УГТУ УПИ, г.Екатеринбург, 2008г.; VIII Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии», СПбГПИ, г.Санкт-Петербург, 2009г.; IV международной школе «Физическое материаловедение», г.Тольятти, 2009г.; II международном конкурсе научных работ молодых специалистов в области нанотехнологий (Роснанотех), г.Москва, 2009г, на котором работа удостоена премии.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 6 в журналах, рекомендуемых перечнем ВАК, разработки защищены 1 патентом РФ.

Объём и структура диссертации. Диссертация объемом 204 стр. состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка литературы из 113 наименований, в т. ч. приложения (акт внедрения, утвержденный на ОАО «ММК»). Работа содержит 101 рисунок и 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния исследований по получению ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры, требований к судостроительным сталям, технологии изготовления листового проката в России и за рубежом и исследованию особенностей процессов, происходящих при термомеханической обработке. Представлена известная из литературных источников классификация структур по размерам и определена актуальность работы. Эффективными методами получения ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры в мире являются способы интенсивной пластической деформации. Однако для производства крупногабаритного листового проката такие методы использовать не представляется возможным, а опыт управляемого создания ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры в толстолистовой низколегированной низкоуглеродистой стали отсутствует. Одним из методов измельчения конечной структуры низкоуглеродистой низколегированной стали может стать метод специальной термопластической обработки, реализуемый на мощных прокатных станах, оснащенных установками для ускоренного охлаждения после прокатки, за счет создания оптимальных термодеформационных условий для формирования развитой субструктуры в аустените.

Во второй главе приведены характеристики исследованных сталей, представлены методы имитационного моделирования технологических процессов на dilatометре DIL 805 и комплексе «GLEEBLE 3800», методики комплексных исследований структуры, в том числе с использованием EBSD-анализа и просвечивающей электронной микроскопии, механических свойств образцов после лабораторных экспериментов и характеристик работоспособности листового проката промышленного изготовления. Для исследований были отобраны стали с феррито-бейнитной структурой с переменным легированием марганцем, медью, никелем, хромом и молибденом для изучения возможности снижения уровня легирования и унификации сталей различного назначения. Химический состав представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сталей исследованных плавок, масс. %.

№	C	Mn	Ni+Cu	Ti	Mo	Nb+V	Сэкв
1	0,06	1,54	0,24	0,004	0,003	0,064	0,35
2	0,07	1,59	0,38	0,008	0,002	0,059	0,35
3	0,05	1,69	0,76	0,008	0,21	0,062	0,45
4	0,06	1,72	0,54	0,018	0,196	0,053	0,45
5	0,04	1,75	0,61	0,008	0,20	0,063	0,44

Третья глава посвящена исследованию влияния легирующих элементов, размера аустенитного зерна, горячей пластической деформации (температуры

деформации, степени и дробности деформации) в γ -области и скорости охлаждения на фазовые превращения и их кинетику в сталях с исходной мелкозернистой и крупнозернистой структурой.

Влияние легирования и микролегирования на фазовые превращения и структуру стали. При исследовании фазовых превращений было выявлено, что комплексное легирование марганцевой (1,7-1,75% Mn) низколегированной стали с содержанием углерода 0,04-0,07% малыми добавками никеля (0,2-0,4%), меди (0,1-0,3%) и молибдена (0,002-0,20%) понижает температуру фазовых превращений на 100-120°C, что в сочетании с увеличением скорости охлаждения от 5°C/сек до 50°C/сек повышает дисперсность структурных составляющих в 2-2,5 раза. Предшествующее бейнитному превращению выделение феррита повышает дисперсность реечного бейнита.

Изучение кинетики $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения показало, что даже в низколегированных сталях уровень легирования играет немаловажную роль. Так, повышение углеродного эквивалента в рассмотренных сталях с 0,35% до 0,45%, обусловленное введением марганца, приводит к понижению температуры начала превращения, не изменяя при этом температуру конца превращения, повышает скорость превращения, что благоприятно сказалось на морфологической квазиоднородности структуры (рис.1).

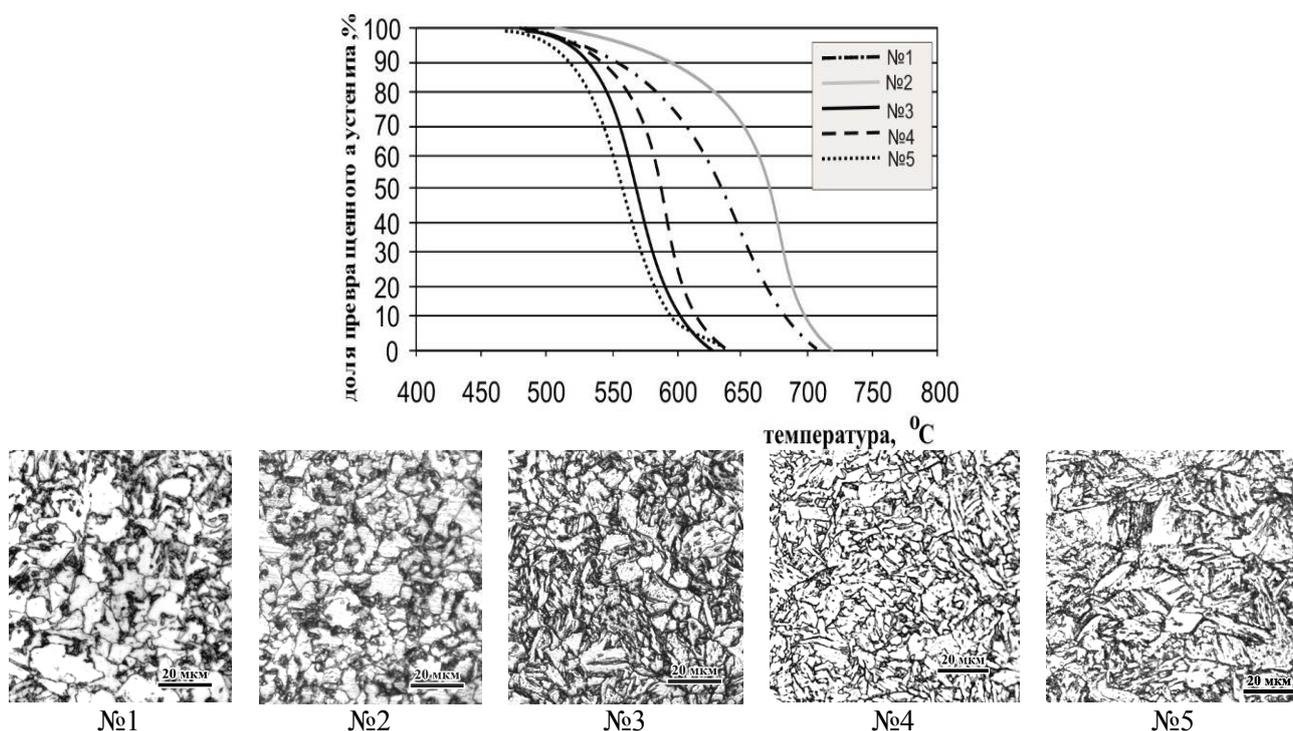


Рис.1- Кинетические кривые $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в зависимости от уровня легирования и микроструктура стали различного легирования (см. табл.1) после охлаждения со скоростью 20°C/сек недеформированного аустенита

Влияние предварительной горячей пластической деформации на фазовые превращения и структуру стали. Исследование фазовых превращений в низколегированных низкоуглеродистых сталях выявило стимулирующее влияние предварительной горячей деформации на образование структурных составляющих с

преимущественным развитием диффузионного механизма превращения. Причем предварительная деформация интенсифицирует процесс $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при температуре 550-650°C в сталях с более высоким содержанием марганца на 15%, что благоприятно сказывается на дисперсности структуры. В сталях с углеродным эквивалентом 0,35% с более низким содержанием марганца предварительная деформация не влияет на положение критических точек и ход кинетических кривых не изменяет (рис.2). Таким образом, показано, что марганцевые стали ($Mn \geq 1,69\%$) более чувствительны к деформационному воздействию, что далее позволило в сталях данной композиции легирования управлять формированием структуры с помощью варьирования термодформационных параметров, таких как температура и степень деформации.

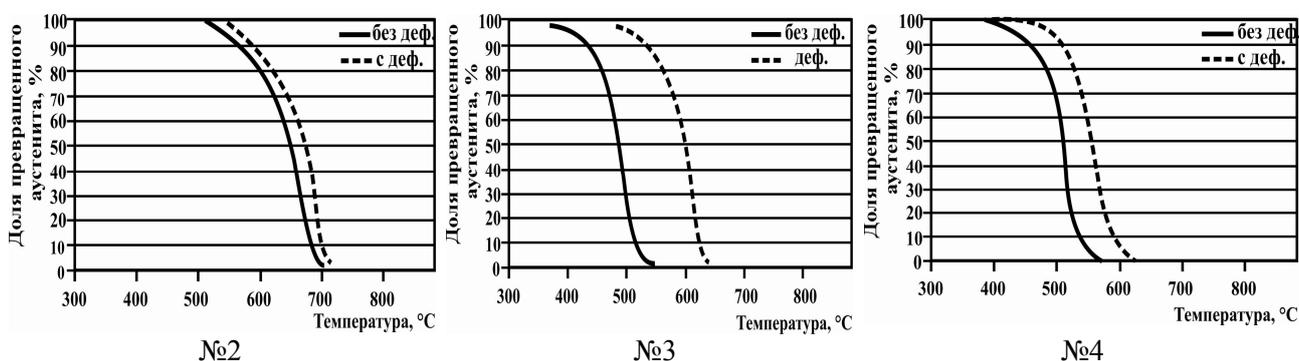


Рис.2 - Кинетические зависимости $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения для сталей при непрерывном превращении со скоростью 20°C/сек.

В микролегированных ниобием марганцевых сталях с низким содержанием химических элементов, стабилизирующих аустенит, таких как никель и медь, единственным способом измельчения структуры в объемных полуфабрикатах является фрагментация, протекающая при температурах ниже температуры рекристаллизации. При систематическом изучении влияния термодформационных параметров при температурах ниже температуры рекристаллизации, но выше точки A_{r3} , было определено, что предварительная деформация 25% при температурах 750-920°C по сравнению с недеформированным состоянием приводит к изменению хода кинетических кривых $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, ускоряя превращение в верхнем температурном интервале бейнитной области, что способствует изменению морфологии бейнита с речной на гранулярную. Увеличение степени деформации до 50% при температуре 750-920°C приводит к повышению температуры начала превращения аустенита в интервале скоростей охлаждения 50-10°C/сек и измельчению структуры за счет повышения доли гранулярного бейнита, характеризующегося развитой субструктурой. При более низких скоростях охлаждения деформация 50% способствует формированию феррита. Оптимальное сочетание дисперсности и квазиоднородности структуры по фазовому составу и морфологии составляющих было достигнуто после деформации на 50% при температуре 850°C, что, однако, не реализуемо в промышленных условиях.

Влияние дробности деформации на фазовые превращения. При изучении способности металла к накоплению деформации было установлено, что повышение дробности деформации приводит к измельчению структуры, повышается количество гранулярного бейнита, при этом характер кинетических кривых при охлаждении не изменяется (рис.3), что позволяет основные закономерности, выявленные при исследованиях, проведенных с однократной деформацией, использовать при производстве толстолистовой стали в промышленности. Вне зависимости от дробности деформации в стали сформировалась мелкодисперсная структура.

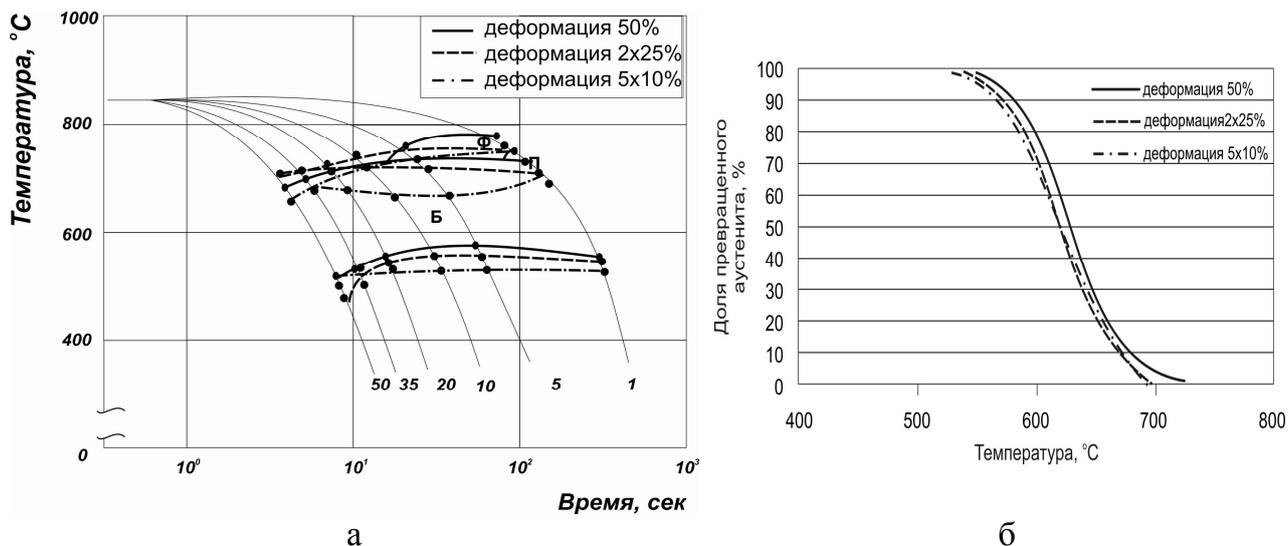


Рис. 3 – Термокинетическая диаграмма превращения стали состава №5 при охлаждении мелкозернистого деформированного аустенита (а) и кинетические зависимости $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения после различных схем деформации и охлаждения со скоростью 20°C/сек (б).

Поскольку выявить различия в морфологии бейнита при металлографических исследованиях в зависимости от дробности деформации не представилось возможным, потребовалось использовать другие методы исследования структуры, такие как EBSD-анализ, позволяющий получить объективные количественные характеристики структуры.

В четвертой главе методом дифракции обратно отраженных электронов (EBSD – анализ) выполнены комплексные исследования влияния температуры деформации аустенита низколегированной низкоуглеродистой стали в области заторможенной рекристаллизации, степени и дробности деформации, а также скорости охлаждения на параметры структуры феррито-бейнитной стали, обусловленные процессами рекристаллизации и фрагментации аустенита при пластической деформации, с построением гистограмм распределения размеров структурных элементов, углов разориентировок между ними и ориентационных карт.

Исследования кинетики превращения, проведенные в предыдущей главе, и их количественная оценка позволили определить граничные условия структурообразования при горячей (теплой) пластической деформации в сталях выбранного легирования:

- прохождение динамической рекристаллизации возможно при однократной деформации на 50% при температуре более 1000°C, в результате чего при превращении из мелкого аустенитного зерна формируется однородная феррито-бейнитная структура со средним размером структурного элемента 4 мкм;

- при температуре 750°C после однократной деформации 50% преобладающим механизмом измельчения структуры является создание в аустенитных и ферритных зернах единой исходной ориентации разориентированных фрагментов, в результате чего при скорости охлаждения 50°C/сек формируется феррито-бейнитная структура со средним размером структурных элементов менее 1 мкм, разориентированных большеугловыми границами (доля БУГ более 80%);

- при температурах 850°C и 920°C реализуются два конкурирующих механизма – создание дислокационной структуры и начальные процессы динамической полигонизации дислокационной структуры аустенита. При температуре деформации 850°C с однократным обжатием 50%, когда диффузионные процессы заторможены, была сформирована структура со средним размером структурного элемента 1,1 мкм с развитой субструктурой внутри зерен, наличие которой обеспечивает высокие прочностные характеристики (микротвердость достигает 320 HV) (рис.4).

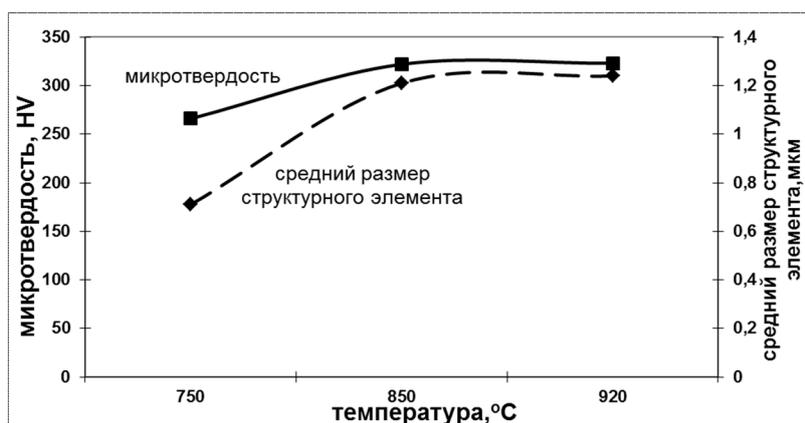


Рис. 4 – Влияние температуры деформации на микротвердость и на средний размер структурных элементов в стали состава №5 после деформации 50% и охлаждения со скоростью 50°C/сек.

Полученные результаты позволяют утверждать, при соответствующем выборе режимов на стали одного и того же состава могут быть получены повышенные прочностные или пластические свойства, причем ключевым фактором, определяющим формирование ультрамелкозернистой и субмикрокристаллической структуры, является схема деформации при температурах на ~150°C ниже температуры рекристаллизации.

Приложение деформации с однократным обжатием 25% по сравнению с недеформированным состоянием металла при температуре 850°C после охлаждения со скоростью 20°C/сек приводит к наклепу и измельчению субзеренной структуры, что в свою очередь вызывает повышение микротвердости (рис. 5). При повышении степени деформации до 50% происходит измельчение всех структурных

составляющих, измельчаются зерна и субзерна. Максимальная твердость достигается после деформации 25% за счет сочетания 2-х факторов: размера зерна и морфологии бейнита (поскольку присутствует бейнит речной морфологии). Кроме того, после деформации 25% увеличивается доля структурных элементов с большеугловыми границами, что закономерно приводит к повышению твердости. После деформации 50% при температуре 850°C и охлаждения со скоростью 20°C/сек за счет повышения доли гранулярного бейнита твердость понижается, несмотря на измельчение размера структурных элементов в 3-4 раза по сравнению с деформацией 25%.

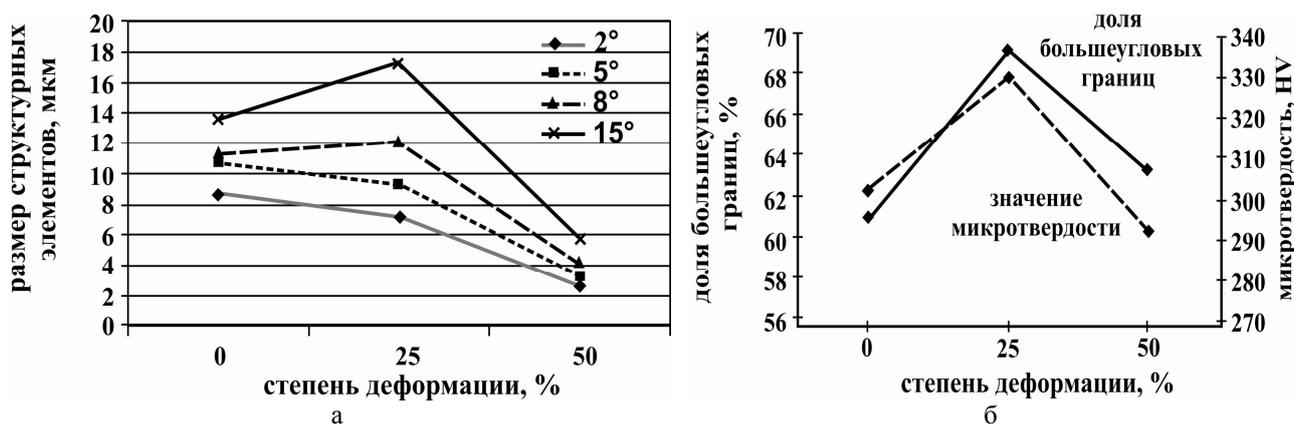


Рис.5 – Зависимость размера структурных элементов, доли большеугловых границ и значения микротвердости стали состава №5 от степени деформации при температуре 850°C после охлаждения со скоростью 20°C/сек.

Количественная оценка влияния дробности деформации показала, что средний размер структурных элементов после деформации 50% изменяется в пределах 2-3 мкм при угле толерантности 2° (рис.6). Количество малоугловых границ находится в пределах 44-48%, пик распределения разориентировок приходится на 10° (рис.7е). При деформации 2x25% увеличивается размер структурных элементов за счет повышения количества феррита в структуре, о чем свидетельствует повышение доли большеугловых границ. При деформации 5x10% во время четырех междеформационных пауз проходят процессы полигонизации и аннигиляция дислокаций, которые приводят к формированию более однородной субзеренной структуры, доля малоугловых границ возрастает (рис.7з).

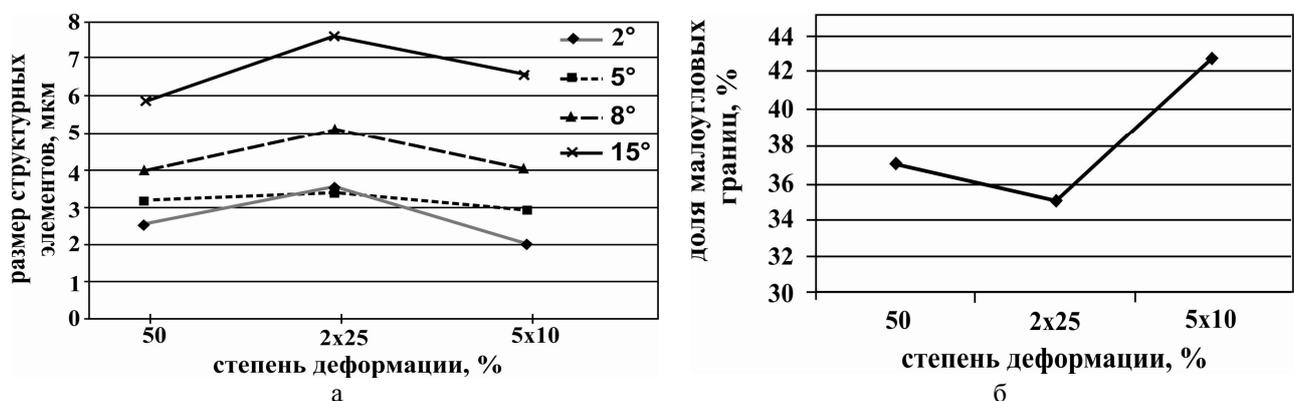
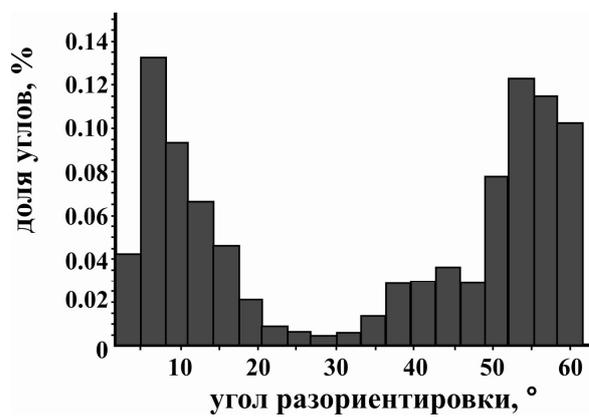
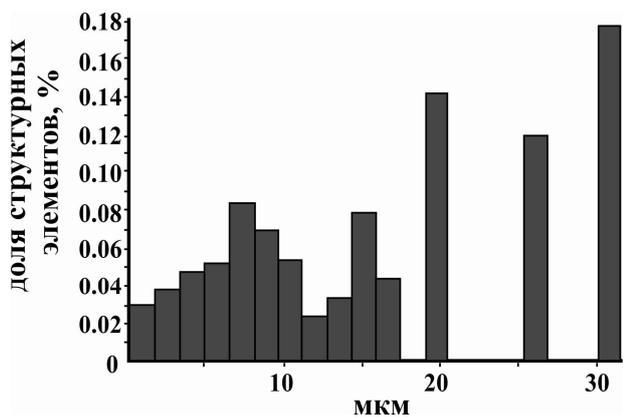
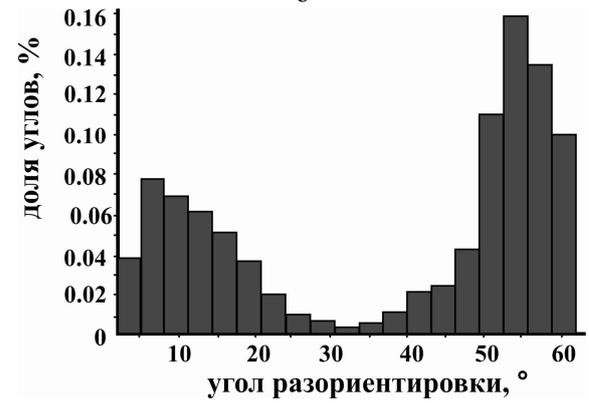
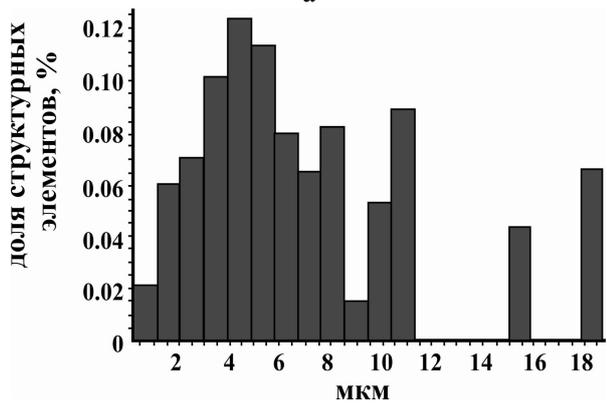


Рис. 6 – Зависимость среднего размера структурных элементов (а) и доли большеугловых границ (б) от степени деформации при температуре 850°C и охлаждения со скоростью 20°C/сек



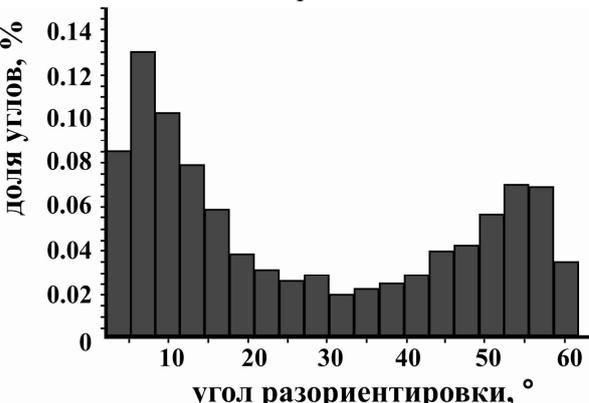
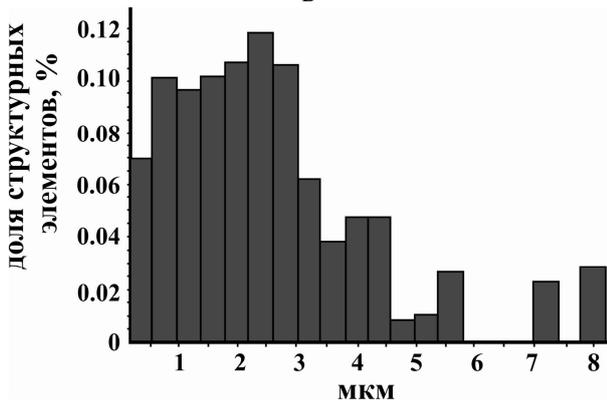
а

б



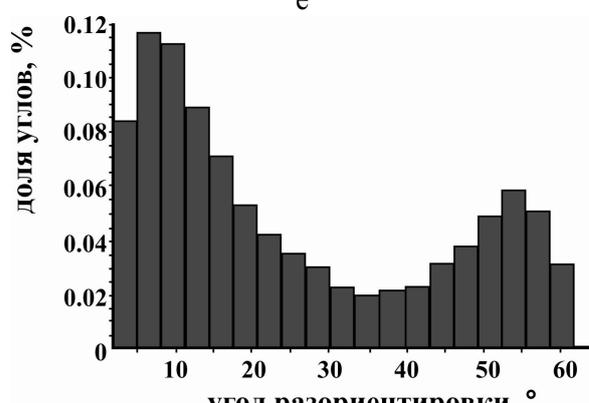
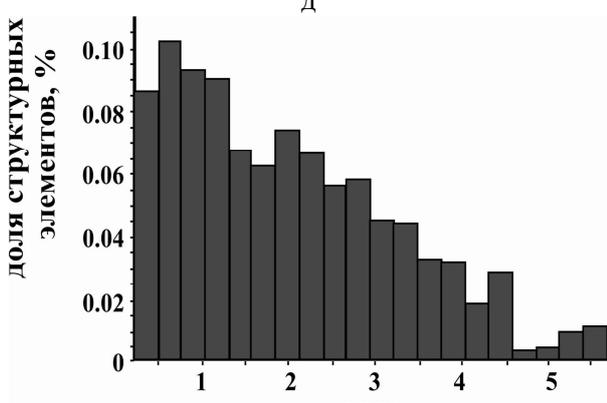
в

г



д

е



ж

з

Рис. 7 – Гистограммы распределения структурных элементов по размерам (а, в, д, ж) и углам разориентировок (б, г, е, з), полученные после охлаждения со скоростью 20°С/сек недеформированной (а, б) и деформированной на 25% (в, г), 50% (д, е), 5x10% (ж, з) стали при температуре 850°С.

При рассмотрении влияния дробности деформации при разных скоростях охлаждения было выявлено, что повышение дробности деформации приводит к формированию близких по морфологии структур (ход кинетических кривых при 5-и кратной деформации совпадает при охлаждении со скоростью 20°С/сек и 50°С/сек), что также подтвердили и количественные исследования. При однократной деформации повышение скорости охлаждения с 20°С/сек до 50°С/сек наблюдается изменение среднего размера структурного элемента в 2,5 раза и снижение доли малоугловых границ (рис.8а).

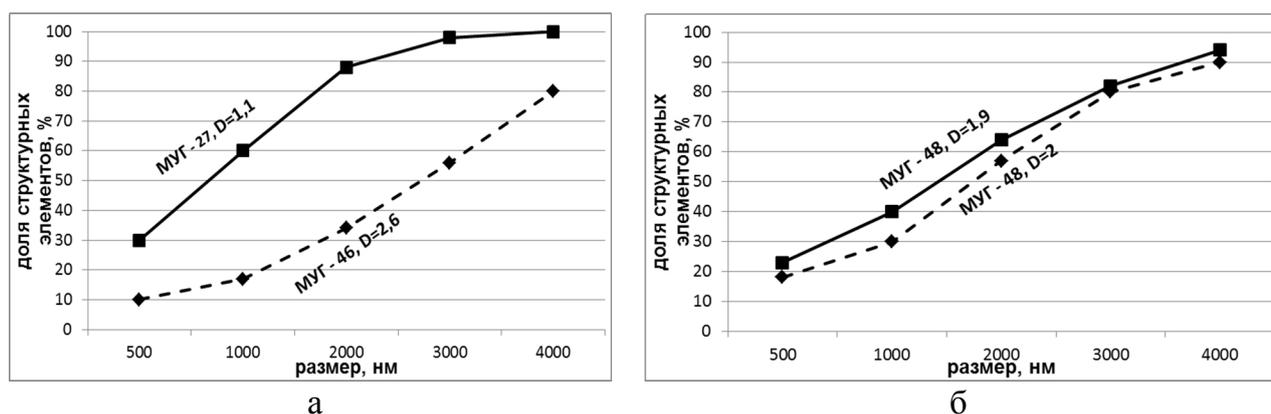


Рис. 8 – Влияние дробности деформации на структурные характеристики стали при разных скоростях охлаждения при однократной (а) и пятикратной деформации (б).
 ————— 50°С/сек; - - - - - 20°С/сек.

Повышение дробности деформации до 5 раз приводит к формированию близких по параметрам структур при отличающихся скоростях охлаждения, доля малоугловых границ достигает 48%, а средний размер структурного элемента, определенный при угле толерантности 2°, составляет 2 мкм (рис.8б). Во время междеформационных пауз при горячей пластической деформации происходит перестроение дислокационной структуры, вызванное процессами динамической полигонизации, приводящее к формированию квазиоднородной развитой субзеренной структуры. В промышленности этот эффект позволит создавать однородную структуру по толщине проката толстолистовой стали вплоть до 50 мм.

Анализ гистограмм распределения по размерам и углам разориентировок структур, полученных по различным термомеханическим режимам (рис.7) позволил установить, что варьирование степени деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации на ~ 150°С приводит к формированию различных картин распределения не только по размерам структурных составляющих, но и по углам разориентировки между ними. На низкотемпературной стадии прокатки с помощью варьирования термомеханических параметров можно управляемо изменять количественное соотношение малоугловых и большеугловых границ.

Пятая глава посвящена разработке режимов термомеханической обработки листового проката низколегированной низкоуглеродистой стали.

Для создания «унифицированных» сталей на основании проделанных экспериментов и найденных зависимостей были определены требования к химическому составу (табл.2).

С целью унификации химического состава с трубной сталью К65 к судостроительной стали были установлены требования с более узкими диапазонами возможного содержания легирующих и микролегирующих элементов. По отношению к традиционным судостроительным сталям химический состав был изменен: снижено содержание углерода, никеля и меди, и незначительно повышено количество марганца. Изменение композиции легирования по отношению к традиционным судостроительным сталям способствовало измельчению структуры за счет понижения критических точек превращения вследствие повышения содержания марганца и формированию развитой субструктуры в аустените при деформации, наследуемой при непрерывном охлаждении конечной структурой. Это создает предпосылки для получения в сталях новой композиции легирования высокого комплекса прочностных свойств и хладостойкости при промышленном производстве за счет формирования ультрамелкозернистой структуры при специальных термомеханических режимах и ускоренном охлаждении.

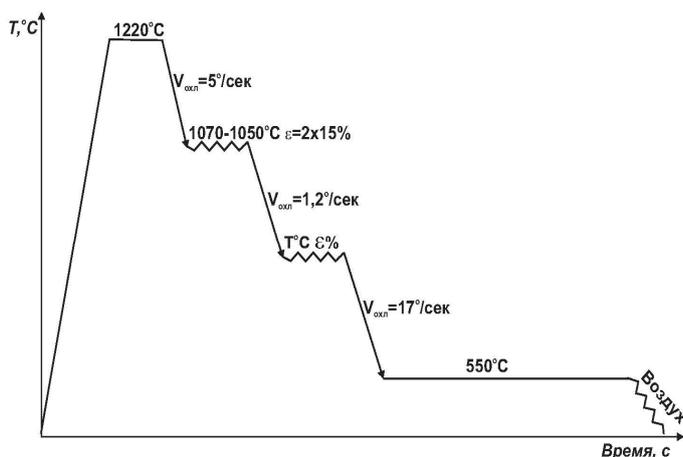
Таблица 2– Требования к химическому составу разработанной стали в сравнении с известными требованиями.

Требования	C	Mn	Si	Cr	Cu+Ni	V+Nb	Ti	S	P
Разработанный унифицированный химический состав	0,05-0,07	1,55-1,75	0,15-0,30	0,10-0,20	0,20-0,40	0,05-0,09	0,01-0,02	≤0,005	≤0,01
Судостроительные стали с пределом текучести 460МПа ГОСТ 52927-2008	0,08-0,11	1,15-1,60	0,10-0,40	≤0,20	0,95-1,65	0,04-0,11	0,01-0,02	≤0,005	≤0,01
Химический состав трубной стали К65	≤0,07	≤1,90	≤0,30	≤0,25	≤0,70	≤0,18	≤0,02	≤0,003	≤0,012

Трубные стали должны обладать более высокой прочностью, чем судостроительные при близких уровнях легирования, что можно обеспечить формированием бейнита реечной морфологии. Необходимая пластичность и вязкость будет обеспечиваться за счет наличия квазиполигонального феррита, причем такая структура будет отличаться высокой долей большеугловых границ и сможет обеспечивать сопротивление протяженным вязким разрушениям. В судостали необходимо обеспечить квазиоднородность структурных составляющих по размерам и морфологии – необходимо формировать ультрамелкозернистую структуру с бейнитом гранулярного типа, который характеризуется высокой долей малоугловых границ деформационного происхождения.

На пластометре Gleeble 3800 на сталях с новым химическим составом были опробованы 4 режима термомеханической обработки с варьированием

термодеформационных параметров на чистовой стадии прокатки (рис.9), основанные на закономерностях, установленных в 3 и 4 главах.



Режим	T, °C	□, %
№1	850	10+10+10+10
№2	830-860	10+14+16
№3	850	10+14+16
№4	830-860	10+10+10+10

Рис.9- Схемы моделирования режимов термохимической обработки на установке Gleeble 3800 для феррито-бейнитной стали

С помощью металлографического и EBSD-анализа были определены оптимальные режимы обработки. Для создания трубных сталей наиболее применим способ термохимической обработки по режиму №3 для создания ориентированной структуры вдоль направления прокатки с бейнитом преимущественно речной морфологии и небольшой долей гранулярной морфологии, и высокой долей квазиполигонального феррита, с преобладанием большеугловых границ. Формирование такой структуры позволяет достичь высокого уровня прочностных и пластических свойств. Для судостроительных сталей целесообразно использование режима №4, который обеспечит формирование однородной ультрамелкозернистой структуры с бейнитом преимущественно гранулярной морфологии и квазиполигональным ферритом с развитой субструктурой и долей малоугловых границ не менее 30 %. Для такой структуры характерно отсутствие расслоений при испытаниях полнотолщинных проб статическим изгибом, а также высокие значения относительного сужения при испытании на растяжение образцов, вырезанных в направлении толщины листа (z-свойства), высокую трещиностойкость в листовом прокате.

На основании результатов имитационного моделирования на пластометрическом комплексе Gleeble 3800 были разработаны технологические параметры изготовления опытно-промышленной партии листового проката судостроительной стали класса прочности 420-460 МПа из слябов одного и того же химического состава, что и для трубной стали К65, на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Сравнительные данные по механическим свойствам опытной партии листового проката судостроительной и трубной стали приведены в табл.3 и полностью отвечают заданным требованиям.

Среднее значение работы удара в судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа значительно превысило требуемый уровень во всем исследованном

диапазоне температур испытаний, при температуре испытания минус 60 °С работа удара составляет 200-260 Дж.

Таблица 3 – Механические свойства судостроительной и трубной стали

Сталь	Место отбора проб	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение в направлении толщины, %	Количество волокна в изломе, %
Судостроительная сталь с пределом текучести 420-460 МПа	Начало листа	540	653	25	76 76 73	100
	Конец листа	523	638	22,7	71 73 84	95
	Требования НТД	≥460	570-720	≥19	≥35	≥90
Трубная сталь категории прочности К65	Начало листа	582	666	22	-	95
	Конец листа	615	685	19	-	95
	Требования НТД	570-665	650-760	≥20		≥90

С помощью EBSD-анализа были определены средние размеры структурных составляющих. В листовом прокате судостроительной стали формируется структура со средним размером структурного элемента 4,2 мкм, что хорошо согласуется с данными имитационного моделирования. В структуре формируется 10% зерен размером менее 1 мкм, 20% зерен размером менее 2 мкм.

В трубной стали сформировалась структура со средним размером структурного элемента 5,3 мкм, причем большинство элементов имеют размер 3 мкм и единичные бейнитные зерна размером до 8 мкм. Гистограммы распределения по углам разориентировок приведены на рис.10.

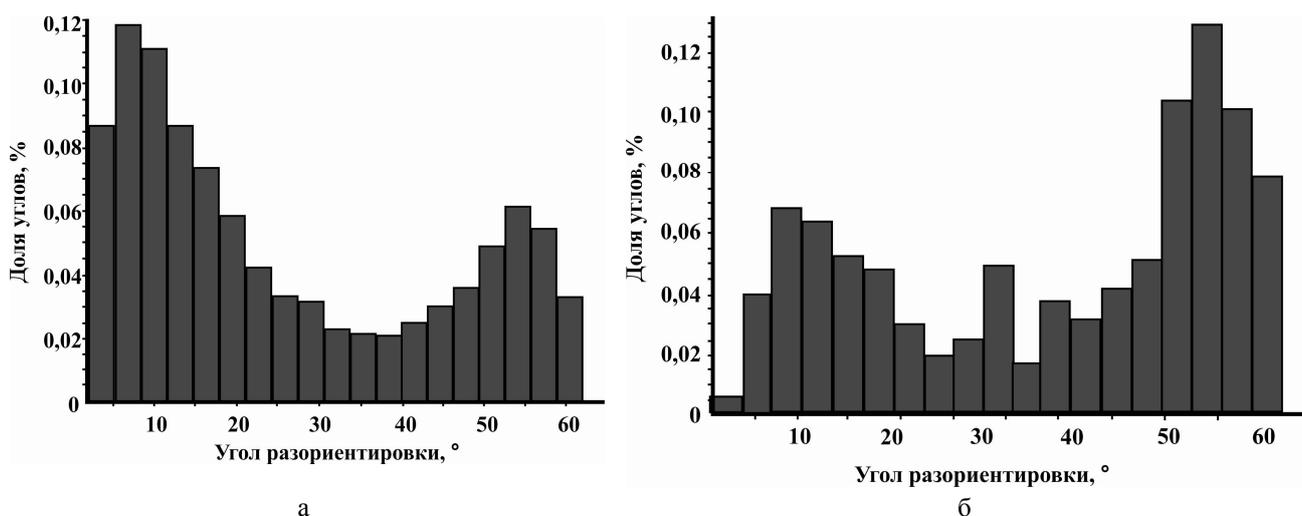


Рис. 10 – Гистограмма распределения по углам разориентировок в судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа (а) и трубной стали категории К65 (б)

В результате разработанной технологии была получена судостроительная сталь категории прочности 420-460 МПа, производство которой из стали

унифицированного состава до настоящего времени в России отсутствовало. В структуре стали присутствуют структурные элементы со средним размером 4 мкм, благодаря чему сталь можно отнести к ультрамелкозернистой, а наличие элементов структуры с размером менее 1 мкм позволяет говорить об элементах субмикроструктурной структуры. Формирование в стали ультрамелкозернистой структуры с развитой субструктурой позволило значительно снизить количество дорогостоящих легирующих элементов (количество никеля снизили в 2,5-3 раза) в судостроительных сталях с пределом текучести 420-460 МПа и унифицировать ее по химическому составу с трубными сталями категории К65.

На ОАО «ММК» в конвертерном цехе было выплавлено 3 плавки низколегированных низкоуглеродистых сталей унифицированного химического состава. По разработанным режимам термомеханической обработки на толстолистовом реверсивном стане «5000» ОАО «ММК» было прокатано по 7 листовых прокатов толщиной 40 и 50 мм судостроительных сталей с пределом текучести 420-460 МПа и 8 листов трубной стали категории прочности К65.

Разработанная технология судостроительных сталей обеспечивает получение в листовом прокате стабильного уровня прочностных характеристик (временное сопротивление – 590-680 МПа при среднем значении 650 МПа, предел текучести – 465-590 МПа при среднем значении 540 МПа), пластичности – относительное удлинение – 19-28 при среднем значении 23 %, количества вязкой составляющей в пробах натурной толщины -90-100% при среднем значении 95%, работы удара при температуре испытаний минус 40 °С 114-339 Дж при среднем значении 265 Дж, удовлетворяющий требованиям технической документации. Производство опытно-промышленных партий листового проката трубных сталей категории К65 из слэбов унифицированного химического состава показало, что в стали с гарантированным минимальным пределом текучести 570 МПа (при фактическом уровне 585-620 МПа) и временным сопротивлением в диапазоне 650-760 МПа (при фактическом 674-689 МПа) средняя ударная вязкость при температуре испытаний минус 40°С составляет более 260-390 Дж/см² при регламентируемой минимальной 155 Дж/см².

В шестой главе приведены результаты сертификационных испытаний листового проката из судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа усовершенствованного химического состава, изготовленного по разработанной технологии на листопркатном стане «5000» ОАО «ММК», выполненных в объеме программы Российского морского регистра судоходства. Листовой прокат подвергался испытаниям на соответствие требованиям Правил РМРС.

Исследование работоспособности стали РСЕ460W, изготовленной по технологии термомеханической обработки на ОАО «ММК», показало, что листовый прокат имеет высокий уровень прочности и пластичности, отличается высокой способностью сопротивляться хрупким разрушениям при низких температурах (табл.4), а также обладает хорошей коррозионно-механической прочностью стали и соответствует заявленной категории стали с пределом текучести не менее 460 МПа.

На основании результатов испытаний листовой прокат из стали марки PCE460W, изготавливаемый по разработанной технологии в толщинах до 50 мм на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», рекомендован для строительства морской техники.

Таблица 4 - Критические температуры хрупко-вязкого перехода

Толщина, мм	NDT, °C	Температура Ткб, °C	Среднее значение CTOD, мм при -40°C
50	-80	-20±2	0,22
40	-85	-50±2	0,77

Основные выводы и результаты работы:

1. На основе теоретических и экспериментальных работ для производства хладостойких свариваемых судостроительных сталей с пределом текучести 420-460 МПа разработан и опробован химический состав: 0,05-0,07% С, 1,55-1,75 % Мп, $\Sigma(\text{Ni}, \text{Cu}) - 0,20-0,40\%$, $\Sigma(\text{V}, \text{Nb}, \text{Al}) - 0,07-0,13\%$, унифицированный с трубными сталями категории К65.

2. Впервые разработана и внедрена технология изготовления листового проката из низколегированной низкоуглеродистой судостроительной стали с гарантированным пределом текучести 420 и 460 МПа с химическим составом, унифицированным с трубной сталью К65, позволяющая управлять формированием ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры (средним размером структурных элементов, долей мало- и большеугловых границ) для достижения заданного уровня прочностных и вязко-пластических свойств, обусловленных различными требованиями к материалам для судостроения и магистральных трубопроводов.

3. Определены и экспериментально обоснованы требования к структуре сталей различного назначения единого химического состава для обеспечения механических свойств и необходимого уровня работоспособности:

- структура судостроительной хладостойкой стали с пределом текучести 420-460 МПа должна быть квазиоднородной по морфологии и дисперсности структурных элементов, состоять из квазиполигонального феррита и гранулярного бейнита с высокой долей малоугловых границ (доля границ с разориентировками 8-10° должна составлять не менее 20%) и размером структурных элементов не более 4 мкм.

- в трубных сталях категории К65 требуемые вязко-пластические свойства обеспечиваются за счет повышения доли квазиполигонального феррита и бейнита речной морфологии с большеугловыми границами для обеспечения прочности при низком уровне легирования, со средним размером структурных элементов не более 5 мкм.

4. Для создания ультрамелкозернистой и субмикроструктурной превращенной структуры, снижая содержание химических элементов, таких как никель и медь (в сумме не более 0,40%) и повышая содержание марганца до 1,75%

для снижения критических температур превращения, необходимо при пластической горячей деформации обеспечить формирование мелкозернистого деформированного аустенита с размером зерна не более 40 мкм с развитой субструктурой.

5. Установлены закономерности структурных изменений в зависимости от режимов термомеханических воздействий в аустенитном состоянии, которые использованы при создании трубных и судостроительных сталей единого химического состава. При температурах ниже температуры рекристаллизации, но выше точки A_{r3} , в низколегированных низкоуглеродистых сталях происходит совокупность механизмов – формирование деформационной структуры в аустените и начальные процессы динамической полигонизации, управление которыми способствует формированию структуры с заданным соотношением и размером структурных составляющих, а также долей малоугловых и большеугловых границ для обеспечения требуемого комплекса прочностных и вязко-пластических характеристик в зависимости от назначения стали.

6. Показано, что дробная схема деформации на чистовой стадии прокатки при постоянной температуре деформации на 150°C ниже температуры рекристаллизации с повышающимися от прохода к проходу единичными обжатиями от 10 до 16% с последующим охлаждением способствует повышению доли большеугловых границ в превращенной структуре за счет повышения температуры ферритного превращения и образования квазиполигонального феррита и бейнита речной морфологии. Деформация при возрастающей температуре ниже температуры рекристаллизации на $140-170^{\circ}\text{C}$ при постоянной деформации 10% в каждом проходе способствует равномерному распределению дислокаций в структуре во время междеформационных пауз, стимулирует повышение доли малоугловых границ и приводит при ускоренном охлаждении к образованию бейнита гранулярной морфологии.

7. Разработаны и внедрены в промышленность температурно-деформационные схемы двухстадийной термомеханической обработки судостроительной стали из слябов химического состава, унифицированного с трубной сталью, основанные на изменении комплекса механических свойств в широких пределах за счет формирования ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры с различным соотношением большеугловых и малоугловых границ.

8. Изготовленный с применением разработанных режимов листовой прокат судостроительной стали с пределом текучести 420-460 МПа с пониженным уровнем легирования толщиной до 50 мм обладает высоким комплексом механических свойств, сопротивляемостью к хрупким разрушениям при низких температурах, стойкостью к слоистым разрушениям и к коррозионному растрескиванию.

9. Высокая конкурентоспособность высокопрочных судостроительных сталей обусловлена снижением дорогостоящих легирующих и микролегирующих элементов и близости к химическому составу трубной стали К65, слябы которых могут быть использованы при малотоннажных заказах, ранее от которых заводам-производителям приходилось отказываться.

В результате выполнения настоящей работы разработана малоэнергозатратная технология термомеханической обработки для массового производства листового проката толщиной до 50 мм из сталей с гарантированным пределом текучести 420 и 460 МПа со сниженным уровнем легирования по сравнению с традиционными судостроительными сталями, разработанными ранее, что позволит обеспечить проектирование и строительство ледоколов, танкеров, судов ледового плавания, морских буровых платформ, глубоководной техники и других технических сооружений относительно дешевыми конкурентоспособными конструкционными сталями для эффективного освоения арктических регионов страны и Северного морского пути.

Основные результаты работы опубликованы в следующих трудах:

1. Коротовская С.В., Орлов В.В., Хлусова Е.И. Влияние дробности деформации на формирование ультрамелкозернистой структуры в низкоуглеродистых низколегированных сталях // **Металлург**, № 9, 2013, с. 78-82.
2. Коротовская С.В., Орлов В.В., Хлусова Е.И. Способы формирования ультрамелкозернистой и субмикроструктурной структуры в феррито-бейнитной стали // **Производство проката**, №10, 2013, с. 6-16.
3. Коротовская С.В., Орлов В.В., Хлусова Е.И. Управление процессами структурообразования при термомеханической обработке судостроительных и трубных сталей унифицированного химического состава // **Металлург**, № 5, 2014, с.71-78.
4. Коротовская С.В., Хлусова Е.И., Орлов В.В., Круглова А.А. Влияние морфологии структурных составляющих на механические свойства бейнитной стали для магистральных трубопроводов категории прочности K65 (X80) // **Проблемы черной металлургии**, №4, 2010, с.24-30.
5. Коротовская С.В., Хлусова Е.И., Орлов В.В., Круглова А.А. Сравнительные исследования фазовых превращений, структуры и свойств марганцево-никелевой стали после закалки с отпуском и термомеханической обработки // **Проблемы черной металлургии**, №4, 2010, с.60-67.
6. Коротовская С.В., Нестерова Е.В., Хлусова Е.И., Орлов В.В. Влияние параметров пластической деформации на формирование ультрамелкозернистой структуры в низколегированных бейнитных сталях // **Вопросы материаловедения**, №1, 2011, с 100-109.
7. **Патент № 2426800**. Способ производства штрипса для труб магистральных трубопроводов // Горынин И.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И., Орлов В.В., Ермакова С.В. и др. Бюллетень изобретений № 17 от 20.08.2011.
8. Коротовская С.В., Орлов В.В. Способы создания ультрамелкозернистых и субмикроструктурных структур в листовом прокате из низколегированных низкоуглеродистых сталей для трубопроводного транспорта // Сборник тезисов докладов X ежегодной конференции молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, 2011, с. 21.

9. Коротовская С.В., Орлов В.В. Создание новой системы легирования и технологии производства судостроительных сталей за счет формирования ультрамелкозернистой структуры // Сборник тезисов докладов XI ежегодной конференции молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, 2013, с. 30.
10. Ермакова С.В. (Коротовская С.В.), Хлусова Е.И., Орлов В.В., Круглова А.А. Сравнительные исследования структуры и свойств стали марганцево-никелевой композиции легирования после закалки с отпуском и термомеханической обработки // Сборник тезисов докладов VI ежегодной конференции молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, 2007, с. 28.
11. Ермакова С.В. (Коротовская С.В.), Круглова А.А., Хлусова Е.И. Влияние предварительной горячей пластической деформации и скорости охлаждения на фазовые превращения в низколегированной стали // Сборник тезисов докладов VII ежегодной конференции молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, 2008, с. 20.
12. Ермакова С.В. (Коротовская С.В.), Хлусова Е.И., Орлов В.В. Принципы формирования структуры и обеспечение работоспособности высокопрочных штрипсовых сталей повышенной эксплуатационной надежности // Сборник докладов XIV международной научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций», г. Санкт-Петербург, 2008, с. 265-273.
13. Ермакова С.В. (Коротовская С.В.), Хлусова Е.И., Орлов В.В. Структура и свойства высокопрочных штрипсовых сталей X70, X80 с повышенной эксплуатационной надежностью, изготавливаемых по технологии термомеханической обработки // Сборник тезисов докладов IX международной научно-технической конференции «Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых», г. Екатеринбург, 2008, с. 54-55.
14. Ермакова С.В. (Коротовская С.В.), Нестерова Е.В., Хлусова Е.И., Орлов В.В. Влияние термомеханических параметров на формирование наноструктурированных состояний в низколегированных сталях // Сборник тезисов докладов 4-ой международной школы «Физическое материаловедение», г. Тольятти, 2009, с. 36.
15. Ермакова С.В. (Коротовская С.В.), Хлусова Е.И., Орлов В.В. Создание фрагментированных наноструктурных состояний в объемных конструкционных материалах при пластической деформации // Сборник докладов Второго международного конкурса научных работ молодых ученых в области нанотехнологий, г. Москва, 2009, с. 397-398.

Подписано в печать «07» октября 2014г. Формат 60x48 1/16.

Печать - офсетная. Усл. п.л. 1,4. Уч.-изд. л 1,05.

Тираж 80 экз. Заказ № 2/133

Отпечатано в типографии ФГУП «ЦНИИ КМ "Прометей"

191015, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49

Лицензия на издательскую деятельность

Лр№ 020644 от 13 октября 1997