

ЮРЧЕНКО Александр Николаевич

**ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ, СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ СИСТЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ X2Г2С2МФС
РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА**

2.6.1 – Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov i spлавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель:

Симонов Юрий Николаевич

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Яковлева Ирина Леонидовна

доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории физического металловедения Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

Маковецкий Александр Николаевич

кандидат технических наук, начальник отдела труб энергетического комплекса и специальных видов труб ПАО«Трубная металлургическая компания», г. Челябинск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород

Защита состоится 15 марта 2024 года в 12.00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.13 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 345.

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

Автореферат разослан «09» февраля 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д ПНИПУ.05.13,

кандидат технических наук, доцент

Е. М. Федосеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В последние десятилетия и настоящее время не иссякает интерес к разработке и исследованию новых конструкционных сталей с мартенситно-бейнитной структурой, в том числе и сталей со структурой бескарбидного бейнита. Очевидно, что решающее влияние на механические свойства сталей оказывает соотношение объемных долей мартенсита и бейнита. Однако разделение мартенситной и бейнитной структуры требует использование дорогостоящих и трудоемких методов, в частности просвечивающей электронной микроскопии. В связи со всем сказанным, одной из фундаментальных задач современного металловедения является надежное разделение бейнита и мартенсита, поэтому поиску и разработке методик по разделению бейнита и мартенсита уделяется сейчас большое внимание. Особенно это важно в тех случаях, когда разрабатываются новые марки сталей, для которых необходимо построение диаграмм распада переохлажденного аустенита в области бейнитного/мартенситного превращений. Очевидно, что интерпретация дилатометрических кривых носит индивидуальный характер, поэтому требуется прибегать к металлографическому анализу, например, к цветной металлографии с использованием светового микроскопа. Помимо этого, применение поляризованного света после травления является перспективным методом для изучения бейнитно-мартенситной структуры. Кроме того, неотъемлемой частью анализа новых марок сталей является изучение взаимосвязи микроструктуры и механических свойств после проведения опытных режимов термической обработки, которая не должна наносить вред окружающей среде и персоналу. Поэтому использование термического оборудования именно с окислительной атмосферой является наиболее актуальным. Помимо этого, популярным и в то же время важным направлением является совершенствование старых или разработка новых сталей для деталей автомобильной промышленности. Легирование, которое используют для получения автомобильных сталей нового поколения, близко к экономному и состоит из таких элементов как: хром, марганец, кремний. Считается, что на базе такого химического состава и правильно подобранного режима термической обработки можно реализовать в сталях совершенно новый комплекс механических свойств, относящегося к сталям третьего поколения.

Ранее на кафедре «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» ФГАОУ ВО ПНИПУ были разработаны экономно легированные стали системы X2Г2С2МФ с мартенситно-бейнитной структурой. Данные стали могут послужить экспериментальным материалом для изучения вопросов, связанных с фазовыми превращениями, образованием бейнитно-мартенситной структуры в процессе непрерывного охлаждения и изотермических выдержек и влияния структуры на характеристики механических свойств.

Тематика диссертации соответствует Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ и Перечню критических технологий РФ. Работа выполнена в соответствии с основными направлениями научной деятельности кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» ПНИПУ, г. Пермь, по проекту № 11.8213.2017/8.9 в рамках базовой части государственного задания вузам в сфере научной деятельности при финансировании Минобрнауки России.

Степень разработанности темы исследования

Исследованию фазовых превращений, микроструктуры и характеристик механических свойств, построению термокинетических и изотермических диаграмм в сталях со структурой бейнита и мартенсита, сформировавшихся в процессе различных видов термической обработки, уделено большое внимание в трудах следующих отечественных и зарубежных ученых: В.М. Счастливцев с соавторами, А.Ю. Калетин с соавторами, Ю.Н. Симонов с соавторами, В.Е. Громов с соавторами, М.В. Майсурадзе с соавторами, А.А. Казаков с соавторами, А.Ю. Попелюх с

соавторами, В.В. Рыбин с соавторами, Н.К.Д.Н. Bhadeshia с соавторами, F.G. Caballero с соавторами, George Vander Voort с соавторами и другие.

В то же время в литературе недостаточно сведений о протекании бейнитного превращения ниже температуры начала мартенситного превращения, а также недостаточно информации об исследованиях бескарбидного бейнита низко- и среднеуглеродистых легированных сталей в поляризованном свете, нет единой методики по разделению бейнита и мартенсита с помощью светового микроскопа. Особенно это относится к новым еще не до конца изученным сталям типа X2Г2С2МФ, различные свойства которых напрямую зависят от будущей структуры. Данные аспекты определили выбор темы исследования, постановку цели и задач.

Цель работы – установление взаимосвязей структуры и механических свойств конструкционных сталей системы легирования X2Г2С2МФ с содержанием углерода, изменяющегося в пределах 0,20 – 0,45%, и выбор режимов термической обработки для установления возможности использования данных сталей в качестве автомобильных сталей третьего поколения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Выявить и изучить закономерности $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения и структурообразования в конструкционных сталях системы легирования X2Г2С2МФ при непрерывном охлаждении и в процессе промежуточного превращения в изотермических условиях.
2. Разработать новый способ выявления и количественной оценки доли бейнита в конструкционных сталях системы легирования X2Г2С2МФ с использованием светового микроскопа.
3. Установить закономерности влияния структуры на механические свойства сталей системы легирования X2Г2С2МФ после проведения термической обработки в печах с окислительной атмосферой.

Научная новизна работы:

1. Впервые выявлены и изучены закономерности $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в новых сталях системы легирования X2Г2С2МФ с содержанием углерода 0,20-0,45 % при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях. Установлено, что бейнитное превращение не может существовать отдельно от мартенситного даже при самых низких скоростях охлаждения.
2. Установлены в сталях типа X2Г2С2МФ закономерности влияния температуры нагрева, скорости охлаждения, температуры и длительности изотермической выдержки в печах с окислительной атмосферой на уровень прочности, пластичности, ударной вязкости и твердости.
3. Показано, что в конструкционных сталях типа X2Г2С2МФ применение поляризованного света позволяет разделять игольчатый бейнит и мартенсит после различных режимов термической обработки. Установлено, что изменение уровня яркости игольчатого бейнита, образованного в изотермических условиях в стали 44X2Г2С2МФ, происходит по синусоидальному закону с максимумом яркости каждые 45° , а для оценки полной доли игольчатого бейнита требуется проводить наложение изображений структуры при разных углах поворота образца.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Построены термокинетические и изотермические диаграммы в области бейнитного превращения аустенита сталей системы легирования X2Г2С2МФ, позволяющие применить научно-обоснованный подход к разработке и совершенствованию технологических процессов термической обработки с использованием печей с окислительной атмосферой в производственных условиях (апробирование подтверждено актом внедрения технических разработок ЗАО «СКБ», г. Пермь).

2. Разработаны способы выявления и количественной оценки игольчатого бейнита в конструкционных сталях типа X2Г2С2МФ (получены патенты РФ №2734878 от 23.10.2020 и № 2769111 от 28.03.2022).

3. Достигнутый уровень характеристик механических свойств сталей типа X2Г2С2МФ позволяет отнести их и использовать в качестве высокопрочных автомобильных сталей третьего поколения.

Методология и методы исследования

Методологической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых в области термической обработки бейнитных сталей, использования цветного травления и поляризованного света для выявления и определения доли структурных составляющих в смешанной структуре в легированных сталях с разным содержанием углерода, а также положения теории фазовых превращений для проведения дилатометрического анализа для построения диаграмм распада переохлажденного аустенита.

Для достижения поставленной цели и задач в диссертационной работе были использованы следующие методы: методика пробных закалок, дилатометрический анализ, световая, сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, дюротрический анализ, световой и электронный фрактографический анализ, испытания на одноосное растяжение и ударную вязкость, рентгеноструктурный анализ, количественный металлографический анализ.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Построенные с помощью комплексного подхода с использованием дилатометрического, металлографического и дюротрического методов диаграммы распада переохлажденного аустенита марок 22X2Г2С2МФ и 44X2Г2С2МФ при охлаждении с температуры полной аустенитизации (1000 °С) со скоростями от 100 до 0,03 °С/с.

2. Разработанные способы выявления и определения количества бейнита в сталях 22X2Г2С2МФ и 44X2Г2С2МФ с помощью светового микроскопа с использованием поляризованного света при скрещенных поляризаторе и анализаторе.

3. Научно обоснованные и экспериментально подтвержденные режимы термической обработки сталей 22X2Г2С2МФ и 44X2Г2С2МФ, позволяющие обеспечить требуемую структуру и уровень механических свойств после непрерывного охлаждения и изотермической закалки в печах с окислительной атмосферой с возможностью использования данных сталей в качестве автомобильных сталей третьего поколения.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции аспирантов и студентов "Актуальные проблемы современной науки и техники" (Пермь, 2015), на Всероссийской научно-практической конференции аспирантов и студентов "Фундаментальные и прикладные исследования в области материаловедения и машиностроения" (Пермь, 2015), на III и IV Международных научно-практических конференциях "Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (Пермь, 2016, 2019), на IV Русско-Китайском симпозиуме "Advanced Materials and Processing Technology" (Екатеринбург, 2016), на XVII Международной научно-технической Уральской школе-семинаре металловедов - молодых ученых (Екатеринбург, 2016), на XXIV Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического материаловедения сталей и сплавов» (Магнитогорск, 2018).

Степень достоверности результатов диссертации определяется применением комплекса современной экспериментальной техники и измерительных приборов, комплекса современных методов исследования и 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 18 научных работ, в том числе 2 в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus, 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, общего обсуждения, списка использованной литературы и 3-х приложений; изложена на 129 страницах, включает 42 рисунка, 11 таблиц. Список использованной литературы содержит 140 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, показана степень ее разработанности, сформулирована научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту, описан личный вклад соискателя, степень достоверности и апробация полученных результатов.

В **первой главе** приведен аналитический обзор литературных источников по исследуемой теме. Проведен анализ химического состава высокопрочных экономнолегированных сталей с бейнитной структурой. Рассмотрены фазовые превращения и структура высокопрочных экономнолегированных сталей. Описаны методы металлографического контроля экономнолегированных сталей с бейнитной структурой, а также их термическая обработка. Приведены свойства и применение конструкционных экономнолегированных высокопрочных сталей с бейнитной структурой. По результатам аналитического обзора сформулирована цель и задачи работы.

Во **второй главе** представлено описание материалов, методики обработки и исследования. В качестве материалов исследования выбраны конструкционные стали системы легирования X2Г2С2МФ: 22Х2Г2С2МФ (0,20% С; 2,36% Cr; 2,40% Mn; 2,06% Si; 0,39% Mo; 0,09% V; 0,33% Ni; 0,014% S; 0,022% P, основа Fe) и 44Х2Г2С2МФ (0,45% С; 2,31% Cr; 2,19% Mn; 2,18% Si; 0,36% Mo; 0,09% V; 0,31% Ni; 0,012% S; 0,015% P, основа Fe).

Для построения диаграмм распада переохлажденного аустенита и назначения режимов термической обработки определяли критические температуры A_{C_1} и A_{C_3} .

Дилатометрический анализ проводили на закалочном дилатометре Linseis L78 R.I.T.A. В первом случае нагрев образцов осуществляли с одинаковой $V_{НАГР} = 1,5^\circ\text{C}/\text{с}$, $T_{АУСТ}$ составляла 1000°C , $\tau_{ВЫД} = 900$ с при $T_{АУСТ}$, а $V_{ОХЛ}$ с $T_{АУСТ}$ находилась в диапазоне от 100 до $0,03^\circ\text{C}/\text{с}$. Температуры начала и завершения превращений определяли методом отрыва касательной к линейному участку зависимости изменения удлинения образца от температуры.

При изотермической обработке: $V_{НАГР} = 1,5^\circ\text{C}/\text{с}$, $T_{АУСТ} = 1000^\circ\text{C}$, $\tau_{ВЫД} = 900$ с, $V_{ОХЛ} = 1,5^\circ\text{C}/\text{с}$ до и после $T_{ИЗО}$ до комнатной температуры (T_K). $T_{ИЗО}$ для каждой стали были отличны: $T_{ИЗО} = 275-375^\circ\text{C}$, $\tau_{ВЫД} = 6$ ч для 22Х2Г2С2МФ; $T_{ИЗО} = 200-325^\circ\text{C}$, $\tau_{ВЫД} = 6$ ч для 44Х2Г2С2МФ.

Металлографический анализ проводили с использованием светового микроскопа Olympus GX-51, сканирующих микроскопов FEI PHENOM G2 ProX и Tescan Mira 3 и просвечивающего микроскопа FEI Tescan G2 30 S-TWIN. Для травления использовали три реактива: № 1 – Ниталь; № 2 – LePera; № 3 – 10 г безводного $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ + 3 г $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 100 мл дистиллированной воды. Изображения обрабатывали с помощью программно-аппаратных комплексов SIAMS 700 и Olympus Stream Motion 1.9, а также графического редактора Adobe Photoshop CS 5.

Термическую обработку образцов для оценки характеристик механических свойств осуществляли в печах сопротивления «НАКАЛ»: нагрев с печью до температур 880 °С (22Х2Г2С2МФ) и 860°С (44Х2Г2С2МФ) с последующим охлаждением на воздухе или с печью до комнатной температуры или до температур изотермических выдержек, которые находились в диапазоне 250-325°С. Завершающей операцией служил низкий отпуск при температуре 200 °С с выдержкой два часа.

Измерение микротвердости проводили на микротвердомерах Buehler Micromet 6040 и ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 при нагрузках 20 и 100 грамм. Оценку макротвердости проводили на твердомере ТК-2М по методу Роквелла (шкала «С») по ГОСТ 9013-59. Для определения характеристик прочности и пластичности использовали машины для статических испытаний P5 и INSTRON 5969 по ГОСТ 1497-84. Ударную вязкость KCV и KCU определяли с помощью маятникового копра КМ-30 по ГОСТ 9454–78. Для анализа поверхности разрушения использовали световой стереомикроскоп Olympus SZX16, а также сканирующие электронные микроскопы FEIPHENOM G2 ProX и Tescan Mira 3. Рентгеноструктурный анализ проводили для определения доли остаточного аустенита ($A_{ост}$) на дифрактометре ДРОН-3.

В **третьей главе** представлены результаты анализа фазовых превращений, структуры в процессе непрерывного охлаждения и в изотермических условиях, а также термокинетические и изотермические (в области бейнитного превращения) диаграммы распада переохлажденного аустенита.

Микроструктура сталей системы легирования Х2Г2С2МФ после непрерывного охлаждения с $T_{ауст} = 1000^{\circ}\text{C}$ преимущественно состоит из мартенсита и бейнита (рис. 1). Однако кроме мартенсита и бейнита могут наблюдаться следы избыточного феррита, участки М/А, феррито-карбидная смесь (ФКС), карбиды, которые могут располагаться по границам или внутри зерен бывшего аустенита.

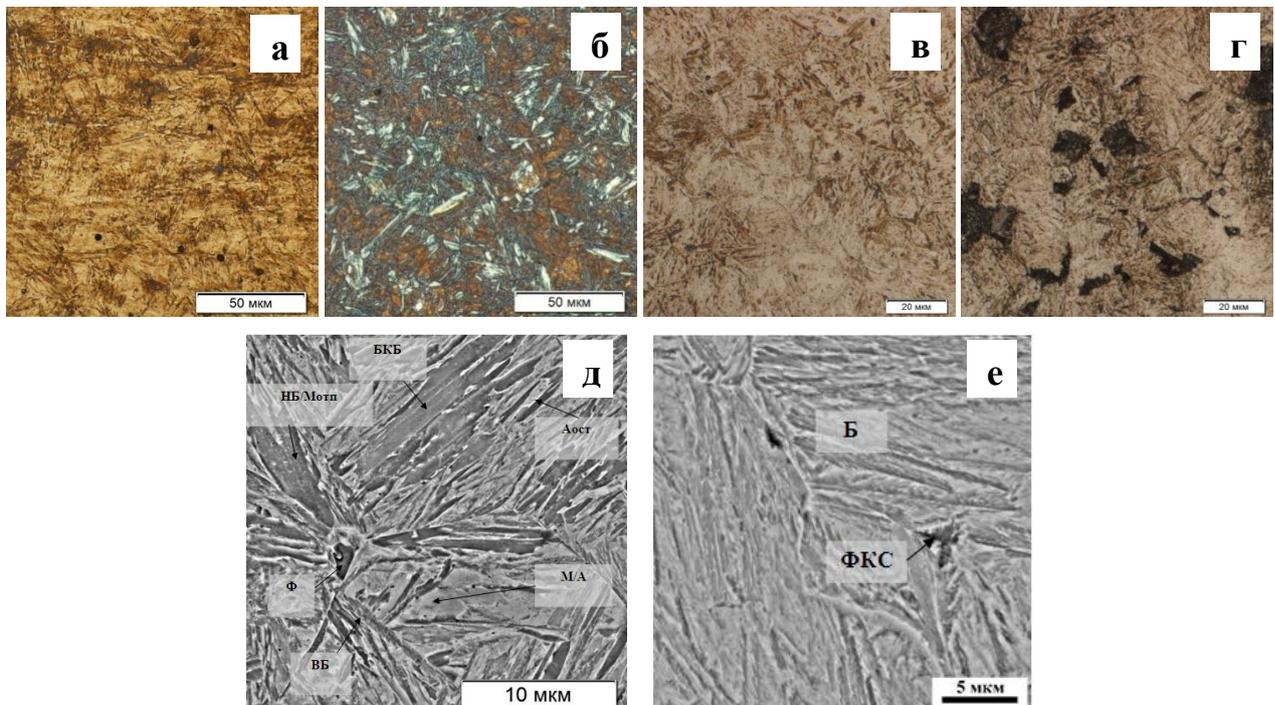


Рисунок 1 – Микроструктура сталей после непрерывного охлаждения: а-б, д – 22Х2Г2С2МФ; в-г, е – 44Х2Г2С2МФ; а – $V_{охл} = 1,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$; б, г-е – $V_{охл} = 0,05^{\circ}\text{C}/\text{с}$; в - $V_{охл} = 100^{\circ}\text{C}/\text{с}$. а-в – реактив (10 г безводного $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + 3 \text{ г } \text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5 + 100 \text{ мл}$ дистиллированной воды); в-е – реактив Ниталь

По результатам комплексного анализа, включающего дилатометрический, дюрOMETрический и металлографический методы, построены термокинетические диаграммы исследуемых сталей с температуры аустенитизации 1000 °С (рис. 2).

Из диаграмм следует, что охлаждение сталей со скоростью выше 0,3 °С/с позволяет подавить появление продуктов, образующихся по диффузионному механизму после нагрева на 1000 °С (рис. 2). В этом случае будет образовываться бейнитно-мартенситная структура с различным соотношением бейнита и мартенсита.

Общий уровень микротвердости увеличивается с повышением содержания углерода в стали. С понижением скорости охлаждения в рамках каждой марки микротвердость снижается. В целом уровень микротвердости сталей системы легирования Х2Г2С2МФ после непрерывного охлаждения с $T_{\text{АУСТ}} = 1000 \text{ °С}$ находится в соответствии со структурой, формирующейся в каждом конкретном случае.

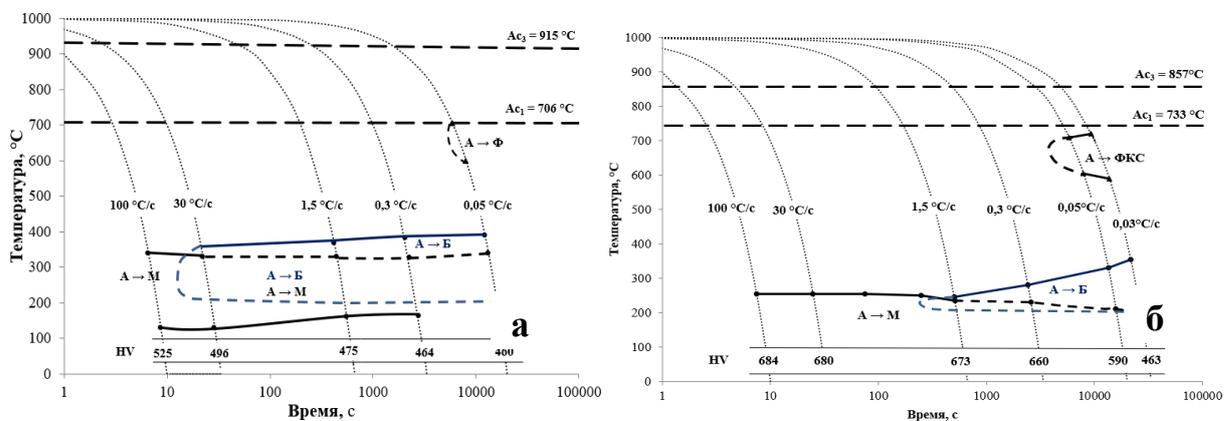


Рисунок 2 – Термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: а – 22Х2Г2С2МФ, б - 44Х2Г2С2МФ

Микроструктура всех сталей системы легирования Х2Г2С2МФ после проведения изотермической обработки при различных температурах изотермических выдержек состоит из бейнита, мартенсита и остаточного аустенита в различном соотношении в зависимости от содержания углерода в стали и $T_{\text{ИЗО}}$ (рис. 3).

Для более четкого идентифицирования структурных составляющих на сталях 22Х2Г2С2МФ и 44Х2Г2С2МФ было применено цветное травление, а также проведены электронно-микроскопические исследования. Микроструктура состоит из игольчатого бейнита с чередованием α - и γ -фазы, мартенсита и остаточного аустенита. К тому же бейнит является бескарбидным в связи с отсутствием карбидов в альфа-матрице бейнита (рис. 3, д, з). Синие участки, а также переходящие от синего к коричневому/бронзовому (рис. 3, а-б, е) являются бейнитом, что подтверждается значениями микротвердости: 350-370 HV_{0,05} (22Х2Г2С2МФ) и 380-400 HV_{0,05} (44Х2Г2С2МФ) соответствует бейниту, а 490-510 HV_{0,05} (22Х2Г2С2МФ) и 540-560 HV_{0,05} (44Х2Г2С2МФ) – мартенситу.

Общий вид диаграмм в области бейнитного превращения носит традиционный С-образный характер (рис. 4). Наибольшее количество изотермического бейнита в стали 22Х2Г2С2МФ формируется при $T_{\text{ИЗО}}$ вблизи $M_{\text{Н}}$, а в стали 44Х2Г2С2МФ наибольшее количество бейнита наблюдается при температуре изотермической выдержки, которая находится выше $M_{\text{Н}}$ на 60 °С.

В целом уровень микротвердости (рис. 4) увеличивается с 400 HV (22Х2Г2С2МФ) до 650 HV (44Х2Г2С2МФ) с повышением содержания углерода. С понижением $T_{\text{ИЗО}}$ в стали 22Х2Г2С2МФ уровень микротвердости снижается, что вызвано уменьшением или полным отсутствием свежезакаленного мартенсита, формирующегося после изотермической выдержки. В стали

44Х2Г2С2МФ с понижением $T_{\text{ИЗО}}$ увеличивается общий уровень микротвердости, что, скорее всего, стало результатом повышения микротвердости изотермического бейнита и снижением температуры начала образования мартенсита после изотермической выдержки.

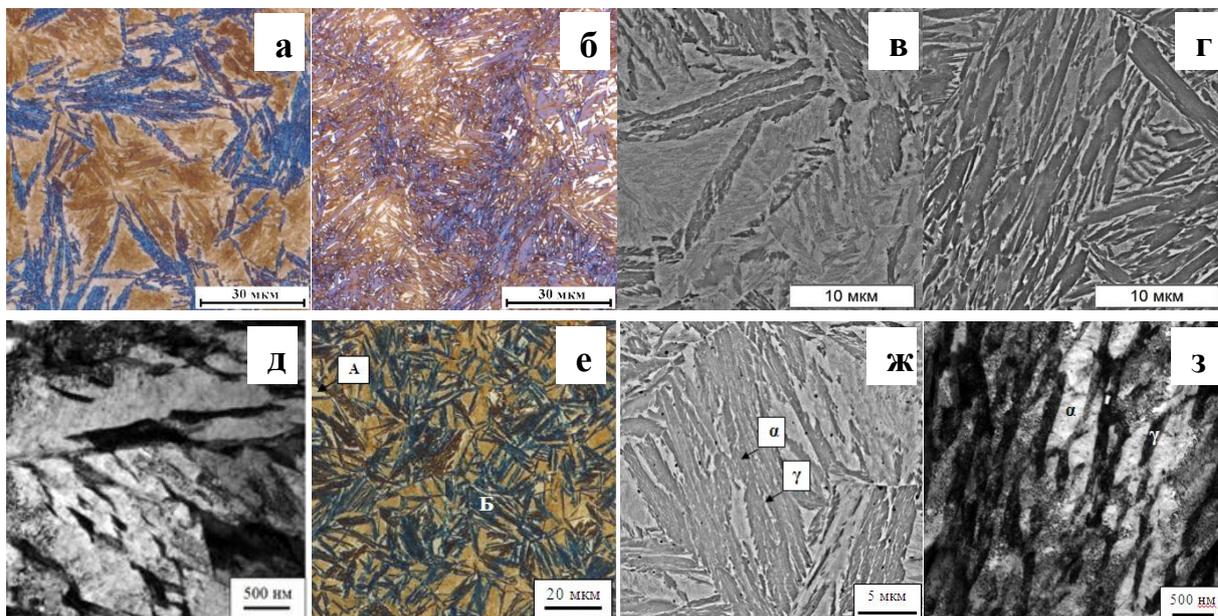


Рисунок 3 – Микроструктура сталей после изотермической обработки: а-д – 22Х2Г2С2МФ; е-з – 44Х2Г2С2МФ; а, в, д – $T_{\text{ИЗО}} = 375 \text{ } ^\circ\text{C}$; б, г - $T_{\text{ИЗО}} = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$; е-з - $T_{\text{ИЗО}} = 325 \text{ } ^\circ\text{C}$; а-б, е - реактив ЛеПерга; в-г, ж - реактив Ниталь; а-б, е – СМ; в-г, ж – СЭМ; д, з – ПЭМ

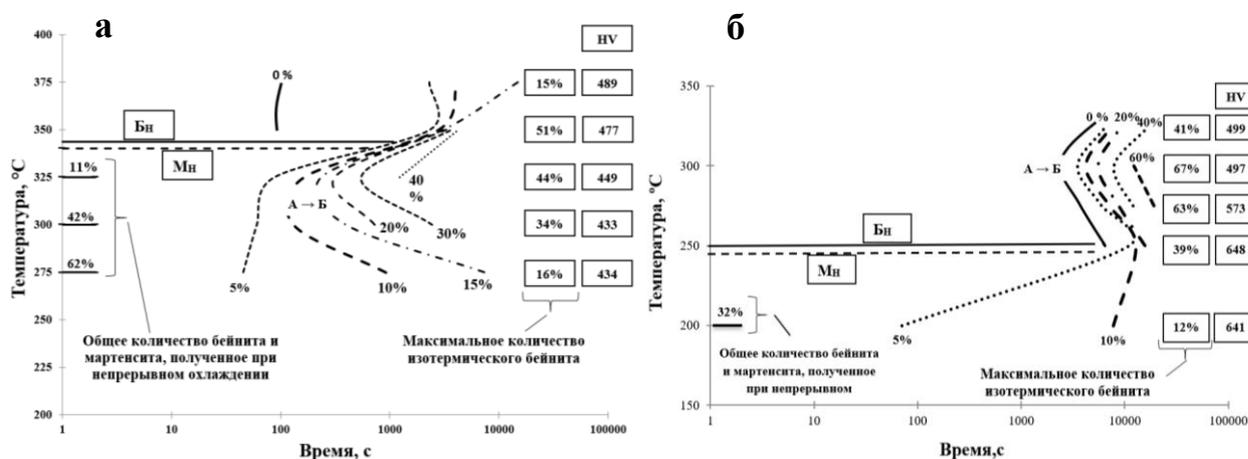


Рисунок 4 – Изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита в бейнитном интервале: а – 22Х2Г2С2МФ, б – 44Х2Г2С2МФ; $V_{\text{ОХЛ}} = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$; $T_{\text{АУСТ}} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$

Данные результаты были получены при финансовой поддержке при выполнении госбюджетных научно-исследовательских работ и внедрены на пермском предприятии ЗАО «СКБ», что подтверждено актом использования (внедрения) результатов диссертационной работы от 2019 года.

В **четвертой** главе представлены результаты разработки нового способа выявления и количественной оценки бейнита в конструкционных сталях системы легирования Х2Г2С2МФ с использованием светового микроскопа. Для разработки способа была использована сталь 44Х2Г2С2МФ после термической обработки в изотермических условиях.

Показано, что бейнит в стали 44Х2Г2С2МФ после травления в реактиве ЛеПерга в поляризованном свете является светлым (Пат. 2734878 РФ), но только при определенных углах поворота образца (рис. 5). Изменение уровня яркости каждого объекта структуры в пределах 0-90°

происходит по синусоидальному закону (рис. 6): каждые 45° наблюдается постепенная смена яркости бейнитных участков от максимума к минимуму и наоборот. Таким образом, для полного выявления и определения количества бейнита необходимо использовать не одно изображение, а все отснятые изображения структуры или как минимум два: 0° (образец поставили на столик микроскопа и не поворачивают) и 45° (образец поворачивают относительно нулевого угла на 45°). После соединения (наложения) изображений (начального и полученного после поворота на 45°) между собой расчет количества бейнита показал, что доля бейнита, вычисленная по светлополюсному изображению, взятого за эталон, совпадает с долей, определенной по новому способу. Новым отличительным признаком является то, что предлагаемый способ можно использовать для выявления и определения количества бейнита ниже температуры начала мартенситного превращения, что является весьма затруднительным при работе со светлополюсным изображением структуры (Пат. 2769111 РФ).

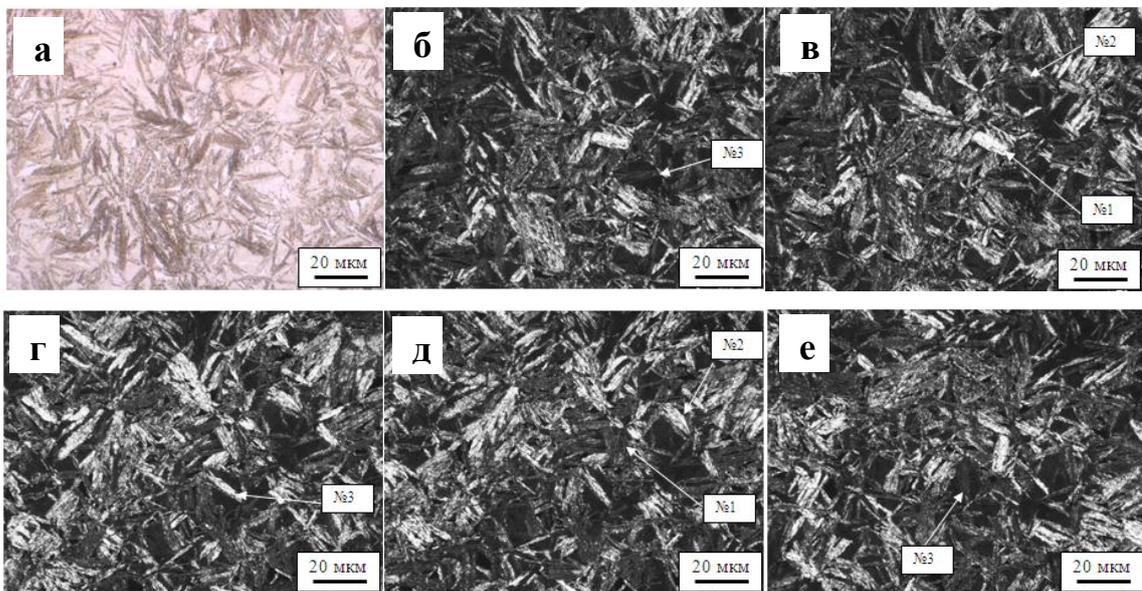


Рисунок 5 – Микроструктура стали 44X2Г2С2МФ ($T_{\text{ИЗО}} = 200-325^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{ВЫД}} = 6\text{ ч}$): а – светлое поле; б-е – поляризованный свет; б – 0° ; в – 15° ; г – 45° ; д – 60° ; е – 90°

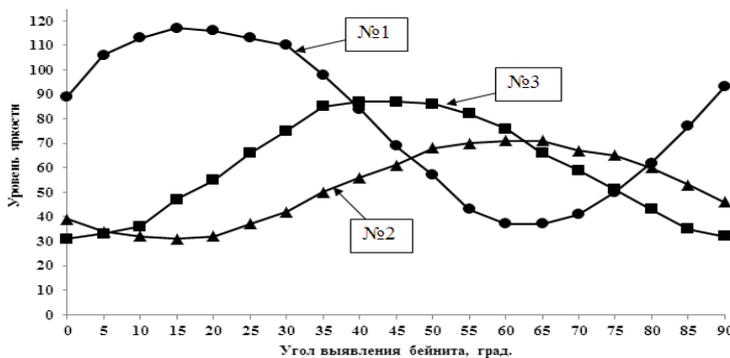


Рисунок 6 – Влияние угла поворота при выявлении бейнита на уровень яркости структурных объектов №1, №2 и №3

В результате расчета по запатентованному способу количество бейнита в данном случае в стали 44X2Г2С2МФ после изотермической закалки при $T_{\text{ИЗО}} = 325^\circ\text{C}$ составляет 42%, совпадающего с количеством бейнита, рассчитанного по светлополюсному изображению, но на 19% больше относительно способа, взятого за прототип (использование только поляризованного света без наложения изображений). Таким образом, точность выявления бейнита в данном случае по предложенному способу относительно прототипа увеличивается практически в 2 раза, а именно на 83%.

В пятой главе приведены результаты металлографического, фрактографического, рентгеноструктурного анализа, а также механических свойств после проведения опытных режимов термической обработки в печах с окислительной атмосферой.

Структура сталей, полученная после термической обработки в лабораторных печах, аналогична той, которая формируется в процессе термической обработки на dilatометре, что подтверждается качественным и количественным металлографическим анализом, в том числе и с использованием нового предложенного способа оценки доли бейнита, данные которой представлены в таблице 1.

Среди режимов окончательной термической обработки стоит выделить две группы: непрерывное охлаждение с температур аустенитизации и изотермическая обработка в области бейнитного превращения. Микроструктура исследуемых сталей после всех режимов термической обработки преимущественно состоит из мартенсита и бейнита. Поверхность разрушения ударных образцов имеет ярко выраженный смешанный характер разрушения: имеется скол, квазискол и ямочный рельеф.

Рентгеноструктурный анализ показал, что с повышением содержания углерода от 0,22 до 0,44 % происходит увеличение количества остаточного аустенита. Наибольшую стабилизацию аустенита обеспечивает изотермическая обработка при 300-325°C стали 44X2Г2С2МФ, которая приводит к получению 26-27 % остаточного аустенита. За счет повышенного содержания остаточного аустенита в процессе испытаний и эксплуатации возможно проявление TRIP-эффекта.

Таблица 1 – Механические свойства сталей системы легирования X2Г2С2МФ после непрерывного охлаждения и изотермической обработки

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	Ψ	KCV	KCU	HRC	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	Б, %	$A_{ост}$, %
	МПа		%		МДж/м ²					
<i>22X2Г2С2МФ</i>										
$T_{АУСТ} = 880^{\circ}\text{C}$, в-х	1311	1672	11,5	35,0	0,44	0,70	46	0,78	41	8
$T_{АУСТ} = 880^{\circ}\text{C}$, п	1276	1583	11,5	38,0	0,43	0,84	43	0,81	49	12
$T_{АУСТ} = 880^{\circ}\text{C}$, $T_{ИЗО} = 300^{\circ}\text{C}$ (6 ч)	1176	1613	16,5	43,0	0,38	0,70	44	0,73	33	13
<i>44X2Г2С2МФ</i>										
$T_{АУСТ} = 860^{\circ}\text{C}$, в-х	1480	2200	9,0	14,1	0,20	-	55	0,67	7	22
$T_{АУСТ} = 860^{\circ}\text{C}$, $T_{ИЗО} = 325^{\circ}\text{C}$ (6 ч)	940	1803	12,8	11,6	0,17	-	48	0,52	40	27
$T_{АУСТ} = 860^{\circ}\text{C}$, $T_{ИЗО} = 300^{\circ}\text{C}$ (6 ч)	980	1752	16,0	20,0	0,22	-	49	0,56	63	26
$T_{АУСТ} = 860^{\circ}\text{C}$, $T_{ИЗО} = 275^{\circ}\text{C}$ (6 ч)	1100	1871	14,2	21,0	0,21	-	50	0,60	60	19
$T_{АУСТ} = 860^{\circ}\text{C}$, $T_{ИЗО} = 250^{\circ}\text{C}$ (6 ч)	1000	1974	11,2	12,8	0,18	-	51	0,50	41	20
Примечание. После каждого режима обработки был проведен отпуск при 200 °С с выдержкой 120 мин и охлаждением на воздухе										

С точки зрения характеристик механических свойств изотермическая обработка является наиболее перспективной (табл. 1). Если нужна сверхвысокопрочная сталь с удовлетворительной пластичностью и ударной вязкостью, то нужно провести непрерывное охлаждение на спокойном воздухе с $T_{АУСТ} = 860^{\circ}\text{C}$ стали 44X2Г2С2МФ и получить: $\sigma_{0,2} = 1480$ МПа; $\sigma_B = 2200$ МПа; $\delta = 9$ %; $\Psi = 14,1$ %; $KCV = 0,2$ МДж/м².

Механические свойства, получаемые в стали 22Х2Г2С2МФ, практически не зависят от скорости охлаждения с температуры аустенинизации 880°С: сталь после охлаждения на воздухе имеет $\sigma_{0,2} = 1311$ МПа; $\sigma_B = 1672$ МПа; $\delta = 11,5$ %; $\Psi = 35$ %; KCV = 0,44 МДж/м²; KCU = 0,7 МДж/м², а после охлаждения с печью - $\sigma_{0,2} = 1276$ МПа; $\sigma_B = 1583$ МПа; $\delta = 11,5$ %; $\Psi = 38$ %; KCV = 0,43 МДж/м²; KCU = 0,84 МДж/м².

Необходимо отметить, ударная вязкость в стали 44Х2Г2С2МФ находится практически на одном уровне среди всех режимов термической обработки. Однако, все же, несколько бóльшие значения соответствуют изотермическим режимам с температурами изотермических выдержек 275 и 300 °С. В то же время после этих выдержек наблюдаются повышенные значения относительного удлинения и сужения, что говорит об оптимальном соотношении мартенсита, бейнита и остаточного аустенита.

В рамках решения третьей задачи также было установлено, что новые стали системы легирования Х2Г2С2МФ могут быть отнесены, и в будущем использованы в качестве автомобильных сталей третьего поколения, так как при определенных режимах термической обработки реализуется комплекс механических свойств, удовлетворяющий области третьего поколения автомобильных сталей диаграмм пластичности (рис. 7), взятых с мирового сайта автомобильной промышленности World Auto Steel. Стоит отметить, если отталкиваться только от диаграммы 2021 года, то сталь 44Х2Г2С2МФ имеет все шансы быть отнесена к новому классу автомобильных сталей, особенно, если увеличить пластичность, например, до 20 % при сохранении предела прочности на уровне 2000 и более МПа.

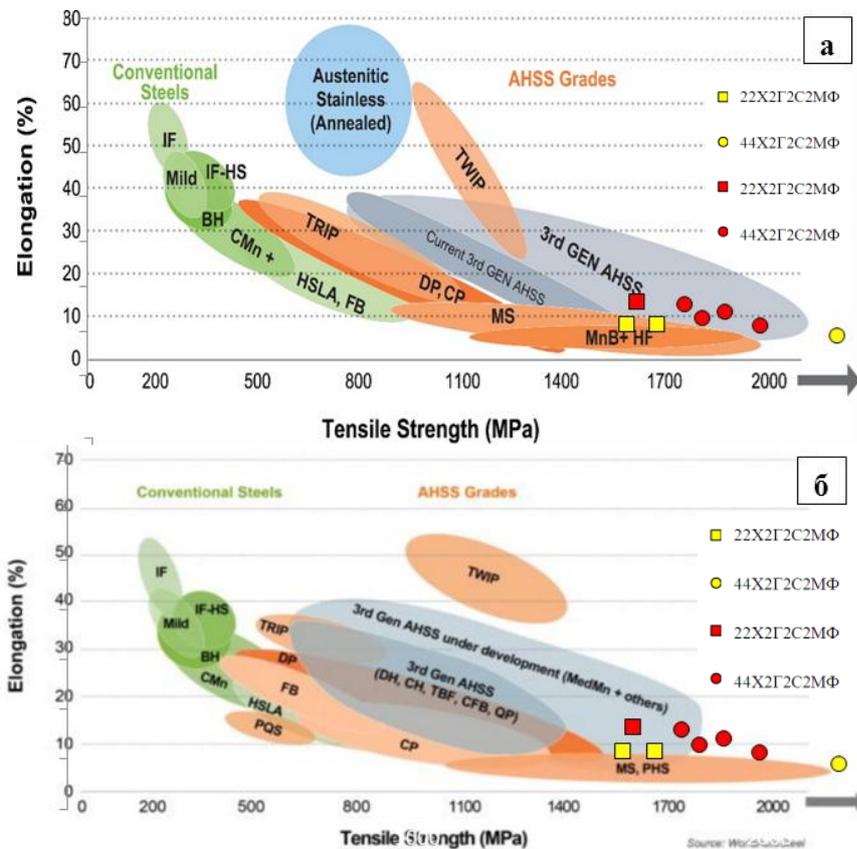


Рисунок 7 – Steel Strength Ductility Diagram (2017) (a) and The Global Formability Diagram (2021) (b) comparing strength and elongation of current and emerging steel grades с нанесенными на них экспериментальными результатами, полученными в настоящей работе. Желтые фигуры – непрерывное охлаждение; красные фигуры – изотермическая обработка

В качестве перспектив дальнейшей разработки данной тематики можно сформулировать следующие направления:

Разработка методики для более точного построения бейнитной области на термокинетической диаграмме распада переохлажденного аустенита, когда бейнитное превращение накладывается на мартенситное.

Применение новых способов, включающих использование поляризованного света, для построения зависимостей уровня яркости структурных объектов от скорости охлаждения и температуры изотермической выдержки стали с целью более точного разграничения не только бейнита и мартенсита, и различных морфологий бейнита.

Разработка новых режимов термической обработки, включающих изотермическую выдержку, для сталей системы легирования X2Г2С2МФ с целью получения структуры, повышающей комплекс свойств в заготовках/изделиях сечением более 50 мм.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Построены термокинетические и изотермические (в области бейнитного превращения) диаграммы распада переохлажденного аустенита сталей 22Х2Г2С2МФ и 44Х2Г2С2МФ. Из диаграмм следует, что бейнитное превращение не может существовать без мартенситного, а для подавления формирования в структуре сталей продуктов диффузионного превращения аустенита после нагрева на 1000 °С охлаждать изделия при термической обработке необходимо со скоростью выше 0,3 °С/с.

2. Установлено, что микроструктура исследуемых сталей системы легирования X2Г2С2МФ после непрерывного охлаждения с различными скоростями, а также – после изотермической обработки при различных температурах ИЗО, состоит из бейнита, мартенсита и остаточного аустенита в различном соотношении в зависимости от содержания углерода в стали, скорости охлаждения и $T_{ИЗО}$.

3. Разработаны способы выявления и количественной оценки доли игольчатого бейнита, образующегося в изотермических условиях в конструкционных сталях 22Х2Г2С2МФ и 44Х2Г2С2МФ с использованием поляризованного света. Способ количественной оценки доли игольчатого бейнита позволяет практически в два раза увеличить точность по сравнению с другими известными способами. На примере стали 44Х2Г2С2МФ выявлена в поляризованном свете зависимость уровня яркости бейнита от угла поворота образца. Изменение уровня яркости бейнита происходит по синусоидальному закону с наблюдающимся максимумом яркости каждые 45°.

4. Установлена взаимосвязь между микроструктурой и механическими свойствами в исследованных сталях. Бейнито-мартенситная структура, формирующаяся в стали 22Х2Г2С2МФ, способствует получению механических свойств, практически не зависящих от скорости охлаждения с температуры аустенитизации 880 °С и находятся на следующем уровне: $\sigma_{0,2} \approx 1300$ МПа; $\sigma_B \approx 1600$ МПа; $\delta \approx 11$ %; $\Psi \approx 35$ %; $KCV \approx 0,43$ МДж/м²; $KCU \approx 0,80$ МДж/м². Изотермическая обработка данной стали приводит к получению аналогичных механических характеристик. Термокинетическая и изотермическая обработка стали 44Х2Г2С2МФ приводит к получению высокопрочного состояния. Повышенное содержание бескарбидного изотермического бейнита наряду с повышенным содержанием остаточного аустенита, получаемое при изотермической закалке, приводит к реализации высокого уровня прочностных характеристик ($\sigma_{0,2} = 940-1100$ МПа; $\sigma_B = 1752-1974$ МПа) и повышенного уровня пластичности и надежности ($\delta = 11,2-16,0$ %; $\Psi = 11,6-20,0$ %; $KCV = 0,17-0,22$ МДж/м²).

5. По результатам оценки характеристик механических свойств установлено, что стали системы легирования X2Г2С2МФ могут быть отнесены и в будущем использованы в качестве

высокопрочных автомобильных сталей третьего поколения. Высокопрочная структура, дисперсность которой увеличивается с повышением углерода в стали, в новых исследуемых сталях образуется в результате непрерывного охлаждения и изотермической обработки в печах сопротивления с окислительной атмосферой, что позволяет получать предел прочности на уровне 1500-2200 МПа, а пластичность на уровне 9-16 %.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях:

1. Юрченко А.Н. Микроструктурные особенности, механические свойства и термическая обработка бейнитных сталей / А.Н. Юрченко, Ю.Н. Симонов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2016. – Т. 18, № 3. – С. 160-181. (перечень ВАК)
2. Юрченко А.Н. Изменение микроструктуры экономнолегированной стали в зависимости от скорости непрерывного охлаждения и температуры изотермической выдержки / А.Н. Юрченко, Д.О. Панов, Ю.Н. Симонов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2017. – Т. 19, №1. – С. 98-110.(перечень ВАК)
3. Юрченко А.Н. Определение критических температур A_{C1} и A_{C3} в сталях системы легирования X2Г2С2МФ с помощью дилатометрического метода и метода пробных закалок / А.Н. Юрченко, М.А. Мариева, Р.Д. Гребенкин, Ю.Н. Симонов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 85-92. (перечень ВАК)
4. Юрченко А.Н., Симонов Ю.Н. Применение поляризованного света для количественной оценки доли бейнита в стали 44X2Г2С2МФ после изотермической закалки. Часть 1/ Юрченко А.Н., Симонов Ю.Н. // Сталь. – 2023. – №1. – С. 45-50.(перечень ВАК)
5. Юрченко А.Н. Превращения, структура и свойства стали 22X2Г2С2МФ при непрерывном охлаждении / А.Н. Юрченко, Ю.Н. Симонов, Д.О. Панов, А.И. Житенев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2019. – № 10. – С. 33-37. (Scopus, перечень ВАК)
6. Юрченко А.Н. Превращения, структура и свойства стали 22X2Г2С2МФ при непрерывном охлаждении / А.Н. Юрченко, Ю.Н. Симонов, О.В. Ефимова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2019. – № 10. – С. 38-42.(Scopus, перечень ВАК)

Патенты:

7. Пат. 2734878 РФ. С23F 1/28, G01N 33/20. Способ выявления бейнита в стали / А.Н. Юрченко, Ю.Н. Симонов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», заявл. 16.12.2019; опубл. 23.10.2020 // Бюл. № 30. 12 с.
8. Пат. 2769111 РФ. G01N 33/20. Способ выявления бейнита в конструкционной стали / А.Н. Юрченко, Ю.Н. Симонов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», заявл. 09.04.2021; опубл. 28.03.2022 // Бюл. № 10. 15 с.

Научные труды, опубликованные в прочих изданиях:

9. Юрченко А.Н. Исследование переохлажденного аустенита стали 44X2Г2С2МФ в условиях непрерывного охлаждения / Д.О. Панов, А.Н. Юрченко, О.Н. Сосновская // Сборник тезисов III Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2016», г. Пермь, 2016. – С. 108-110.

10. Юрченко А.Н. Исследование структуры и механических свойств экономнолегированных бейнитных сталей / А.Н. Юрченко, Ю.Н. Симонов // Сборник тезисов III Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2016», г. Пермь, 2016. – С. 174-177.
11. Юрченко А.Н. Влияние содержания кремния и углерода на получение бейнитной структуры после различных режимов термической обработки / А.Н. Yurchenko // Сборник тезисов русско-китайского симпозиума «2016-ASRTU IN EKATERINBURG» [Electronicresource]: UralFederalUniv., Ekaterinburg, Russia, June 23-26. – 2016: abstractbook. – P. 89-90.
12. Юрченко А.Н. Исследование фазовых превращений и микроструктуры после изотермической закалки экономнолегированной стали 22Х2Г2С2МФ / А.Н. Юрченко, Д.О. Панов // Сборник материалов и докладов XVII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых Екатеринбург, 5-9 декабря 2016 г. <http://conf.tofm-urfu.ru/archive/2016>. – С. 97-101.
13. Юрченко А.Н. Механические свойства, микроструктура и фрактографический анализ сталей системы легирования Х2Г2С2МФ после различных режимов термической обработки / М.А. Мариева, А.Н. Юрченко, О.В. Ефимова // Сборник материалов и докладов XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых, г. Екатеринбург, 21-23 ноября 2017 г. <http://conf.tofm-urfu.ru/archive/2017>. – С. 610-613.
14. Юрченко А.Н. Выявление микроструктуры сталей системы легирования Х2Г2С2МФ методом цветного травления / О.В. Ефимова, А.Н. Юрченко, М.А. Мариева // Сборник материалов и докладов XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых, г. Екатеринбург, 21-23 ноября 2017 г. <http://conf.tofm-urfu.ru/archive/2017>. – С. 220-224.
15. Юрченко А.Н. Микроструктура и механические свойства сталей системы легирования Х2Г2С2МФ после различной термической обработки / А.Н. Юрченко // Сборник материалов XXIV Уральской школы металлургов-термистов, г. Магнитогорск, 19-23 марта 2018 г. – С. 76-77.
16. Юрченко А.Н. Определение критических температур A_{C1} и A_{C3} в сталях системы легирования Х2Г2С2МФ методом пробных закалок / Р.Д. Гребенкин, А.Н. Юрченко, М.А. Мариева // Материалы 4-й научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2019)», г. Пермь, 23-27 сентября 2019 г. – С. 72-74.
17. Юрченко А.Н. Исследование микроструктуры стали 44Х2Г2С2МФ после изотермической закалки в поляризованном свете / О.В. Ефимова, А.Н. Юрченко // Материалы 4-й научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2019)», г. Пермь, 23-27 сентября 2019 г. – С. 100-102.
18. Юрченко А.Н. Исследование количества остаточного аустенита в стали марки 44Х2Г2С2МФ при непрерывном охлаждении / М.А. Мариева, А.Н. Юрченко // Материалы 4-й научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2019)», г. Пермь, 23-27 сентября 2019 г. – С. 165-166.