

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по науке и инновациям НИУ «БелГУ», кандидат технических наук, доцент

В.В. Мишунин

«19» февраля 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» на диссертацию Юрченко Александра Николаевича на тему: «Фазовые превращения, структура и механические свойства конструкционных сталей системы легирования X2Г2С2МФ с разным содержанием углерода», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы диссертационного исследования

Развитие машиностроения, а также и автомобильной промышленности, приводит к ужесточению требований, предъявляемых к деталям и элементам конструкций, отвечающих за безопасность человека, что подразумевает разработку сталей третьего поколения с высоким комплексом механических свойств. Диссертационная работа Юрченко А.Н. посвящена решению актуальной задачи современного металловедения, связанной с разработкой новых экономно легированных сталей системы X2Г2С2МФ с бейнито-мартенситной структурой. В рамках решения данной задачи автор исследовал закономерности распада переохлаждённого аустенита при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях, разработал методику гарантированного выявления бейнита в сталях системы X2Г2С2МФ для выбора режимов термической обработки с гарантированным получением комплекса механических свойств, соответствующих высокопрочным автомобильным сталям третьего поколения.

Оценка содержания и структуры диссертационной работы

Все представленные материалы подготовлены в соответствии с требованиями, предъявляемыми к оформлению диссертаций и других документов на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание основных разделов диссертации.

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 использованных литературных источников содержит 140 наименований. Акт использования (внедрения) представлен в одном приложении на 2 страницах.

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** проведен аналитический обзор литературных источников по теме исследования. Проведен анализ подходов к легированию высокопрочных экономно легированных сталей с бейнитной структурой. Рассмотрены фазовые и структурные превращения в высокопрочных экономно легированных сталях. Описаны методы металлографического контроля экономно легированных сталей с бейнитной структурой, а также их термическая обработка. Приведены свойства и применение конструкционных экономно легированных высокопрочных сталей с бейнитной структурой. По результатам аналитического обзора сформулирована цель и задачи работы.

Во **второй главе** приведены основные методики и оборудование, применяемые при выполнении комплексных исследований фазовых превращений, структуры и свойств сталей.

В **третьей главе** на основании электронно-микроскопических, металлографических, дилатометрических и дюрOMETрических исследований построены термокинетические и изотермические (в области бейнитного превращения) диаграммы распада переохлажденного аустенита сталей системы легирования X2Г2С2МФ с содержанием углерода 0,20-0,45%. На основании диаграмм распада регламентированы скорости охлаждения изделий при термической обработке, позволяющие подавить формирование в структуре сталей продуктов диффузионного превращения аустенита. В этом случае будет образовываться бейнито-мартенситная структура с различным соотношением бейнита и мартенсита.

В **четвертой главе** представлены результаты разработки нового способа выявления и количественной оценки бейнитных структур в конструкционных сталях системы легирования X2Г2С2МФ с использованием светового микроскопа. Показано, что бейнит в исследованных сталях после травления реактивом ЛеПера при определенных углах поворота образца становится в поляризованном свете светлым, - это позволяет с высокой точностью проводить количественную оценку бейнито-мартенситной структуры.

В **пятой главе** приведены результаты металлографического, фрактографического, рентгеноструктурного анализа, а также механических испытаний после проведения опытных режимов термической обработки в печах с окислительной атмосферой. Показано, что при термической обработке в печах с окислительной атмосферой в сталях системы легирования

X2Г2С2МФ с содержанием углерода 0,22 и 0,44 наблюдается формирование бейнито-мартенситных структур с различным соотношением фаз, которое можно регулировать с помощью скорости охлаждения (воздух-печь) и температуры изотермической выдержки. Термическая обработка в печах с окислительной атмосферой позволяет получить сверхвысокопрочную конструкционную сталь 44X2Г2С2МФ с повышенной пластичностью и ударной вязкостью, а также высокопрочную сталь 22X2Г2С2МФ с повышенными характеристиками пластичности. Установлено, что новые стали системы легирования X2Г2С2МФ могут быть отнесены к автомобильным сталям третьего поколения.

В заключительной части диссертации сформулированы обобщающие выводы по выполненному исследованию.

Структура диссертации сформирована в соответствии с поставленными задачами.

Научная новизна работы. Автором получены следующие наиболее важные новые научные результаты:

- 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 может накладываться на мартенситное;

- установлены закономерности влияния температуры нагрева, скорости охлаждения, температуры и длительности изотермической выдержки на уровень прочности, пластичности, ударной вязкости и твердости сталей системы легирования X2Г2С2МФ с содержанием углерода 0,20-0,45% при обработке в печах с окислительной атмосферой;

- показано, что в конструкционных сталях системы легирования 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.

Практическая значимость работы. Значимость для производства заключается в следующем:

- построены термокинетические и изотермические диаграммы в области бейнитного превращения аустенита сталей системы легирования X2Г2С2МФ с содержанием углерода 0,20-0,45%, 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);

- 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);

- достигнутый уровень характеристик механических свойств сталей позволяет их использовать в качестве высокопрочных автомобильных сталей третьего поколения.

Обоснованность и достоверность научных результатов

Экспериментальные исследования выполнены с применением современных методов анализа структуры и свойств. Достоверность научных результатов, полученных в лабораторных условиях, подтверждена актом использования (внедрения) и патентами РФ.

Рекомендации по использованию работы

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать на металлургических, машиностроительных предприятиях, изготавливающих продукцию из бейнитно-мартенситных сталей, в которых соотношение мартенсита и бейнита играет решающую роль для получения конкретных механических свойств. Например, для изготовления стоек или лонжеронов легковых автомобилей.

Результаты, полученные Юрченко А.Н. в диссертационном исследовании, могут быть полезны в образовательном процессе технических университетов при подготовке специалистов по направлениям «Технологии материалов» и «Металлургия», а также при выполнении научно-исследовательских работ обучающихся.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе не приведено сравнение полученных результатов фазового анализа исследуемых сталей с работами других авторов, посвященных исследованию влияния изотермической обработки на фазовый состав сталей, схожих по химическому составу.

2. Насколько обоснованным является выбор времени выдержки при $T_{\text{изо}}$ для исследуемых сталей (6 часов)? Представленные автором результаты указывают, что бейнитное превращение в этих сталях при температурах выше M_n завершается приблизительно за 2000 секунд. При температурах ниже M_n отмечается ещё более высокая скорость распада аустенита, что связано с облегченным образованием бейнита на границах мартенсит/аустенит.

3. Неясно чем вызвано расхождение в количественной оценке долей остаточного аустенита представленных в таблицах 3.2, 3.4 и в таблице 5.2 в

тексте диссертации. Согласно таблице 5.2 количество Аост после изотермической обработки и отпуска стали 44X2Г2С2МФ составляет 19-27%, тогда как доля Аост в этой стали после изотермической обработки, представленная в таблице 3.4 варьируется от 14% до 24%. При этом известно, что отпуск может приводить к распаду остаточного аустенита, т.е. к уменьшению его объемной доли.

4. В главе 4 представлен метод определения доли бейнита с использованием светового микроскопа. Неясно, что в данном случае подразумевается под термином «Бейнит». Бейнитом принято называть микроструктуру, состоящую из продуктов промежуточного превращения, в том числе бейнитный феррит, остаточный аустенит и карбиды (при наличии). Автор так же отмечает, что «...Субструктура игл бейнита состоит из чередующихся реек α - и γ -фазы...» (с. 68 диссертации).

5. Поскольку α - фаза более подвержена травлению чем γ -фаза, можно предположить, что предложенный метод позволяет определить долю α - фазы (бейнитного феррита). В таком случае является ли достаточным разрешение оптического микроскопа для разделения тонких реек α - и γ -фазы в бейните?

Указанные замечания не изменяют общей положительной оценки выполненного диссертационного исследования, результаты которого представляют непосредственный интерес для промышленных предприятий и исследователей, занимающихся вопросами разработки новых сталей с уникальным комплексом механических свойств, соответствующих отраслевым приоритетам.

По актуальности темы, научной новизне, практической значимости, объему выполненных исследований представленная диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автореферат диссертации соответствует ее тексту и отражает содержание проведенных исследований и полученных результатов.

Полнота отражения основных положений диссертационного исследования в публикациях автора достаточная.

Выносимые автором на защиту результаты соответствует паспорту специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов: п. 1 «Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм), в том числе диаграммами состояния) с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов», п. 2 «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, включая технологические воздействия, и влияние сварочного цикла на металл зоны термического влияния, их моделирование и прогнозирование», п. 3 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния разнородных структур, в том числе кооперативного, на физические, химические, механические, технологические

и эксплуатационные свойства металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование», п. 4 «Теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий на изменение структуры и свойств металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование», п. 10 «Разработка новых и совершенствование существующих методов фазового, структурного и физико-химического анализов сплавов с учетом возможности цифровизации измерений».

Основные положения работы представлены и обсуждены 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).

Общее заключение о диссертационной работе

Представленная к защите диссертация Юрченко Александра Николаевича на тему: «Фазовые превращения, структура и механические свойства конструкционных сталей системы легирования X2Г2С2МФ с разным содержанием углерода» является законченной научно-квалификационной работой. Полученные результаты исследований представляют новые научно-обоснованные технические решения – термокинетические и изотермические (в области бейнитного превращения) диаграммы распада переохлажденного аустенита, позволяющие применить научно-обоснованный подход к разработке и совершенствованию технологических процессов термической обработки с использованием печей с окислительной атмосферой в производственных условиях. Разработанный способ выявления и количественной оценки бейнита в сталях системы легирования X2Г2С2МФ может быть перенесен на другие стали с подобным химическим составом, что в значительной степени упростит выявление бейнита в лабораторных условиях, исключая электронную микроскопию, кроме того, построение термокинетических и изотермических (в области бейнитного превращения) диаграмм позволит назначать точные режимы термической обработки для получения необходимых механических свойств. Вместе с тем результаты работы вносят значительный вклад в решение прикладных задач предприятий

машиностроительного комплекса и способствуют повышению конкурентоспособности металлопродукции.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а также требованиям Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденного приказом ректора ПНИПУ №4334В от 9 декабря 2021 г., а ее автор, Юрченко Александр Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Диссертационная работа А.Н. Юрченко обсуждена, отзыв на нее утвержден на заседании кафедры Материаловедения и нанотехнологии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ») (протокол заседания № 7 от «07» февраля 2024 г.).

Присутствовали на заседании 16 человек. Результаты голосования: «за» - 16 человек, «против» - 0 человек, «воздержались» - 0 человек.

Ответственный составитель:

Профессор кафедры
«Материаловедения и нанотехнологий»,
доктор технических наук, профессор
(05.16.01 – Металловедение и термическая обработка)

Салищев Геннадий Алексеевич

Заведующий кафедрой
«Материаловедения и нанотехно
Кандидат физико-математических наук, доцент

Тихонова Марина Сергеевна

15.02.2024г.

Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, тел. (4722) 30 1291

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»)