

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., доцента
кафедры материаловедения и технологии материалов
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»
Крыловой Светланы Евгеньевны
на диссертационную работу Кузнецовой Аллы Сергеевны
на тему: «Формирование структуры и свойств экономнолегированных
высокопрочных хладостойких сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА для тяжелой
подъемно-транспортной техники», представленную на соискание ученой
степени кандидата технических наук по научной специальности
05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы диссертационного исследования

В настоящее время одним из приоритетных направлений, определяющих стратегическое развитие Российской Федерации, является создание новых конкурентоспособных материалов, обеспечивающих эффективную работу тяжелой подъемно-транспортной техники в экстремальных условиях Крайнего Севера, что объясняется необходимостью освоения природных ресурсов приполярных районов и Арктического шельфа страны. Особенности условий эксплуатации подобной техники в северных регионах диктуют необходимость соответствия разработанных материалов сложносочетаемым требованиям, включая повышенную прочность, хладостойкость от - 40 до - 60 °С, удовлетворительную свариваемость, технологичность и долговечность конструкций. Не менее важным условием со стороны предприятий машиностроительного комплекса является снижение себестоимости готового высокопрочного металлопроката с одновременным обеспечением регламентированного комплекса свойств.

Одним из путей решения данной задачи, является создание сталей с минимальным легированием и соответствующей рациональной термической обработкой. При этом вопрос выбора экономного химического состава в сочетании с режимами термической обработки, обеспечивающими достижение одновременно и высоких значений прочностных характеристик, и хладостойкости, за счет формирования мелкодисперсной структуры стали, в данном случае является наиболее актуальным.

В диссертационной работе Кузнецовой Аллы Сергеевны «Формирование структуры и свойств экономнолегированных высокопрочных хладостойких сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА для тяжелой подъемно-транспортной техники» проведено исследование, направленное на рациональный выбор составов новых экономнолегированных хладостойких сталей классов прочности 700 МПа и 900 МПа для изготовления деталей грузовых автомобилей и оборудования карьерной техники. Определены режимы термической обработки предложенных сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА, позволяющие получить заданный уровень механических свойств, за счет формирования дисперсной структуры.

Выбор систем экономного

Зарегистрировано в Отделе делопроизводства
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

№ _____

Дата регистрации 25.02.2022

Фамилия регистратора _____

легирования высокопрочных хладостойких сталей выполнен с учетом себестоимости готовой продукции и соответствия углеродному эквиваленту.

Автором изучены особенности структурно-фазовых превращений на каждом этапе формирования свойств разработанных сталей, что дает целостное понимание влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства экономнолегированных высокопрочных хладостойких сталей. Приведен полный анализ и описание получаемых структур в процессе производства и термического упрочнения, что позволило установить характер фазовых превращений при распаде переохлажденного аустенита в разработанных сталях. На основе изучения структурно-фазового состава и поведения микролегирующего комплекса разработанных сталей, а также определения рациональных режимов термической обработки, обеспечивающих гарантированное достижение требуемых прочностных характеристик, выданы рекомендации для промышленного производства высокопрочного листового проката из новых экономнолегированных хладостойких сталей.

Учитывая вышеизложенное, тема диссертационной работы «Формирование структуры и свойств экономнолегированных высокопрочных хладостойких сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА для тяжелой подъемно-транспортной техники» Кузнецовой Аллы Сергеевны актуальна, проведенные исследования востребованы и полезны для теоретического и практического использования.

Актуальность работы подтверждается ее соответствием тематике комплексного проекта по разработке и внедрению инновационного процесса производства ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката для импортозамещения материалов, в том числе из криогенных сталей, используемых в условиях сверхнизких критических температур, повышенной коррозионной активности, а также в арктических широтах (Договор от 03.03.2017 № 03.G25.31.0235), а также тематике, реализуемой при поддержке гранта Президента РФ по созданию новых конкурентоспособных материалов, обеспечивающих эффективную работу машиностроительного комплекса в экстремальных условиях Крайнего Севера (Соглашение №075-15-2020-205 от 17.03.2020 г. (вн. № МК-1979.2020.8)).

Структура и содержание диссертационной работы, ее завершенности и качества оформления. Соответствие публикаций и автореферата основным положениям диссертации

Рукопись диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, изложена на 140 страницах текста, содержит 45 иллюстраций, 25 таблиц, 2 приложения, 164 источника литературы.

Диссертация оформлена по общепринятой структуре.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана степень её разработанности, сформулированы научная проблема и цель исследования, перечислены задачи исследования, сформулирована научная новизна работы, описана практическая значимость работы, определены положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности, приведены сведения об апробации результатов исследования.

В **первой главе** соискателем проведен анализ литературных источников по тематике диссертации. Изучены требования потенциальных потребителей к высокопрочному листовому прокату из хладостойкой стали для тяжело нагруженных сварных конструкций подъемно-транспортной техники, что позволило определить комплекс свойств разрабатываемых сталей.

Выполнен обзор вариантов легирования сталей аналогичного назначения, позволивший определить целевой качественный базовый химический состав, допустимые интервалы содержания углерода и легирующих элементов, допустимое содержание вредных примесей во разрабатываемых высокопрочных и хладостойких сталях. Указаны требования и особенности формирования структуры в экономнолегированных сталях, отмечено влияние режимов термической обработки на структуру и свойства сталей в зависимости от содержания углерода и легирующих элементов.

В работе проанализировано 164 источника, включая книги и статьи, причем большинство рассмотренных работ были опубликованы в течение последних 10 лет.

Во **второй главе** представлены материал и методы исследования, используемые автором в диссертационной работе. Соискатель применяет многочисленные разнообразные методы получения и исследования структуры и свойств, разработанных экономнолегированных сталей, используя современное научно-производственное оборудование, включающее комплекс «Термодеформ-МГТУ», а также исследовательское оборудование, включающее световые, растровые и просвечивающие микроскопы, оборудование для механических испытаний, программы анализа изображения, анализ фазового состава.

Хотелось бы отметить, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне с использованием самых современных экспериментальных методов исследования (в частности, с применением рентгеноструктурного анализа, высокоразрешающей растровой и просвечивающей электронной микроскопией и др.).

В **третьей главе** содержатся экспериментальные результаты работы по выбору базового химического состава для новых экономнолегированных сталей, применяемых в изготовлении ответственных конструкций подъемно-транспортной техники. Для определения экономически эффективных систем легирования автором осуществлено последовательное варьирование содержания легирующих элементов с оценкой механических характеристик, соответствия углеродному эквиваленту, с учетом себестоимости стали.

Установлено, что наилучшее сочетание механических свойств, хладостойкости, углеродного эквивалента и себестоимости обеспечили химические композиции на базе систем легирования Mn–Si–B–Mo для класса прочности 700 МПа и Mn–Si–B–Ti–Ni для класса прочности 900 МПа. Новые экономнолегированные стали замаркированы автором, как сталь 20Г2СМРА для класса прочности 700 МПа и сталь 16ГНТРА для класса прочности 900 МПа. Показана технологичность новых материалов на стадии выплавки и кристаллизации, а также на стадии получения и термической обработки горячекатаного листового проката.

По результатам оценки механических свойств, хладостойкости, углеродного эквивалента и себестоимости полученных сталей, доказано, что предложенные системы легирования полностью удовлетворяют сложносочетаемым требованиям, предъявляемым к высокопрочным хладостойким сталям.

В четвертой главе диссертации представлены результаты определения закономерностей и кинетики фазовых превращений в процессе распада переохлажденного аустенита в новых сталях, проанализированы условия формирования и установлены морфологические особенности микроструктуры сталей с предложенными системами экономного легирования.

Для выбранных химических составов стали 20Г2СМРА и 16ГНТРА на основе результатов дифференциальной сканирующей калориметрии и дилатометрического анализа впервые были определены положения температур критических точек при нагреве, построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита, выявлены температурно-временные интервалы структурно-фазовых превращений при охлаждении, определены температуры начала мартенситного превращения, рассчитаны критические скорости закалки. Впервые получены структурные диаграммы сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА, характеризующие влияние скорости охлаждения на объемную долю структурных составляющих.

Полученные данные о структурно-фазовых превращениях в новых разработанных высокопрочных экономнолегированных сталях 20Г2СМРА и 16ГНТРА, позволили установить характер фазовых превращений, выявить качественные и количественные характеристики структуры при распаде переохлажденного аустенита, а также обоснованно разработать для новых материалов режимы термического упрочнения.

В пятой главе представлено исследование влияния температурных режимов закалки и отпуска на структуру, прочностные характеристики и значения хладостойкости разработанных сталей, с целью выбора наиболее рационального способа термической обработки, обеспечивающего наилучшее сочетание искомым свойств.

Автором выявлено, что требуемый уровень прочности и хладостойкости в закаленной стали 20Г2СМРА обеспечивается за счет формирования преимущественно мелкодисперсного реечного мартенсита (более 80 %) с незначительной долей остаточного аустенита около 1 %, а также за счет образования субзеренной структуры α -фазы и карбидных частиц цементитного типа Fe₃C и (FeMn)₃C, размером от 20 до 150 нм - при отпуске. Для стали 16ГНТРА определено, что регламентированный комплекс свойств также формируется преимущественно за счет мелкодисперсного реечного мартенсита с небольшими прослойками остаточного аустенита ~ 1 %, участков высокотемпературного мартенсита и мелкодисперсных частиц карбидной фазы (цементита), выделившихся в процессе самоотпуска.

По результатам комплекса исследований были разработаны технологические рекомендации для промышленного производства новых экономнолегированных высокопрочных хладостойких сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА в условиях ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Результаты сдаточных испытаний опытных партий листового проката показали, что разработанный новый химический состав сталей и режимы термической обработки – обеспечили достиже-

ние комплекса свойств в соответствии с целями и задачами выполненного исследования. Полученные результаты подтверждены актами промышленных испытаний.

В **заключении** сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы.

В **приложениях** приведены:

- акт внедрения результатов диссертационной работы Кузнецовой А.С. в практику промышленного производства в условиях ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск;

- акт об использовании результатов диссертационной работы Кузнецовой А.С. в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Таким образом, содержание диссертации охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается следующими обстоятельствами:

- системностью, последовательностью, согласованностью, логичностью и непротиворечивостью изложения результатов;

- обоснованностью актуальности темы исследования, структуры диссертации, концепции и программы исследования;

- взаимоувязанной методологической платформой и концептуальными решениями;

- взаимосвязью основной идейной линии, частных и общих выводов.

В целом работа обладает научной новизной и практической значимостью, выполнена на высоком методическом и теоретико-экспериментальном уровне.

Содержание автореферата объёмом 1 печатный лист соответствует содержанию диссертации; в автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации, показан вклад автора в проведённое исследование, степень новизны и практическая значимость результатов исследований.

Научная новизна и практическая значимость результатов диссертационных исследований

Научную новизну диссертационной работы Кузнецовой Аллы Сергеевны можно сформулировать следующим образом:

1. Обоснованы системы экономного легирования и предложены новые химические составы высокопрочных хладостойких сталей, содержащих (мас. %):

- 0,20 С, 0,55 Si, 1,6 Mn, 0,3 Mo, 0,004 В (сталь 20Г2СМРА);

- 0,15 С, 0,22 Si, 1,3 Mn, 0,5 Ni, 0,023 Ti, 0,004 В (сталь 16ГНТРА), обеспечивающие достижение классов прочности 700 МПа и 900 МПа, соответственно, с учетом снижения себестоимости готовой продукции и соответствия углеродному эквиваленту.

Получены новые структурные диаграммы сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА, характеризующие влияние скорости охлаждения на объемную долю структурных составляющих.

Впервые определены положения температур критических точек при нагре-

ве, построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита, выявлены температурно-временные интервалы структурно-фазовых превращений при охлаждении, рассчитаны критические скорости закалки, позволяющие обоснованно рекомендовать режимы термической обработки для новых материалов.

Показано, что достижение высоких прочностных характеристик в сочетании с низкотемпературной ударной вязкостью обеспечивается за счет формирования: в стали 20Г2СМРА преимущественно мелкодисперсного реечного мартенсита с небольшими прослойками остаточного аустенита при закалке; субзеренной структуры α -фазы и высокодисперсных карбидных частиц при отпуске; в стали 16ГНТРА – мелкодисперсного реечного мартенсита с небольшими прослойками остаточного аустенита при закалке.

Наибольшую значимость для практики имеют следующие результаты диссертационной работы:

1. Разработаны с учетом ценовой составляющей новые высокопрочные стали повышенной хладостойкости, условно обозначенные 20Г2СМРА и 16ГНТРА, обеспечивающие достижение следующего комплекса механических свойств, не уступающего мировым аналогам:

- для стали 20Г2СМРА: $\sigma_{0,2} \geq 700$ МПа, $\sigma_b = 750-950$ МПа, $\delta \geq 14$ %, $KCV_{-60} \geq 34$ Дж/см² при $C_{экр} \leq 0,53$;

- для стали 16ГНТРА: $\sigma_{0,2} = 900-1200$ МПа; $\sigma_b \geq 1100$ МПа, $\delta \geq 10$ %, $KCV_{-40} \geq 21$ Дж/см², $НВW \geq 380$ при $C_{экр} \leq 0,44$.

2. На основании полученных качественных и количественных закономерностей формирования структуры и свойств новых экономнолегированных сталей обоснованы режимы упрочняющей термической обработки (для стали 20Г2СМРА – закалка от температуры 860 °С и последующий отпуск при температуре 600 °С, для стали 16ГНТРА – закалка от температуры 850 °С), позволяющие получить гарантированный комплекс свойств.

3. Рекомендованы химические составы и режимы термической обработки применительно к условиям производства в ПАО «ММК» листового проката классов прочности 700 МПа и 900 МПа из экономнолегированных хладостойких сталей, предназначенных для изготовления изделий подъемно-транспортной техники, в том числе эксплуатируемой в условиях низких климатических температур.

Достоверность научных положений и рекомендаций

Полученные результаты диссертационной работы не противоречат имеющимся данным других исследователей и современным теоретическим представлениям металловедения и термической обработки. Степень достоверности основных результатов подтверждается применением современных методов исследования и корректной постановкой цели и задач исследования, основанных на использовании действующих требований к структуре, эксплуатационным свойствам и технологии производства листового проката классов прочности 700 МПа и 900 МПа из экономнолегированных хладостойких сталей.

По теме диссертации **опубликовано** 17 научных публикаций, в т.ч. 7 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 4 статьи проиндексированы в наукометрической базе Scopus, что свидетельствует о новизне результатов исследования и об ознакомлении её широким кругом научной и инженерно-технической общественности.

Результаты апробации диссертационной работы подтверждаются представлением и обсуждением на школах семинарах и конференциях различного уровня, в том числе на международной молодежной научно-технической конференции Magnitogorsk Rolling Practice (2018, 2020 гг.), International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology (RusMetalCon 2020) (г. Челябинск, 2020 г.), на 78-ой, 79-ой Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2020, 2021гг.), Всероссийской научно-технической конференции «Вопросы металловедения и термической обработки в машиностроении» (г. Москва, 2021 г.), Международной научно-технической конференции «ПромИнжиниринг-2021» (ICIE-2021) (г. Сочи, 2021).

Оценка содержания и оформления диссертации

Диссертация изложена грамотным научным языком, обладает единством и логикой построения, полностью раскрывает сущность выполненного исследования, содержит теоретические обоснования полученных автором результатов и описание их практической реализации, оформлена в соответствии с установленными требованиями. Полученные результаты и выводы соответствуют поставленным в диссертации цели и задачам. Тема и содержание диссертации соответствуют научной специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

В диссертации отсутствуют заимствованные материалы без ссылок на авторов и источники заимствования.

Замечания

1. Выбор оптимального химического состава осуществлен без применения методов математической статистики, что позволило бы наглядно продемонстрировать оптимумы содержания легирующего комплекса, показать приемлемые интервалы варьирования элементов, оценить их комплексное влияние на свойства. Очевидно, что автор в работе столкнулся с многофакторным экспериментом, не все варианты которого проработаны. Таблицы 3.1 и 3.4 содержат по 5 вариантов опытных составов для каждой разрабатываемой марки, которые базируются на базовых теоретических основах металловедения и металлургии и имеющемся опыте их получения и применения, однако с учетом введения нескольких микродобавок одновременно (3 и 4 фактора соответственно) и зависимости от них целого комплекса свойств, математика бы позволила более доказательно определить химический состав искомого материала без дополнительных опытных плавок (по контрольным точкам матрицы планирования эксперимента).

2. Лабораторные условия выплавки значительно отличаются от производственных (использование Армко-железа, некоторых легирующих добавок в чистом виде, вакуумная плавка, малые объемы расплава и др.), что создает определенные трудности «попадания» в разработанный состав, особенно при микролегировании. Чем подтверждена сопоставимость результатов формирования структуры лабораторной и опытной промышленной партии на стадии кристаллизации и термической обработки? Выданы ли какие-либо рекомендации к промышленной выплавке с учетом вышеуказанных факторов?

3. Зафиксированы ли были точки M_k в новых сталях? Это позволило бы дополнительно обосновать количество $A_{ост}$ в пределах 1% для обеих сталей. А так, возникает вопрос, почему при разном легирующем комплексе и содержании углерода одинаковое количество аустенита? С какой погрешностью его определяли?

4. В работе отсутствуют данные по определению прокаливаемости разработанных сталей. До какого сечения справедливы будут заявленные свойства? Чем это подтверждено?

5. Не приведено обоснование отсутствия отпуска у стали 16ГНТРА.

6. В работе отсутствует четкое объяснение влияния 0,3 % Mo на структурообразование и механизм упрочнения (твердорастворное, карбидное упрочнение?) выбранной стали 20Г2СМРА на стадии получения и термической обработки. Рентгенофазовый анализ и просвечивающая микроскопия зафиксировала только карбиды цементитного типа? Какие соединения образует Mo? С какой точки зрения его введение необходимо и оправданно?

7. Одним из параметров выбора оптимального состава сталей заявлена экономическая целесообразность. Однако ни в выводах, ни в пункте про промышленную апробацию не отмечено, удалось ли с экономической точки зрения решить задачу? Какой экономический эффект это принесло?

Заключение

Указанные замечания не снижают ценности и значимости выполненных исследований, носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку работы, отражающую ее актуальность, научную новизну и практическое использование результатов при производстве листового проката классов прочности 700 МПа и 900 МПа из экономнолегированных хладостойких сталей для эффективной работы тяжелой подъемно-транспортной техники, в том числе в экстремальных условиях Крайнего Севера.

Диссертация Кузнецовой Аллы Сергеевны на тему: «Формирование структуры и свойств экономнолегированных высокопрочных хладостойких сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА для тяжелой подъемно-транспортной техники» является завершенной научно-квалификационной работой. Основываясь на проведенных исследованиях, автор решает актуальные научные задачи, связанные с выбором систем экономного легирования, разработкой новых высокопрочных хладостойких сталей и режимов их термической обработки, обеспечивающих достижение заданного уровня механических свойств с учетом себестоимости готовой продук-

ции и рекомендаций для промышленного производства высокопрочного листового проката.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Автор диссертационной работы - Кузнецова Алла Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент
Доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры материаловедения
и технологии материалов
ФГБОУ ВО «Оренбургский
государственный университет»

Крылова Светлана Евгеньевна
«24» 02 2022 г.

Шифр научной специальности: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

460018, г. Оренбург,
просп. Победы, д. 13
Тел: +7 9068368537
E-mail: krilova27@yandex.ru

Подпись и данные места работы С.Е. Крыловой заверяю:

Подпись Крыловой С.Е.
заверяю
Ведущий специалист по
документационному обеспечению
работы с персоналом
Дмитриченко

