

На правах рукописи



Кузнецова Алла Сергеевна

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ
СТАЛЕЙ 20Г2СМРА И 16ГНТРА ДЛЯ ТЯЖЕЛОЙ
ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

Специальность 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Полецков Павел Петрович

Официальные оппоненты: **Крылова Светлана Евгеньевна**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет», кафедра материаловедения и технологии материалов, профессор (г. Оренбург).

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 автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Защита состоится «15» марта 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.111.05 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, проспект Ленина 38, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте: <https://www.magtu.ru/>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Полякова Марина Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из приоритетных направлений, определяющим стратегическое развитие Российской Федерации, является создание новых конкурентоспособных материалов, обеспечивающих эффективную работу тяжелой подъемно-транспортной техники в экстремальных условиях Крайнего Севера. Это обусловлено необходимостью освоения природных ресурсов приполярных районов и Арктического шельфа страны.

Особенности условий эксплуатации в северных регионах тяжело-нагруженных сварных конструкций подъемно-транспортной техники диктуют необходимость применения материалов со сложносочетаемыми требованиями:

- высокопрочные хладостойкие стали класса прочности 700 МПа для изготовления деталей грузовых автомобилей и прочей техники (предел текучести более 700 МПа, временное сопротивление 750-950 МПа, относительное удлинение более 14%, ударная вязкость при температуре -60°C более 34 Дж/см^2 при углеродном эквиваленте не более 0,53);

- высокопрочные хладостойкие стали класса прочности 900 МПа для навесного оборудования карьерной техники (предел текучести 900-1200 МПа, временное сопротивление более 1100 МПа, относительное удлинение более 10%, ударная вязкость при температуре -40°C более 21 Дж/см^2 , твердость по Бринеллю более 380 при углеродном эквиваленте не более 0,44).

Технико-экономическая эффективность применения таких сталей заключается в снижении массы и повышении несущей способности конструкций, в увеличении их долговечности. Также важным условием со стороны предприятий машиностроительного комплекса является снижение себестоимости готового высокопрочного металлопроката с одновременным обеспечением регламентированного комплекса свойств.

Традиционные подходы, обеспечивающие указанный комплекс свойств, основаны на выборе дорогостоящих химических композиций, приводящих к снижению экономической целесообразности и технологичности дальнейшей переработки (гибки, сварки и др.). Одним из путей снижения себестоимости продукции является создание сталей с минимальным легированием и соответствующей рациональной термической обработкой. При этом открытым остается вопрос выбора экономного химического состава в сочетании с режимами термической обработки, обеспечивающих достижение одновременно и высоких значений прочностных характеристик, и хладостойкости за счет формирования мелкодисперсной структуры стали. Актуальность и стратегическую значимость настоящей работы определяет необходимость поиска решений указанных проблем. Кроме того, актуальность работы подтверждается ее соответствием тематике комплексного проекта по разработке и внедрению инновационного процесса производства ультрахладостойкого наноструктурированного листо-

вого 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), 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)).

Целью работы является разработка новых экономнолегированных хладостойких сталей классов прочности 700 и 900 МПа для тяжелой подъемно-транспортной техники и определение режимов их термической обработки.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Выбрать системы экономного легирования высокопрочных хладостойких сталей, обеспечивающие достижение заданного уровня механических свойств с учетом себестоимости готовой продукции и соответствия углеродному эквиваленту.

2. Изучить особенности структурно-фазовых превращений и формирования свойств сталей выбранных химических составов.

3. Исследовать влияние режимов термической обработки на структуру и механические свойства экономнолегированных высокопрочных хладостойких сталей.

4. Выдать рекомендации для промышленного производства высокопрочного листового проката из экономнолегированных хладостойких сталей классов прочности 700 и 900 МПа.

Научная новизна и теоретическая значимость:

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 и 900 МПа соответственно, с учетом снижения себестоимости готовой продукции и соответствия углеродному эквиваленту.

2. Для новых сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА впервые установлено влияние скорости охлаждения на структурно-фазовые превращения, положения критических точек, количественные параметры микроструктуры и твердость, построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита разработанных сталей.

3. На основании полученных качественных и количественных закономерностей формирования структуры и свойств новых экономнолегированных сталей обоснованы режимы упрочняющей термической обработ-

ки (для стали 20Г2СМРА – закалка от температуры 860°C и последующий отпуск при температуре 600°C, для стали 16ГНТРА – закалка от температуры 850°C), позволяющие получить гарантированный комплекс свойств.

4. 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, субзерненной структуры α -фазы и высокодисперсных карбидных частиц при отпуске, а в стали 16ГНТРА – мелкодисперсного реечного мартенсита с небольшими прослойками остаточного аустенита при закалке.

Практическая значимость:

1. Разработаны с учетом ценовой составляющей новые высокопрочные стали повышенной хладостойкости, обеспечивающие достижение следующего комплекса механических свойств, не уступающего мировым аналогам:

– для стали 20Г2СМРА: предел текучести более 700 МПа, временное сопротивление 750-950 МПа, относительное удлинение более 14%, ударная вязкость при температуре -60°C более 34 Дж/см² при углеродном эквиваленте не более 0,53;

– для стали 16ГНТРА: предел текучести 900-1200 МПа; временное сопротивление более 1100 МПа, относительное удлинение более 10%, ударная вязкость при температуре -40°C более 21 Дж/см², твердость по Бринеллю более 380 при углеродном эквиваленте не более 0,44.

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

Положения, выносимые на защиту:

1. Химический состав новых экономнолегированных сталей классов прочности 700 и 900 МПа, соответствующих установленным требованиям по низкотемпературной ударной вязкости и углеродному эквиваленту.

2. Закономерности структурно-фазовых превращений, происходящие в новых экономнолегированных высокопрочных хладостойких сталях при непрерывном охлаждении.

3. Качественные и количественные закономерности изменения микроструктуры и механических свойств при закалке и отпуске новых экономнолегированных высокопрочных сталей повышенной хладостойкости.

4. Режимы упрочняющей термической обработки для новых экономнолегированных сталей, обеспечивающие наряду с гарантированными

значениями прочности, твердости и углеродного эквивалента высокие значения низкотемпературной ударной вязкости.

Степень достоверности обеспечивается выполнением большого объема экспериментов, включающих изготовление лабораторных образцов экономнолегированного высокопрочного листового проката, их исследование с применением современных методов анализа структуры и свойств, согласованностью результатов лабораторных исследований с результатами испытаний опытных партий, произведенных по разработанным рекомендациям в условиях ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Личный вклад соискателя. Автор принимал непосредственное участие в формулировании цели и постановке задач работы, создании химических композиций, планировании и проведении лабораторных исследований, обработке и анализе результатов, формулировании выводов, подготовке докладов и публикаций, в разработке рекомендаций по промышленному освоению.

Апробация результатов работы. Основные результаты доложены и обсуждены на конференциях: международная молодежная научно-техническая конференция Magnitogorsk Rolling Practice (2018, 2020 гг.), International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology (RusMetalCon 2020) (г. Челябинск, 2020 г.), 78-я, 79-я Международные научно-технические конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2020, 2021 гг.), Всероссийская научно-техническая конференция «Вопросы металловедения и термической обработки в машиностроении» (г. Москва, 2021 г.), Международная научно-техническая конференция «ПромИнжиниринг-2021» (ICIE-2021) (г. Сочи, 2021).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены в 17 научных трудах, из них 7 – в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 4 статьи – в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Web of Science и Scopus.

Структура и объем диссертации. Общий объем диссертационной работы составляет 140 страниц. В её состав входит введение, пять глав, список литературы и два приложения на 3-х листах. В основной части диссертационная работа содержит 45 иллюстраций, 25 таблиц, 164 источника литературы.

Внедрение результатов диссертационных исследований. Результаты диссертационной работы внедрены в виде новых технологических решений в промышленные условия ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»), используются при проведении научно-исследовательской работы обучающихся, чтении специальных дисциплин по направлениям подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 22.03.02 «Металлургия» и 22.04.02 «Металлургия» в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», что подтверждается актами внедрения результатов научно-исследовательских работ и технологических разработок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основании анализа научно-технической литературы, а также требований потенциальных потребителей к высокопрочному листовому прокату для тяжелой подъемно-транспортной техники определен регламентируемый комплекс свойств разрабатываемых сталей (таблица 1).

Таблица 1 – Требования к комплексу свойств разрабатываемых сталей

Класс прочности	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость КСV, Дж/см ² , при температуре испытания, °С		Твердость НВW	Твердость HV (табл.)	Углеродный эквивалент $C_{экв}$, %
				-40	-60			
не менее или в пределах								не более
700 МПа	700	750-950	14	-	34	-	240-310	0,53
900 МПа	900-1200	1100	10	21	-	380	355-470	0,44

Обзор вариантов легирования сталей аналогичного назначения позволил определить целевой качественный базовый химический состав, допустимые интервалы содержания углерода и легирующих элементов, допустимое содержание вредных примесей во вновь разрабатываемых сталях. Рассмотрено влияние режимов термической обработки на структуру и свойства сталей в зависимости от содержания углерода и легирующих элементов. Сформулированы цель диссертационной работы и задачи исследования.

Во второй главе приведены основные методики и оборудование, применяемые при выполнении комплексных исследований и испытаний.

Выплавку, горячую прокатку и последующую термическую обработку образцов горячекатаного листового проката проводили с использованием оборудования научно-производственного комплекса «Термодеформ-МГТУ» (г. Магнитогорск).

Критические точки определяли на приборе синхронного термического анализа STA Jupiter 449 F3 (NETSCH). Исследование распада переохлажденного аустенита стали и построение термокинетических диаграмм проводили с использованием комплекса Gleeble 3500.

Качественный и количественный анализ выполняли с использованием светового микроскопа Axio Observer (Zeiss) с помощью программного обеспечения обработки металлографических изображений Thixomet PRO, а также растрового электронного микроскопа – JSM 6490 LV.

Среднюю величину аустенитного зерна определяли путем проведения линейных замеров с использованием программ со встроенными методиками, в соответствии с ГОСТ 8233 и ГОСТ 5639.

Качественный и количественный фазовый анализ остаточного аустенита выполнен с использованием рентгеновского дифрактометра XRD-7000.

Исследование тонкой структуры стали проводили на микроскопе Теспаи G2 30 Twin с системой GATAN EELS, оснащенном энергодисперсионным спектрометром EDAX, при ускоряющем напряжении 300 кВ. (ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург). Межплоскостные расстояния α -, γ - и карбидных фаз определяли с помощью программного обеспечения микроскопа непосредственно при просмотре фолг.

Испытания на растяжение, ударный изгиб, измерение твердости по Бринеллю, Виккерсу и микротвердости выполняли по стандартным методам.

В третьей главе обоснован выбор базового химического состава для новых экономнолегированных сталей, применяемых в изготовлении тяжело-нагруженных сварных конструкций подъемно-транспортной техники. Для определения экономически эффективных систем легирования осуществлено последовательное варьирование содержания легирующих элементов с оценкой механических характеристик, соответствия углеродному эквиваленту и с учетом себестоимости стали. Произведена выплавка пяти составов стали, потенциально способных обеспечить требуемый комплекс свойств для листового проката классов прочности 700 МПа и 900 МПа (таблицы 2 и 3).

Таблица 2 – Химический состав стали класса прочности 700 МПа

Номер плавки	Концепция легирования	Массовая доля элементов, %										C _{экв} [*] ≤0,53	Δ C/C, % ^{**}
		C	Si	Mn	S	P	Mo	Al	Nb	Ti	B		
1	База (Mn-Si-B)	0,22	0,58	1,60	0,005	0,010	0,014	0,044	0,004	0,001	0,0020	0,50	0,0
2	+Ti	0,20	0,54	1,55	0,004	0,010	0,014	0,038	0,003	0,014	0,0030	0,48	+0,5
3	+Ti+Nb	0,22	0,50	1,57	0,005	0,009	0,014	0,041	0,032	0,014	0,0020	0,50	+4,5
4	+Ti+Nb+Mo	0,20	0,53	1,54	0,005	0,009	0,300	0,040	0,032	0,015	0,0030	0,53	+19,1
5	+Mo	0,20	0,54	1,55	0,004	0,009	0,305	0,048	0,004	0,001	0,0040	0,53	+15,2

Таблица 3 – Химический состав стали класса прочности 900 МПа

Номер плавки	Концепция легирования	Массовая доля элементов, %										C _{экв} [*] ≤0,44	Δ C/C, % ^{**}
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Al	Ti	B		
1	База (Mn-Si-B)	0,14	0,55	0,98	0,005	0,005	0,03	0,01	0,035	0,001	0,003	0,31	0
2	+Cr	0,13	0,50	0,94	0,005	0,004	0,50	0,01	0,045	0,001	0,002	0,39	+8,7
3	+Cr+Mn	0,13	0,55	1,35	0,006	0,003	0,45	0,02	0,034	0,001	0,004	0,44	+9,6
4	+Mn+Ti	0,14	0,60	1,35	0,006	0,005	0,03	0,01	0,043	0,025	0,003	0,37	+3,1
5	+Mn+Ti+Ni	0,15	0,22	1,30	0,005	0,006	0,02	0,50	0,044	0,023	0,004	0,41	+16,9

Примечания к таблицам 2 и 3: * $C_{экв} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15}$, ** $\Delta C/C = \frac{C/C_n - C/C_1}{C/C_n} \cdot 100\%$, где ΔC/C – изменение себестоимости, C/Cп – себестоимость плавки, C/C₁ – себестоимость базовой химической композиции.

Лабораторный горячекатаный листовый прокат указанных вариантов легирования подвергался термической обработке с последующим изготовлением образцов для проведения механических испытаний.

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 (плавка 5, таблицы 4 и 5).

Таблица 4 –Комплекс свойств стали класса прочности 700 МПа

Номер плавки	Концепция легирования	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость КСV ⁻⁶⁰ , Дж/см ²	Твердость НВ	Изменение себестоимости $\Delta C/C$, %
1	база	680	773	22,0	77	245	0,0
2	+Ti	657	745	20,0	75	239	+0,5
3	+Ti+Nb	716	788	18,9	89	248	+4,5
4	+Ti+Nb+Mo	840	890	16,0	46	285	+19,1
5	+Mo	780	860	17,0	54	257	+15,2
Целевые показатели		≥700	750-950	≥14	≥34	-	-

Таблица 5 –Комплекс свойств стали класса прочности 900 МПа

Номер плавки	Концепция легирования	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость КСV ⁻⁴⁰ , Дж/см ²	Твердость НВW	Изменение себестоимости $\Delta C/C$, %
1	база	850	1090	24,0	27	347	0
2	+Cr	905	1120	22,5	26	355	+8,7
3	+Cr+Mn	930	1160	16,0	12	363	+9,6
4	+Mn+Ti	1005	1190	17,0	15	388	+3,1
5	+Mn+Ti+Ni	1100	1270	20,0	24	401	+16,9
Целевые показатели		900-1200	≥1100	≥10	≥21	380-440	-

Выбранным химическим композициям присвоили следующие обозначения:

– 20Г2СМРА (% мас.: 0,20 С, 0,55 Si, 1,6 Mn, 0,3 Mo, 0,004 В);

– 16ГНТРА (% мас.: 0,15 С, 0,22 Si, 1,3 Mn, 0,5 Ni, 0,023 Ti, 0,004 В).

В четвертой главе с целью эффективного управления свойствами новых сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА приведены результаты исследования структурно-фазовых превращений при распаде переохлажденного аустенита.

Для выбранных химических составов сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА на основе результатов дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и дилатометрического анализа были определены положения температур критических точек при нагреве (рисунок 1, таблица 6).

По результатам комплексного дилатометрического и металлографического анализов, а также измерения твердости были установлены закономерности структурно-фазовых превращений, происходящих в сталях 20Г2СМРА и 16ГНТРА при непрерывном охлаждении, и построены термодинамические диаграммы распада переохлажденного аустенита (рисунок 2).

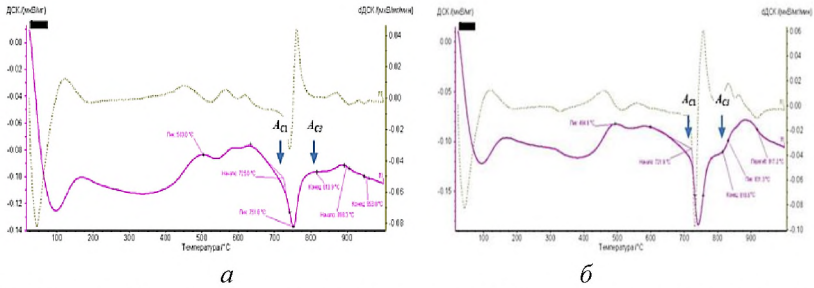


Рисунок 1 – Экспериментальные кривые ДСК при нагреве со скоростью 10 °С/мин: *а* – сталь 20Г2СМРА; *б* – сталь 16ГНТРА

Таблица 6 – Результаты определения критических точек стали

Марка стали	Метод исследования	Температура критических точек t_c , °С	
		A_{c1}	A_{c3}
20Г2СМРА	ДСК/ Дилатометр	725 / 730	814 / 820
16ГНТРА	ДСК/ Дилатометр	721 / 710	819 / 825

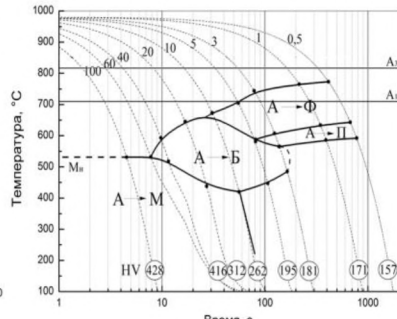
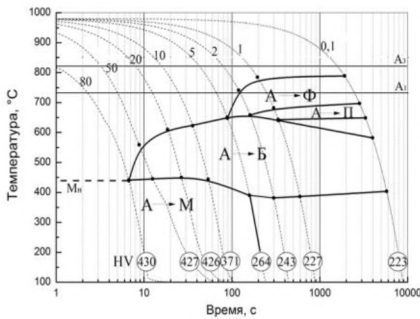


Рисунок 2 – Термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита в сталях: *а* – 20Г2СМРА; *б* – 16ГНТРА

Выявлены температурно-временные интервалы структурно-фазовых превращений при охлаждении от 980°С со скоростью от 0,1 до 80 °С/с для стали 20Г2СМРА и от 0,5 до 100 °С/с для стали 16ГНТРА, определена температура начала мартенситного превращения стали (M_n), а также рассчитана критическая скорость закалки ($V_{кр.}$): для стали 20Г2СМРА: $M_n \sim 440^\circ\text{C}$, $V_{кр.} \sim 80^\circ\text{C}/\text{с}$; для стали 16ГНТРА: $M_n \sim 540^\circ\text{C}$, $V_{кр.} \sim 60^\circ\text{C}/\text{с}$.

Пятая глава посвящена поиску температурных режимов закалки и отпуска, рациональных с точки зрения достижения наилучшего сочетания прочностных характеристик и хладостойкости.

Исследование влияния режимов закалки для стали 20Г2СМРА проводили в интервале температур нагрева под закалку от 850 до 1000°С с шагом 50°С, отпуска – в интервале от 200 до 600°С с шагом 100°С. Иссле-

дование влияния температуры закалки для стали 16ГНТРА проводили в интервале от 850 до 1000°C с шагом 50°C.

Для стали 20Г2СМРА было установлено, что после закалки в рассматриваемом диапазоне температур формируется структура пакетного (реечного) мартенсита (рисунок 3).

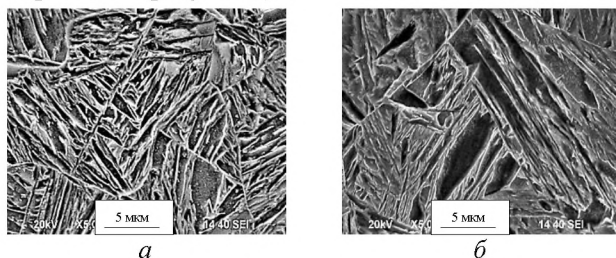


Рисунок 3 – Микроструктура стали 20Г2СМРА после закалки от температуры 850°C (а) и 1000°C (б)

Достижение максимальных значений ударной вязкости KCV^{-60} в сочетании с удовлетворительными значениями твердости HV_1 обеспечивается при температуре нагрева под закалку 850°C, при которой формируется минимальная величина зерна аустенита (рисунок 4). Обнаружено также, что исследуемая сталь не склонна к перегреву вплоть до 950°C (рисунок 4).

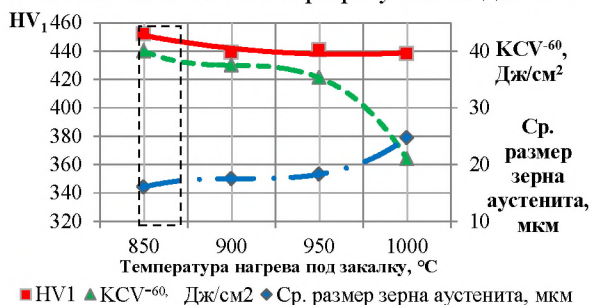


Рисунок 4 – Зависимость величины зерна аустенита, ударной вязкости KCV^{-60} и твердости HV_1 от температуры закалки для стали 20Г2СМРА

Качественный и количественный рентгенофазовый анализ образцов, закаленных от температур 850, 950 и 1000°C, показал, что содержание в микроструктуре стали остаточного аустенита во всех случаях находится примерно на одинаковом уровне и составляет около 1%.

С точки зрения технологичности и гарантированности обеспечения требуемого комплекса свойств для дальнейших исследований выбрана рабочая температура закалки $860 \pm 10^\circ\text{C}$.

Исследование тонкой структуры стали, закаленной от 860°C, выявило (рисунок 5), что при этом режиме формируется структура, состоящая преимущественно из мелкодисперсного реечного мартенсита с незначи-

тельной долей остаточного аустенита около 1% и высокотемпературного мартенсита. Сформированная в результате закалки структура позволила обеспечить следующий комплекс свойств: $\sigma_B = 1450$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1290$ МПа, $\delta = 11,5\%$, $KCV^{60} = 39$ Дж/см², 442 HV₁.

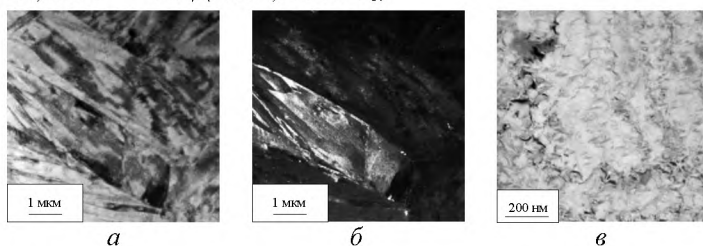


Рисунок 5 – Тонкая микроструктура стали 20G2СМРА после закалки от 860°C: *а, в* – светлопольное изображение; *б* – темнопольное изображение в рефлексе (112) α -фазы

При исследовании влияния температуры отпуска на структуру и свойства стали, закаленной от 860°C, было установлено, что в интервале температур от 200 до 500°C сохраняется реечное строение α -фазы (рисунок 6). С повышением температуры отпуска наблюдается более сильное искажение формы и структуры границ реек, обусловленные формированием фрагментированной субструктуры за счет релаксации дефектной структуры, образованной в процессе мартенситного превращения. Кроме того, при температуре отпуска выше 500°C наблюдается сфероидизация и коагуляция карбидных частиц.

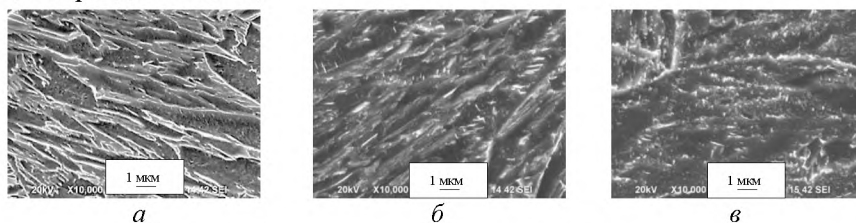


Рисунок 6 – Микроструктура стали 20G2СМРА после закалки от температуры 860°C и отпуска при 200°C (*а*), 500°C (*б*) и 600°C (*в*)

Установлено, что требуемому уровню твердости и ударной вязкости ($240-310$ HV и $KCV^{60} \geq 34$ Дж/см²) удовлетворяет следующий режим обработки: закалка от 860°C и последующий отпуск при 600°C (рисунок 7).

С применением методов просвечивающей электронной микроскопии показано, что в стали 20G2СМРА после закалки и высокого отпуска формируется субзеренная структура α -фазы и карбидные частицы цементитного типа Fe₃C и (FeMn)₃C (рисунок 8), что обеспечивает достижение высоких прочностных характеристик в сочетании с повышенной хладостойкостью. Установленные структурные изменения при отпуске привели к сни-

жению временного сопротивления до 839 МПа, предела текучести до 769 МПа и росту значений ударной вязкости до 64 Дж/см² и относительного удлинения до 20%, что обусловлено разбиением реек α -фазы на фрагменты и выходом углерода из α -решетки с образованием дисперсных карбидов на границах этих фрагментов.

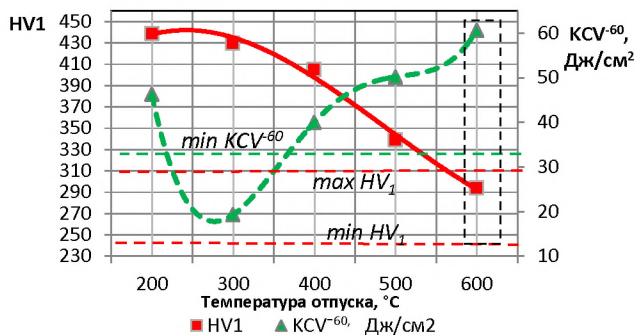


Рисунок 7 – Влияние температуры отпуска на твердость HV₁ и ударную вязкость KCV⁻⁶⁰ закаленной стали 20Г2СМРА

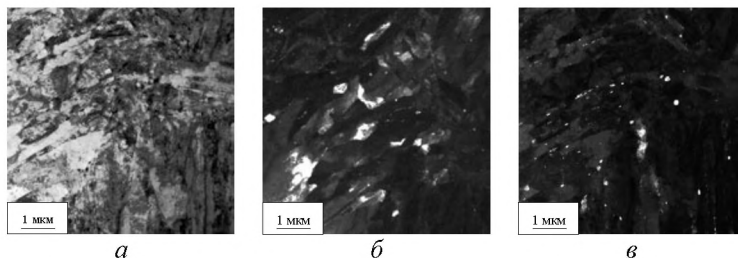


Рисунок 8 – Тонкая микроструктура стали 20Г2СМРА после закалки и отпуска: а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение в рефлексе (112) α -фазы; в – темнопольное изображение в рефлексе карбидной фазы (201)_{Fe₃C}

Аналогичные исследования проводили для стали 16ГНТРА. Было установлено, что после закалки преимущественно формируется структура пакетного (реечного) мартенсита (рисунок 9). Содержание остаточного аустенита во всех случаях не превышает 1 %.

Определено, что установленному комплексу свойств (355-470 HV₁ и KCV⁻⁴⁰ 21 Дж/см²) для стали 16ГНТРА удовлетворяет закалка от 850°C, обеспечивающая наилучшее сочетание твердости и ударной вязкости, формируемые при наименьшей величине зерна аустенита (рисунок 10).

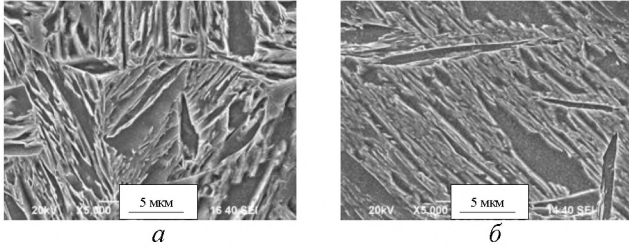


Рисунок 9 – Микроструктура стали 16ГНТРА после закалки от температуры: 850°C (а) и 1000 °С (б)

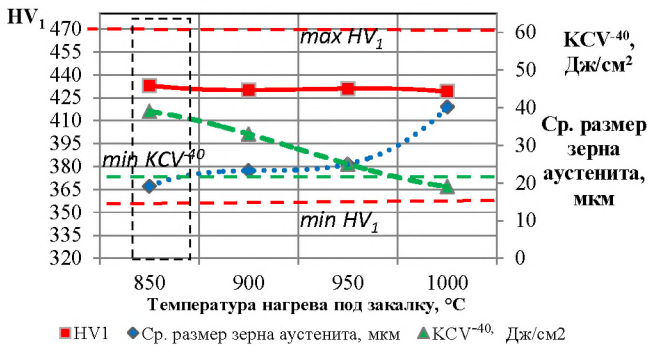


Рисунок 10 – Зависимость величины зерна аустенита, ударной вязкости KCV^{40} и твердости HV_1 от температуры закалки стали 16ГНТРА

Исследование тонкой структуры стали 16ГНТРА после закалки от 850°C показало, что в образцах в основном преобладает мелкодисперсная структура реечного мартенсита (с шириной рек α -фазы 0,2–07 мкм и длиной 2–3 мкм) с небольшими прослойками остаточного аустенита (рисунок 11). Кроме того, выявлены области высокотемпературного мартенсита (рисунок 12, а), наноразмерные частицы карбидной фазы (цементита), выделившиеся в процессе самоотпуска мартенсита (рисунок 12, б), а также незначительная доля бейнита.

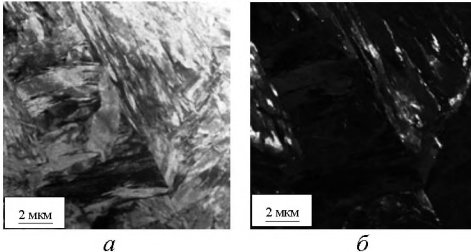


Рисунок 11 – Тонкая микроструктура стали 16ГНТРА после закалки от 850°C: а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение в рефлексе (200) γ

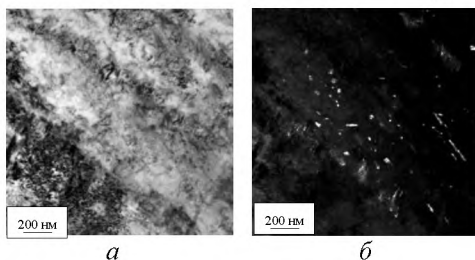


Рисунок 12 – Тонкая микроструктура стали 16ГНТРА после закалки от 850°С: *а* – светлопольное изображение; *б* – темнопольное изображение в рефлексе (212)_{Fe3C} и рефлекс (002)_γ

По результатам комплекса теоретико-экспериментальных исследований были разработаны технологические рекомендации для промышленного производства новых экономнолегированных высокопрочных хладостойких сталей 20Г2СМРА (таблица 7) и 16ГНТРА (таблица 8) в ПАО «ММК». Результаты сдаточных испытаний опытных партий листового проката показали, что разработанные технологические решения – новый химический состав сталей и режимы термической обработки – обеспечили достижение комплекса свойств в соответствии с целями и задачами настоящего исследования (таблица 9). Освоенные стали в настоящее время реализуются под собственным брендом ПАО «ММК» MAGSTRONG. Полученные результаты подтверждены актами промышленных испытаний.

Таблица 7 – Рекомендуемые химические составы

Марка стали	Массовая доля элементов, %, не более или в диапазоне											С _{экв} , %
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Al	Mo	Ti	N	B	
20Г2СМРА	0,18-0,20	0,45-0,55	1,50-1,60	0,005	0,012	0,05	0,02-0,05	0,22-0,30	0,005	0,005	0,003-0,005	0,53
16ГНТРА	0,14-0,16	0,15-0,25	1,25-1,35	0,003	0,010	0,45-0,55	0,02-0,05	0,10	0,015-0,025	0,008	0,002-0,004	0,44

Таблица 8 – Рекомендуемые режимы термической обработки

Марка стали	Толщина, мм	Закалка		Отпуск	
		Температура металла на выдache, °С	Удельное время нагрева металла, мин/мм	Температура металла на выдache, °С	Удельное время нагрева металла, мин/мм
20Г2СМРА	8-50	860	2,5	590-610	2,5+25
16ГНТРА	8-20	850	2,5	-	-

Таблица 9 – Результаты сдаточных испытаний листового проката

Марка стали	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость KCV, Дж/см ² , при температуре испытания, °С		Твердость HBW
				-40	-60	
20Г2СМРА	766	838	21	-	67	-
16ГНТРА	1128	1361	20,5	39	-	401

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Обоснован выбор химических составов новых экономнолегированных высокопрочных хладостойких сталей для тяжелой подъемно-транспортной техники, обеспечивающих достижение регламентируемого комплекса свойств с учетом себестоимости готовой продукции, а также соответствия углеродному эквиваленту, 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).

2. На основании полученных данных о структурно-фазовых превращениях в новых экономнолегированных сталях 20Г2СМРА и 16ГНТРА выявлены качественные и количественные характеристики структуры при распаде переохлажденного аустенита в этих сталях. Определены критические точки при нагреве, температуры фазовых превращений при непрерывном охлаждении, критические скорости закалки разработанных сталей и твердость формирующихся структур при различных скоростях охлаждения. Построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита разработанных сталей, отражающие кинетику фазовых превращений, а также позволяющие выявить температурно-временные интервалы структурных превращений при охлаждении от 980 °С со скоростью от 0,1 до 80 °С/с для стали 20Г2СМРА и от 0,5 до 100 °С/с для стали 16ГНТРА.

3. Установлены качественные и количественные закономерности формирования структуры и механических свойств сталей 20Г2СМРА и 16ГНТРА, отражающие влияние режимов термической обработки на уровень прочности и хладостойкости. На основании полученных данных определены рациональные режимы термической обработки, обеспечивающие гарантированное достижение требуемых прочностных характеристик в комплексе с низкотемпературной ударной вязкостью: для стали 20Г2СМРА – закалка от температуры 860 °С и последующий отпуск при температуре 600 °С, для стали 16ГНТРА – закалка от температуры 850 °С.

4. Установлено, что в стали 20Г2СМРА требуемый комплекс свойств обеспечивается за счет формирования после закалки преимущественно мелкодисперсного реечного мартенсита с незначительной долей остаточного аустенита; после отпуска – субзернистой структуры α -фазы (размер отдельных субзерен составляет 0,1-0,7 мкм) и карбидных частиц цементитного типа Fe_3C и $(FeMn)_3C$ размером от 20 до 150 нм. Определено, что регламентируемый комплекс свойств стали 16ГНТРА обеспечивается после закалки преимущественно за счет формирования мелкодисперсного реечного мартенсита с небольшими прослойками остаточного аустенита.

5. Для промышленного производства разработаны технологические рекомендации, включающие химический состав и режимы термической обработки листового проката классов прочности 700 и 900 МПа из экономнолегированных хладостойких сталей, предназначенных для изготовле-

ния тяжело нагруженных сварных конструкций подъемно-транспортной техники, эксплуатируемой, в том числе, в условиях низких климатических температур. По результатам сдаточных испытаний опытных партий листового проката установлено, что разработанная технология производства листового проката из новых экономнолегированных хладостойких сталей обеспечивает получение в стали 20Г2СМРА комплекса свойств класса прочности 700 МПа ($\sigma_{0,2} \geq 700$ МПа, $\sigma_B = 750-950$ МПа, $\delta \geq 14\%$, $KCV^{60} \geq 34$ Дж/см² при $C_{экр} \leq 0,53$), а в стали 16ГНТРА – комплекса свойств класса прочности 900 МПа ($\sigma_{0,2} = 900-1200$ МПа; $\sigma_B \geq 1100$ МПа, $\delta \geq 10\%$, $KCV^{40} \geq 21$ Дж/см², $НВW \geq 380$ при $C_{экр} \leq 0,44$).

6. Результаты исследования использованы в условиях ПАО «ММК» при опробовании и внедрении эффективных технологических процессов производства опытных партий высокопрочного листового проката из экономнолегированных хладостойких сталей, а также внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», что подтверждено соответствующими актами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

В журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Основные виды и области применения наноструктурированного высокопрочного листового проката / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков, С.В. Денисов, А.С. Кузнецова, Г.А. Бережная, М.С. Гущина // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – № 4 (48). – С. 41-44.
2. Разработка принципиальной технологической схемы производства наноструктурированного высокопрочного листового проката / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.С. Гущина, Г.А. Бережная, А.С. Кузнецова, П.А. Стеканов, Д.Ю. Алексеев // Естественные и технические науки. – 2014. – № 9-10 (77). – С. 328-334.
3. Анализ технических требований, предъявляемых к ультрахладостойкому листовому прокату / М.В. Чукин, П.П. Полецков, Д.Г. Набатчиков, Д.Г. Емалеева, М.С. Гущина, А.С. Кузнецова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 52-60.
4. Назначение и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / П.П. Полецков, К. Хакимуллин, Д.Г. Набатчиков, М.С. Гущина, Д.Ю. Алексеев, А.С. Кузнецова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2017. – Т. 15. – № 2. – С. 85-88.
5. Разработка импортозамещающей технологии производства листового проката из высокопрочной конструкционной стали северного исполнения /

М.В. Чукин, П.П. Полецков, М.С. Гущина, А.С. Кузнецова, О.А. Никитенко, Д.Ю. Алексеев // Производство проката. – 2019. – № 4. С. – 5-11.

6. Анализ мирового уровня разработок в области производства горячекатаного высокопрочного хладостойкого листового проката с пределом текучести ≥ 600 Н/мм² / П.П. Полецков, А.С. Кузнецова, Д.Ю. Алексеев, О.А. Никитенко, Е.В. Лопатина // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 32-38.

7. Разработка режимов термической обработки новой конструкционной экономнолегированной высокопрочной стали для Арктики и Крайнего Севера / П.П. Полецков, О.А. Никитенко, А.С. Кузнецова, Д.Ю. Алексеев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2021. – № 4 (790). – С. 3-8.

В журналах, индексируемых наукометрическими базами Web of Science и Scopus:

8. Investigation of the effect of nickel content on the structural and phase transformation and properties of high-strength cold-resistant complex-alloyed steel / P.P. Poletskov, M.S. Gushchina, O.A. Nikitenko, A.S. Kuznetsova, N.V. Koptseva, Y.Y. Efimova, D.M. Chukin // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2019. – 54(6). – P. 1291–1297.

9. Poletskov, P.P. Choosing the Rational Heat Treatment Conditions for High-Strength Cold-Resistant Weldable Steel with Yield Strength of more than 600 N/mm² / P.P. Poletskov, A.S. Kuznetsova, O.A. Nikitenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 969(1). – 012013.

10. The study of transformation kinetics for overcooled austenite of the new high-strength steel with increased cold resistance / P.P. Poletskov, O.A. Nikitenko, A.S. Kuznetsova, V.M. Salganik // CIS Iron and Steel Review. – 2020. – Vol. 19. – P. 56–59.

11. The study of influence of heat treatment procedures on structure and properties of the new high-strength steel with increased cold resistance / P.P. Poletskov, A.S. Kuznetsova, O.A. Nikitenko, D.Yu. Alekseev // CIS Iron and Steel Review. – 2020. – Vol. 20. – P. 50–54.

Другие публикации:

12. Анализ технических требований, предъявляемых к наноструктурированному высокопрочному листовому прокату / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная, М.С. Гущина, А.С. Кузнецова, Д.Ю. Алексеев // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2014. – № 2 (41). – С. 19-28.

13. Особенности получения наноструктурированного высокопрочного листового проката / В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.С. Гущина, Г.А. Бережная, А.С. Кузнецова, П.А. Стеканов, Д.Ю. Алексеев // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2015. – № 1 (60). – С. 27-30.

14. Исследование влияния режимов термической обработки на механические свойства экономнолегированной стали типа Magstrong W700 / А.С. Кузнецова, П.П. Полецков, М.С. Гущина, О.А. Никитенко, М.В. Мальков, Д.Г. Емалеева // Magnitogorsk Rolling Practice 2018: Материалы III молодежной научно-практической конференции, Магнитогорск, 05-08 июня 2018 года / под ред. А.Г. Корчунова. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – С. 69-71.

15. Исследование структурного состояния и механических свойств хладостойких высокопрочных сталей для тяжело нагруженной техники / П.П. Полецков, И.Л. Яковлева, А.С. Кузнецова, О.А. Никитенко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 19-23 апреля 2021 года. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. – С. 127.

16. Understanding the forming mechanism of mechanical properties in new cold-resistant high-strength steel / A. Kuznetsova, O. Nikitenko, D. Alekseev, P. Poletskov, D. Emaleeva // Magnitogorsk Rolling Practice 2020: Материалы V международной молодежной научно-технической конференции, Магнитогорск, 24–27 ноября 2020 года / под ред. А.Г. Корчунова. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020. – С. 89-90.

17. Особенности формирования микроструктуры и механических свойств новой хладостойкой высокопрочной стали / П.П. Полецков, А.С. Кузнецова, О.А. Никитенко, Д.Ю. Алексеев // Вопросы металловедения и термической обработки в машиностроении: тезисы докладов всероссийской научно-технической конференции, Москва, 15-16 апреля 2021 г. – Москва: ГНЦ ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина», 2021. – С. 52.