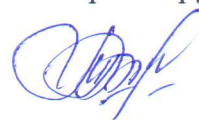


На правах рукописи



УДК 669.14.018.41:621.791

ГРНТИ 53.49

ГОЛУБЕВА МАРИНА ВАСИЛЬЕВНА

**«ХЛАДОСТОЙКАЯ СВАРИВАЕМАЯ СТАЛЬ КЛАССА ПРОЧНОСТИ 690 МПа
ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННОЙ ТЕХНИКИ»**

Специальность: 05.16.01 - «Металловедение и термическая обработка металлов и
сплавов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт – Петербург - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии
«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов
«Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Научный руководитель:

Сыч Ольга Васильевна

Кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Родионова Ирина Гавриловна

Доктор технических наук, старший научный сотрудник
Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П.Бардина» заместитель директора Центра физической химии, материаловедения, биметаллов и специальных видов коррозии

Соколовская Элина Александровна

Кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», доцент кафедры «Металловедения и физики прочности»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ)

Защита диссертации состоится « 04 » декабря 2019 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте: <http://dissovet.crismprometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=32>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор,



Хлусова Е.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с освоением труднодоступных северных и арктических регионов возрастает потребность в высокопрочных хладостойких свариваемых сталях для модернизации большегрузных автомобилей (самосвалов) в горнодобывающей и строительной отраслях.

В отечественном и зарубежном автомобилестроении широко практикуется создание самосвалов на базе шасси грузовых автомобилей общего назначения. Более тяжелые условия эксплуатации самосвалов при этом требуют конструктивных мер, направленных на повышение прочности несущей системы – одного из наиболее металлоемкого и дорогостоящего узла автомобиля. Выход из строя рамы, являющейся основным силовым элементом несущей системы, вследствие разрушения или необратимой деформации, связан с трудоемкими и дорогостоящими ремонтными работами. Кроме того, к большегрузной технике предъявляются требования по снижению металлоемкости и затрат на изготовление, а также повышению грузоподъемности, надежности и срока службы.

Соответственно, к механическим характеристикам материалов, применяемых для изготовления сварных элементов несущей системы, предъявляются комплексные требования: высокая прочность при сохранении достаточного уровня вязкопластических характеристик при низких температурах и свариваемость. Свариваемость косвенно оценивают по величине углеродного эквивалента ($C_{\text{экв}}^1$), характеризующего уровень легирования стали.

Так, на ОАО «БЕЛАЗ», являющимся одним из крупнейших производителей большегрузной техники и активно занимающимся повышением конкурентоспособности своей продукции, появилась потребность в листовом прокате в толщинах до 50 мм из экономнолегированной свариваемой ($C_{\text{экв}}$ не более 0,53%) стали с гарантированным пределом текучести 690 МПа и ударной вязкостью при температуре испытаний не менее 35 Дж/см².

При этом технология изготовления продукции должна была быть адаптирована к технологическим возможностям ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»), который настоящее время в России является одним из основных поставщиков высокопрочных легированных сталей для производства ответственных сварных конструкций, применяемых при строительстве грузоподъемной техники, устройств горнодобывающей техники и в других отраслях промышленности.

Известно, что для снижения углеродного эквивалента необходимо уменьшить содержание углерода и химических элементов, ухудшающих свариваемость стали. Это

¹ $C_{\text{экв}} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$, %, (1),

где C, Mn, Cr, Cu, Ni, Mo, V – массовая доля углерода, марганца, хрома, меди, никеля, молибдена, ванадия, в ковшевой пробе плавки.

может привести к невозможности обеспечения мартенситно-бейнитной прокаливаемости, необходимой для получения требуемых прочностных характеристик в листовом прокате после отпуска.

Несмотря на широкий спектр известных высокопрочных сталей российского и зарубежного производства со сниженным содержанием углерода, в полной мере всем обозначенным ОАО «БЕЛАЗ» требованиям не удовлетворяет ни одна известная сталь. Отечественные стали для большегрузной техники отличаются высоким содержанием углерода. Традиционные судостроительные высокопрочные стали с пределом текучести 590-690 МПа в толщинах до 50 мм, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», отличаются более высоким содержанием дорогостоящих легирующих элементов ($C_{\text{экв}}$ составляет 0,6% и более). Стали зарубежного производства часто не удовлетворяют требованиям по ударной вязкости при низких температурах, а также по углеродному эквиваленту. Стали с пределом текучести не менее 690 МПа для труб магистральных трубопроводов (категории X100) с низким содержанием никеля и меди, изготавливаемые по технологии термомеханической обработки, не обеспечивают получение требуемой бейнитно-мартенситной структуры по всей толщине листов свыше 25 мм.

Создание новых тяжело нагруженных сварных конструкций, например, стрел кранов, требует применения процессов сварки, обеспечивающих минимизацию остаточных напряжений. К сожалению, возможности традиционных дуговых технологий не всегда соответствуют таким требованиям. Для листов толщиной до 15 мм перспективно применение лазерной сварки, уменьшающей неблагоприятное воздействие сварочного цикла за счет локального взаимодействия лазерного луча с металлом. Однако термический цикл лазерной сварки характеризуется сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения металла шва и зоны термического влияния, высокими температурными градиентами в зоне термического влияния (ЗТВ), а также малыми выдержками. Это оказывает влияние на происходящие фазовые и структурные изменения в ЗТВ и, как следствие, определяет механические свойства сварного соединения, что требует более детальных исследований в этой области.

В связи с вышеизложенным **целью настоящей работы** являлась разработка новой хладостойкой стали для изготовления толстолистового проката толщиной до 50 мм и технологии его термической обработки, обеспечивающей гарантированный предел текучести 690 МПа в сочетании с высокими значениями ударной вязкости при температуре до -70°C при улучшении показателей свариваемости ($C_{\text{экв}}$ не более 0,53 %).

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработка химического состава и определение структуры, обеспечивающей требуемые прочностные и вязкопластические характеристики толстолистового проката из экономнолегированной высокопрочной хладостойкой свариваемой стали, по результатам исследований фазовых превращений.

2. Разработка промышленных режимов термической обработки листового проката из экономнолегированной высокопрочной хладостойкой свариваемой стали по результатам исследований влияния режимов закалки и отпуска на структуру и механические свойства.

3. Исследование качества опытно-промышленной партии листового проката из экономнолегированной высокопрочной хладостойкой свариваемой стали для обоснования стабильности механических свойств при промышленном производстве.

4. Проведение исследований структуры и свойств сварных соединений листового проката из экономнолегированной высокопрочной хладостойкой свариваемой стали, полученных электродуговой и лазерной сваркой; оценка перспективности применения лазерной сварки.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

1. Установлено минимальное содержание основных легирующих элементов (1,7% Ni, 0,5% Cu, 0,5% Cr и 0,3% Mo), позволяющее сформировать при охлаждении со скоростью от 5 до 50°C/с в низкоуглеродистой экономнолегированной стали бейнитно-мартенситную структуру по всему сечению листового проката в толщинах до 50 мм с протеканием бейнитного превращения в температурном интервале 640÷420°C, мартенситного – в диапазоне температур 440÷300°C.

2. Определено влияние температуры отпуска на карбидообразование в низкоуглеродистой экономнолегированной стали марки 09ХГН2МД и показано, что повышению прочности способствует формирование в мартенсите при 570-600°C дисперсных карбидов цементита размером от 9 до 100 нм с объемной плотностью $(0,7-2,9) \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$; при этом вязкопластические характеристики не ухудшаются. Образование в структуре от 10 до 30% областей переотпущенного мартенсита с плотностью дислокаций 10^9 м^{-2} и менее после отпуска при температурах выше 630°C приводит к снижению прочностных характеристик на 10-25%.

3. Показано, что формирование при закалке дисперсной бейнитно-мартенситной структуры с высокой плотностью дислокаций при отсутствии структурно свободного феррита, с объемной долей мартенситной составляющей до 55% (до 50% реечного мартенсита и до 5 % высокотемпературного мартенсита) и бейнитной составляющей до 45% (до 20% реечного и до 25% гранулярного бейнита) гарантирует в листовом прокате из стали марки 09ХГН2МД после высокого отпуска в интервале температур 570-600°C получение предела текучести при комнатной температуре не менее 690 МПа и ударной вязкости не менее 35 Дж/см² при температуре испытаний -70°C.

4. Установлено, что применение высокоскоростного нагрева, характерного для лазерной сварки (~500°C/с), способствует формированию мелкого зерна аустенита вблизи линии сплавления со средним размером ~ 100 мкм и, как следствие, более дисперсной бейнитно-мартенситной структуры на крупнозернистом участке зоны термического влияния по сравнению с электродуговой сваркой. Формирование такой

структуры позволяет обеспечить высокие значения ударной вязкости не менее 100 Дж/см^2 при температуре испытаний до -100°C в зоне термического влияния стыкового сварного соединения из стали марки 09ХГН2МД толщиной до 12 мм, полученного лазерной сваркой.

Практическая значимость состоит в обеспечении экономнолегированной высокопрочной хладостойкой свариваемой сталию строительства тяжелонагруженной техники, подъемно-транспортного оборудования, эксплуатирующихся в условиях низких температур. Полученные научные результаты позволили осуществить поставку экономнолегированной высокопрочной хладостойкой свариваемой стали марки 09ХГН2МД с гарантированным пределом текучести 690 МПа и хладостойкостью до -70°C для строительства на ОАО «БЕЛАЗ» карьерных самосвалов большой и особо большой грузоподъемности, предназначенных для работы в сложных климатических условиях. Подана заявка на патент № 209120117 от 26.06.2019 г.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Химический состав стали Mn-Ni-Cu-Cr-Mo композиции легирования, обеспечивающий при углеродном эквиваленте $C_{\text{эв}} \leq 0,53\%$ мартенситно-бейнитную прокаливаемость в листовом прокате толщиной до 50 мм и получение после закалки и высокого отпуска гарантированного предела текучести 690 МПа.

2. Температурно-временные режимы высокого отпуска листового проката из экономнолегированной стали Mn-Ni-Cu-Cr-Mo композиции легирования, обеспечивающие за счет формирования упрочняющих карбидов цементитного типа в бейнитно-мартенситной структуре получение гарантированного предела текучести в сочетании с требуемой ударной вязкостью при температуре -70°C .

3. Зависимость изменения структуры и микротвердости по ширине зоны термического влияния сварных соединений из экономнолегированной высокопрочной стали от условий лазерной сварки.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена апробацией основных научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертационной работе с использованием современных методов исследований, опытом положительного внедрения результатов работы в производство при изготовлении листового проката на ПАО «ММК» (оформлен акт внедрения) и положительными результатами переработки в условиях ОАО «БЕЛАЗ» опытной партии листового проката из стали марки 09ХГН2МД класса прочности 690 МПа, на основании которых ПАО «ММК» одобрен в качестве поставщика разработанной металлопродукции, рекомендованной для кузовов и платформ большегрузных автомобилей БЕЛАЗ.

Личное участие автора в получении научных результатов, изложенных в диссертации, заключается в постановке задачи и определении методов проведения экспериментальных исследований, исследовании фазовых превращений в

экономнолегированной высокопрочной хладостойкой свариваемой стали, определении соотношения и морфологии структурных составляющих для обеспечения требуемого комплекса свойств, изучении особенностей структур, формирующихся в экономнолегированных высокопрочных сталях при закалке и отпуске, разработке технологических режимов термической обработки, анализе и обработке полученных результатов, разработке рекомендаций для опытно-промышленного производства и разработке технической и технологической документации и техническом сопровождении изготовления опытно-промышленной партии.

Апробация работы. Основные положения работы представлены и обсуждены на следующих российских и международных научных конференциях: XIV Международной конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (17-19 июня 2015г., г.Санкт-Петербург), XII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (с международным участием) (13-16 октября 2015г., г.Москва), 15th Nordic Laser Materials Processing Conference, Nolamp 2015” (2015г., г.Лаппеенранта, Финляндия), XV Международной конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (29-30 июня 2016г., г.Санкт-Петербург), Научных чтениях им. гл.-корр. РАН Ивана Августовича Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов» (6-7 сентября 2016г., г. Москва), IX Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (посвященной 110-летию со дня рождения профессора, д.т.н. Николая Митрофановича Скларова) (20 апреля 2017г., г. Москва), XVIII Международной научно-технической школе-семинаре металловедов-молодых ученых (2017г., г.Екатеринбург), XXIV Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (19-23 марта 2018г., г.Магнитогорск), IX Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» (2018г., г.Москва).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 15 печатных работах, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 2 публикации изданы на английском языке и индексируются в базе данных SCOPUS.

Структура и объем диссертации. Диссертация на 186 стр. состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 127 наименований, а также 4 Приложений, в которых представлены материалы, не вошедшие в основной объем работы, и 2 акта (в том числе акт внедрения). Работа содержит 63 рисунка и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлены результаты анализа научно-технической литературы, а также патентной информации о существующих марках стали высокой прочности, различающихся по уровню и системе легирования и технологии их производства на ведущих российских предприятиях и за рубежом, которые определяют их прочность, хладостойкость, а также свариваемость. Описаны основные принципы обеспечения высокой пластичности, вязкости и сопротивления хрупким разрушениям при высоком уровне прочностных характеристик стали. Установлено, что в настоящее время на российских заводах существует широкий спектр высокопрочных марок сталей с величиной углеродного эквивалента от 0,55 до 0,96 % и отсутствует производство экономнолегированных сталей с улучшенной свариваемостью ($C_{\text{экв}} \leq 0,53$ %) для листового проката толщиной до 50 мм с пределом текучести не менее 690 МПа в сочетании с высокой хладостойкостью (до - 70°C). Сформулирована постановка задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена выбору материалов и методик исследований. Описаны методы исследования фазовых превращений и структуры с использованием оптической и электронной (растровой, просвечивающей и сканирующей) микроскопии, атомно-зондовой томографии, определения механических свойств листового проката и его сварных соединений, а также методы измерения твердости и микротвердости.

Исследования проводили на низкоуглеродистой стали с различным содержанием Cr, Mo, Ni и Cu с варьированием $C_{\text{экв}}$ в диапазоне 0,46 – 0,61% на 6 составах промышленной выплавки и на опытно-промышленной плавке разработанной стали марки 09ХГН2МД (состав №3) с $C_{\text{экв}} = 0,51\%$, изготовленной на ПАО «ММК» в соответствии с разработанной технической документацией.

Таблица 1 – Содержание углерода и основных легирующих элементов в опытных плавках и новой стали марки 09ХГН2МД, масс. %

№ состава/ марка стали	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo	Al	N	Nb	$C_{\text{экв}}$	Pcm
1	0,09	0,24	0,65	0,006	0,002	1,35	0,50	0,48	0,15	0,020	0,008	0,03	0,46	0,21
2	0,09	0,23	0,64	0,010	0,002	1,46	0,39	1,12	0,15	0,033	0,005	0,04	0,56	0,23
3	0,09	0,33	0,67	0,007	0,003	1,70	0,50	0,49	0,30	0,036	0,006	0,03	0,51	0,23
4	0,10	0,28	0,66	0,007	0,003	1,72	0,54	0,67	0,24	0,030	0,008	0,03	0,54	0,25
5	0,10	0,22	0,60	0,007	0,003	2,02	0,36	1,16	0,12	0,039	0,005	0,04	0,61	0,24
6	0,09	0,25	0,65	0,005	0,002	2,12	0,64	0,76	0,24	0,026	0,008	0,03	0,59	0,25

В третьей главе представлены результаты исследования фазовых превращений низкоуглеродистых сталей с различным содержанием Cr, Mo, Ni и Cu и разработки химического состава новой низкоуглеродистой экономнолегированной стали марки 09ХГН2МД, обеспечивающей требуемый комплекс механических свойств.

Снижение содержания хрома от 1,12% (состав №2) до 0,48% (состав №1) при содержании никеля - (1,35-1,46%), меди - 0,5% и молибдена - 0,15% приводит к

расширению температурной области бейнитного превращения, а также к сдвигу ферритно-перлитного и мартенситного превращений в область более высоких скоростей охлаждения (на $10^{\circ}\text{C}/\text{с}$), что может привести к формированию структуры преимущественно гранулярного бейнита с ферритом в середине по толщине листового проката толщиной 50 мм и не позволит получить требуемую прочность, рисунок 1 а.

Повышение содержания никеля от 1,46 (состав №2) до 2,02% (состав №5) при содержании хрома - (1,12-1,16%), меди - (0,36-0,39%) и молибдена - (0,12-0,15%) приводит к расширению температурных интервалов образования бейнита (при скоростях охлаждения менее $10^{\circ}\text{C}/\text{с}$) и мартенсита, а ферритно-перлитное превращение сдвигается в область более низких скоростей охлаждения на $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (от $10^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$), что также не исключает вероятности образования феррита в середине по толщине толстолистового проката и может сказаться на снижении прочностных характеристик, рисунок 1 б.

Дальнейшее повышение содержания никеля до 2,12% (состав №6 по сравнению с составом №4) при снижении содержания хрома до $\sim 0,7\%$ (более низкое, чем в составах №2 и №5) с содержанием меди (0,54-0,64%) и молибдена 0,24% (более высокое, чем в составах №1, №2 и №5) приводит к сдвигу всех превращений вправо, в область более низких скоростей охлаждения, при этом существенно расширяется область бейнитного превращения, рисунок 1 в. Вышеуказанные изменения могут способствовать формированию мартенсита преимущественно реечной морфологии, что может привести к получению значений прочностных характеристик существенно выше требуемых и к снижению вязкопластических свойств в листовом прокате.

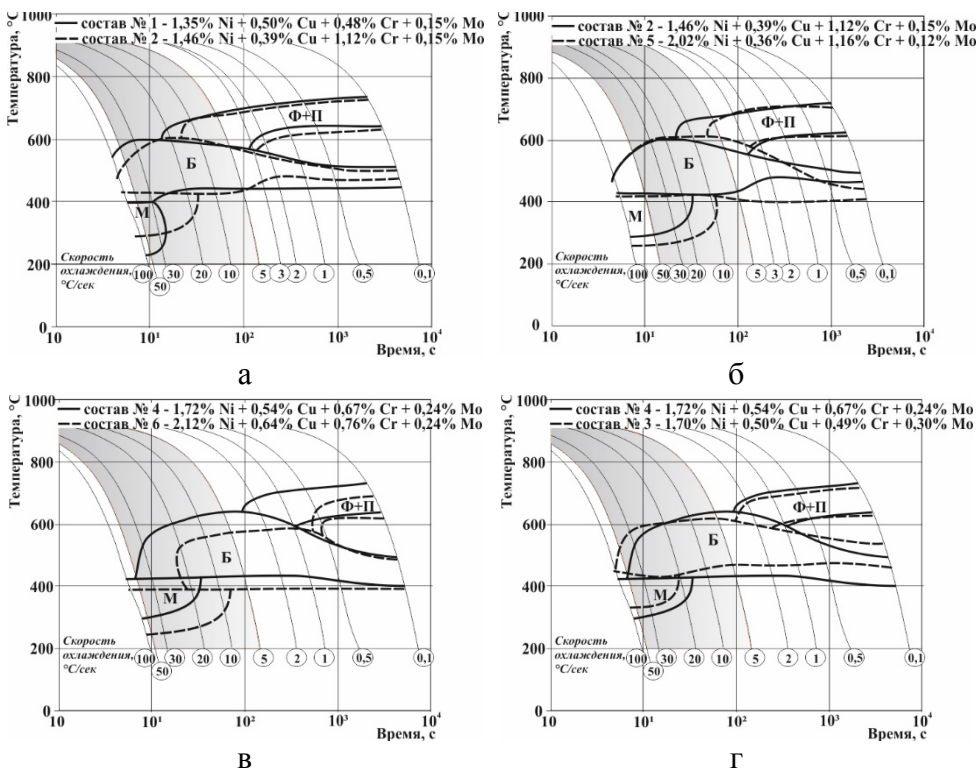
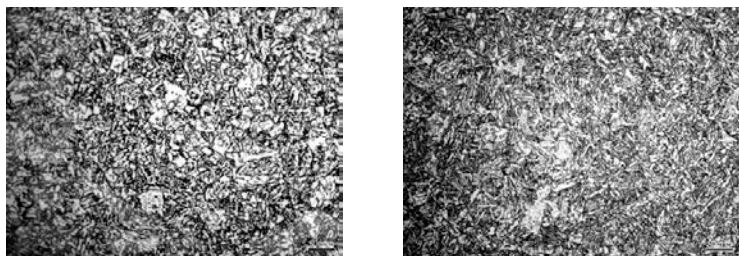


Рисунок 1 - Термокинетические диаграммы $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения аустенита сталей с различным содержанием хрома, никеля, меди и молибдена:
 а — составы № 1 и № 2;
 б — составы № 2 и № 5;
 в — составы № 4 и № 6;
 г — составы № 3 и № 4

Снижение содержания хрома до $\sim 0,5\%$ (состав №3 по сравнению с составом №4) при содержании никеля - (1,7-1,72%) и меди - (0,5-0,54%) при незначительном повышении содержания молибдена до 0,3% гарантирует отсутствие ферритного превращения в диапазоне промышленных скоростей охлаждения при закалке - $5\div 50^\circ\text{C}/\text{с}$, соответствующих охлаждению поверхности и середины по толщине листового проката до 50 мм, и сужает диапазон бейнитного превращения, рисунок 1 г.



а б
Рисунок 2 - Структура стали состава №3 после охлаждения со скоростями: $5^\circ\text{C}/\text{с}$ (а) и $50^\circ\text{C}/\text{с}$ (б)

По результатам проведенного анализа установлено содержание основных легирующих элементов, которое позволяет обеспечить в разработанной стали формирование бейнитно-мартенситной структуры

при отсутствии феррита по всей толщине листового проката до 50 мм, рисунок 2. Так, при содержании никеля 1,7%, меди 0,5%, хрома 0,49% и молибдена 0,30% в стали состава №3 бейнитное превращение протекает во всем указанном диапазоне промышленных скоростей охлаждения в температурном интервале $620\div 420^\circ\text{C}$, мартенситное превращение - при скоростях охлаждения $20^\circ\text{C}/\text{с}$ и более в температурном интервале $440\div 300^\circ\text{C}$, а ферритно-перлитное превращение отсутствует, рисунок 1 г.

Разработан химический состав новой экономнолегированной высокопрочной стали марки 09ХГН2МД: углерод – 0,08-0,10%, никель – 1,65-1,75%, медь - 0,50-0,60%, хром – 0,45-0,55%, молибден - 0,30-0,35%, ниобий - 0,02-0,04%, кремний - 0,30-0,40%, марганец - 0,65-0,75%, алюминий - 0,02-0,05%, фосфор - не более 0,012%, сера - не более 0,005%, азот - не более 0,008%, внесенный после проведения комплекса испытаний в разработанные Технические условия.

В четвертой главе разработаны режимы термической обработки листового проката на основании проведенных исследований по влиянию температуры закалки на размер аустенитного зерна, структуру и свойства стали, а также температурно-временных параметров отпуска на изменение структурных составляющих и процессы карбидообразования. Как было показано в главе 3, незначительные изменения химического состава низкоуглеродистой стали Mn-Cr-Ni-Mo-Cu композиции легирования приводят к изменению температур начала и конца фазовых превращений и изменению температурно-скоростного интервала существования областей различных фазовых превращений. В связи с этим, выбор режимов закалки и отпуска листового проката различной толщины (до 50 мм) является особенно важным.

В результате проведенных исследований установлено, что комплексное микролегирование разработанной стали ниобием в количестве 0,024% и легирование

молибденом - 0,3% эффективно сдерживает рост аустенитного зерна при нагреве под закалку вплоть до температуры 980°C, средний размер которого не превышает 11 мкм.

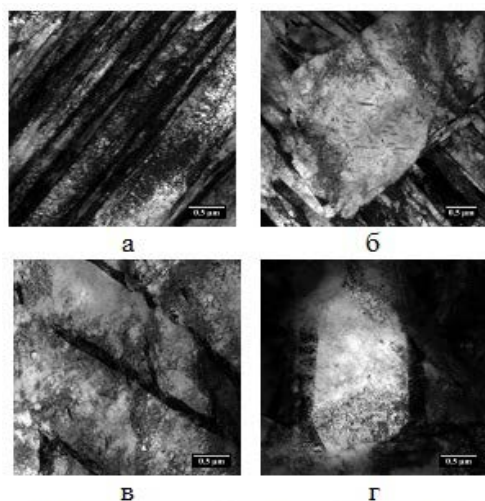


Рисунок 3 – Микроструктура образца, закаленного от температуры 950°C, где а – РМ, б – ВМ, в – РБ, г - ГБ

Таблица 2 – Параметры структуры закаленных образцов

Характеристика компоненты		Компоненты структуры			
		РМ	ВМ	РБ	ГБ
Закалка от температуры 900°C					
Объемная доля, %		5-10	35-40	20-25	35-40
Средний размер реек (фрагментов), мкм		0,13	1,43	0,68	0,80
Плотность дислокаций, $\times 10^{14} \text{ м}^{-2}$		32	24	2,9	2,7
Карбиды на границах, нм		-	-	-	100
$\gamma_{\text{ост}}$ на границах, нм		300	-	-	-
Частицы внутри кристаллитов	Размер, нм	40	170	100	50
	Объемная плотн., $\times 10^{20} \text{ м}^{-3}$	0,01	0,04	-	-
Закалка от температуры 950°C					
Объемная доля, %		45 - 50	2 - 5	15-20	20 -25
Средний размер реек (фрагментов), мкм		0,27	1,62	0,72	1,50
Плотность дислокаций, $\times 10^{14} \text{ м}^{-2}$		21	21	2,8	2,6
Карбиды на границах, нм		-	150	210	200
$\gamma_{\text{ост}}$ на границах, нм		300	-	-	-
Частицы внутри кристаллитов	Размер, нм	10	200	-	70
	Объемная плотн., $\times 10^{20} \text{ м}^{-3}$	0,01	0,06	-	-

бейнит, образующийся в нижнем температурном интервале, отличается дисперсным строением с развитой субструктурой (рисунок 4, б, в) и гарантирует более высокие значения временного сопротивления не менее 770 МПа.

Таблица 3 – Результаты механических испытаний образцов после закалки

Температура, °C	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCV ⁷⁰ , Дж/см ²
900	(1001÷959)/981	(847÷820)/827	(15,2÷14,8)/14,9	(47÷85)/66
950	(1099÷970)/1023	(875÷848)/859	(14,0÷13,6)/13,8	(43÷65)/54

При закалке в стали формируется бейнитно-мартенситная структура, а повышение температуры закалки от 900 до 950°C приводит к увеличению объемной доли реечного мартенсита (РМ) от 5-10 до 45-50%, снижению объемной доли высокотемпературного мартенсита (ВМ), реечного бейнита (РБ) от 55-65 до 17-25% и гранулярного бейнита (ГБ) от 35-40 до 20-25%, рисунок 3 и таблица 2. Структурные изменения, происходящие при повышении температуры закалки, приводят к возрастанию временного сопротивления при незначительном снижении ударной вязкости закаленной стали, таблица 3. Анализ полученных данных позволил рекомендовать температуру закалки 950°C для дальнейших исследований по влиянию температуры отпуска в диапазоне 570-690°C на конечную структуру и свойства.

На свойства стали оказывает влияние также и морфология образующегося бейнита. Исследования особенностей формирования различных морфологических типов бейнита при изотермических выдержках в интервале температур 450-600°C показали, что

Полученные данные подтвердили необходимость обеспечения протекания бейнитного превращения в более узком температурном интервале с целью минимизации образования бейнита в верхнем температурном интервале (рисунок 4 а), характеризующегося более низкими значениями временного сопротивления.

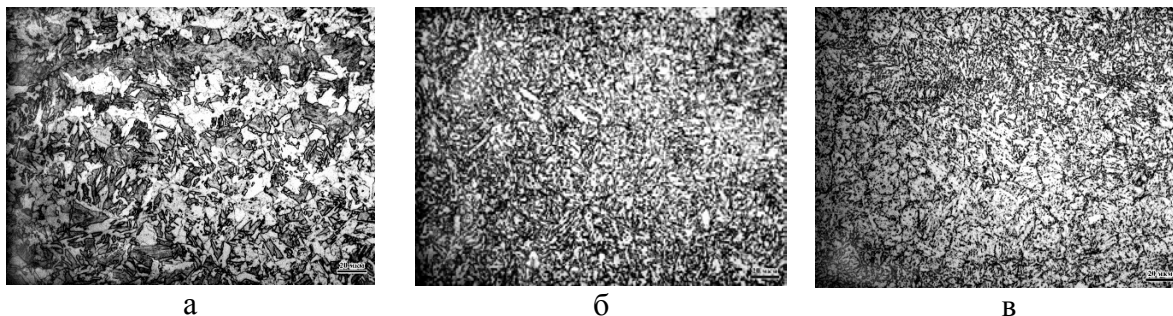


Рисунок 4 - Структура образцов, подвергнутых изотермическому $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращению при температурах: а — 600°C; б — 500°C; в — 450°C

По результатам анализа данных, полученных после отпуска в интервале температур 570-690°C, установлено, что при температуре отпуска 570°C наиболее значительные изменения происходят в мартенсите. Отпуск при температуре 570°C по сравнению с закаленным состоянием приводит к снижению плотности дислокаций от $21 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ до $3,1 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ в реечном мартенсите и от $21 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ до $2,1 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ в высокотемпературном мартенсите за счет выделения углерода. Вследствие этого на местах ранее обнаруженного после закалки $\gamma_{\text{ост}}$ и М-А-фазы по границам реечного мартенсита, а также реечного бейнита и гранулярного бейнита наблюдается формирование довольно крупных карбидов размером 120-210 нм и рост карбидов самоотпуска внутри кристаллитов высокотемпературного мартенсита до 280 нм. Совокупность вышеуказанных изменений приводит к снижению прочностных характеристик и повышению вязкопластических характеристик по сравнению с закаленным состоянием, таблицы 3 и 4.

Таблица 4 – Результаты механических испытаний образцов после закалки и отпуска

№ п/п	Температура, °C	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCV ⁻⁷⁰ , Дж/см ² (мин÷макс)
1	570	793	730	18,5	68,2	140-145
2	600	846	805	19,7	71,6	163-167
3	630	790	742	19,2	73,0	163-180
4	690	622	523	25,3	77,0	261-282
Требования		770-940	≥690	≥14	-	≥35

Повышение температуры отпуска до 600°C, по сравнению с отпуском при температуре 570°C, практически не влияет на изменение плотности дислокаций в мартенсите, но приводит к снижению плотности дислокаций в бейните: от $2,8 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ до $1,7 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ в реечном и от $2,6 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ до $1,4 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ в гранулярном бейните. Образуются новые карбиды по границам реечного и гранулярного бейнита (рисунок 5 а, б) и дисперсные карбиды размером от 9 до 100 нм в мартенсите, что и приводит к

повышению прочностных характеристик до уровня, близкого к закаленному состоянию (предела текучести до 805 МПа и временного сопротивления до 846 МПа). Вязкопластические характеристики также повышаются (ударная вязкость до 163-167 Дж/см² и относительное удлинение до 19,7%).

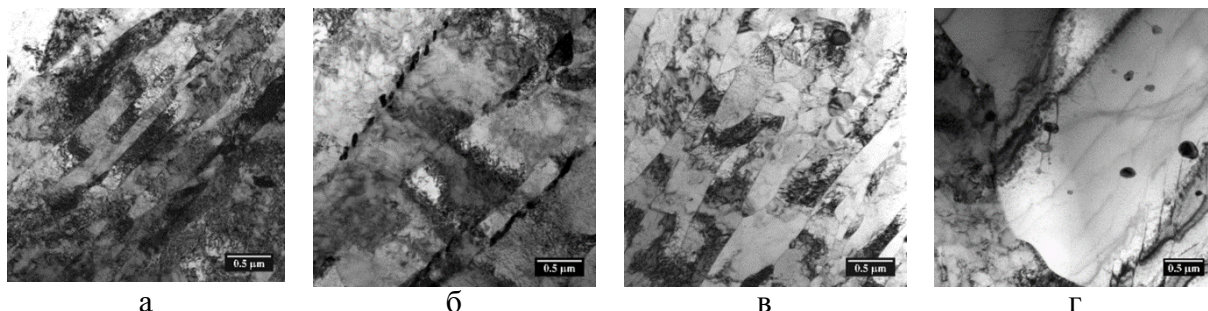


Рисунок 5 – Характерные структурные составляющие микроструктуры образцов после отпуска при температуре 600°C (а – РМ, б – РБ), 630°C (в – начальные процессы полигонизации в РМ) и 690°C (г- ПМ)

Усиление процессов диффузии углерода и легирующих элементов из мартенситной матрицы в карбидную фазу при температуре отпуска 630°C (по сравнению с отпуском 600°C) приводит к образованию на месте отдельных областей дислокационного мартенсита крупных практически бездислокационных областей α -фазы (переотпущенного мартенсита - ПМ), упрочненных карбидами размером от 5 до 185 нм, а также к образованию наноразмерных карбидов цементитного типа, легированных марганцем и хромом, рисунок 6 и таблица 5. Такие изменения способствуют снижению прочностных характеристик, при этом вязкопластические характеристики остаются неизменными, таблица 4.

При дальнейшем повышении температуры отпуска до 690°C происходит рост областей ПМ (рисунок 5 г) за счет снижения доли реечного мартенсита (рисунок 5 в), а также коагуляция и рост карбидов, приводящие к еще большему снижению прочностных характеристик и повышению вязкопластических характеристик, таблица 4.

Таблица 5 – Результаты химического анализа образцов из стали состава № 3, проведенного методом атомно-зондовой томографии (средние значения), ат. %

Место анализа	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Nb
Закалка от 950°C							
Исследованный объем	0,19	0,53	0,71	0,85	0,59	0,13	0,01
Кластеры	3,38	0,60	0,79	0,77	0,44	0,17	0,02
Закалка от 950°C + отпуск при 570°C							
Исследованный объем	0,06	0,57	0,72	0,97	0,52	0,13	0,006
Закалка от 950°C + отпуск при 630°C							
Исследованный объем	0,02	0,54	0,70	1,08	0,50	0,18	0,007
Кластеры	3,88	0,59	1,00	1,25	0,74	0,71	-

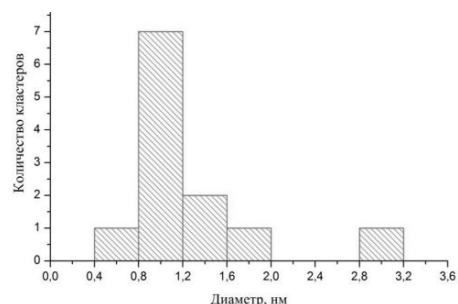


Рисунок 6 - Распределение кластеров, обогащенных углеродом по размеру после отпуска при 630°C

Установлено, что отпуск при температурах выше 630°C и выше недопустим для разработанной стали, так как приводит к образованию в структуре областей переотпущенного мартенсита с плотностью дислокаций 10^9 м^{-2} и менее (от 10 до 30%), способствующих снижению прочностных характеристик на 10-25%. Для дальнейших исследований был рекомендован отпуск в диапазоне температур $570\div 600^{\circ}\text{C}$, в результате которого в мартенсите происходит формирование дисперсных карбидов цементита размером от 9 до 100 нм с объемной плотностью $(0,7-2,9)\times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, обеспечивающих повышение прочности без снижения вязкопластических характеристик.

Влияние температурно-временных параметров отпуска на механические свойства стали определяли с помощью параметра Холломоны-Яффе (H_p^2), учитывающего комплексное воздействие как температуры отпуска, так и его продолжительности. Заготовки листового проката толщиной 12 мм подвергали термической обработке с варьированием H_p от 16,8 до 19,8. Установлено, что оптимальное сочетание механических свойств достигается в диапазоне значений H_p от 16,9 до 17,3 (рисунок 7 а). Выбор рациональных параметров отпуска листового проката различных толщин производился расчетным способом с учетом времени нагрева в зависимости от его толщины и применительно к термическому оборудованию ПАО «ММК», рисунок 7 б. Результаты расчетов для изготовления опытно-промышленной партии листового проката были внесены в технологическую документацию.

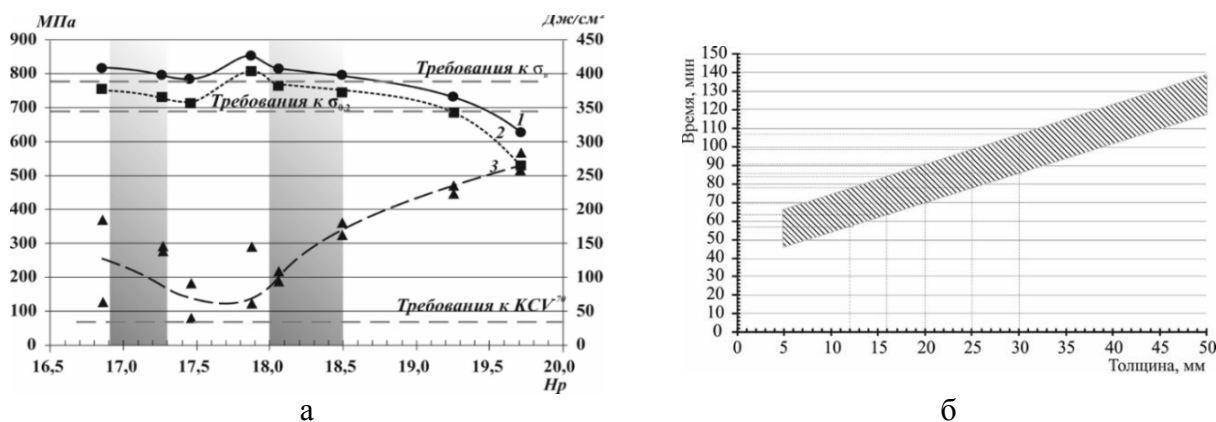


Рисунок 7 – График зависимости значений прочностных характеристик (1 – $\sigma_{\text{в}}$ и 2 – $\sigma_{0,2}$) и ударной вязкости при -70°C (3 – KCV^{-70}) от параметра Холломоны-Яффе (а) и длительности отпуска от толщины листового проката (б)

Пятая глава посвящена анализу результатов изготовления опытно-промышленной партии листового проката толщиной 12-30 мм из непрерывнолитых слэбов кислородно-конвертерного производства из стали марки 09ХГН2МД в условиях ПАО «ММК» по технологии горячей прокатки с последующей термической обработкой (закалка с высоким отпуском). Опытно-промышленная партия листового проката толщиной 12, 16, 20, 25 и 30 мм объемом 250 т изготовлена в соответствии с

² $H_p = T \times (C + \log(\tau))$, где

T-температура отпуска, К, C=20,

τ-время выдержки при отпуске, час

технической и технологической документацией, разработанной с учетом рекомендаций, изложенных в 3 и 4 главах.

Листовой прокат толщиной до 25 мм был изготовлен по технологии одностадийной прокатки с возрастающей схемой деформации; свыше 25 мм - по технологии двухстадийной прокатки с максимально возможными обжатами на черновой стадии и регламентацией схемы деформации на чистовой стадии с температурой ее окончания 870-930°C. Это способствует наибольшей проработке срединных слоев листового проката и позволяет избежать роста рекристаллизованных зерен после завершения первичной статической рекристаллизации из-за протекания процесса собирательной рекристаллизации и, как следствие, неоднородности по величине аустенитного зерна.

По результатам механических испытаний в объеме требований технической документации установлено, что листовый прокат толщиной от 12 до 30 мм после закалки и отпуска обладает сочетанием требуемой прочности, пластичности и вязкости: значения временного сопротивления составляют 770-880 МПа при среднем значении 822 МПа, предела текучести – 690-850 МПа при среднем значении 772 МПа, относительного удлинения – 14-28% при среднем значении 18%, ударной вязкости при температуре испытаний - 70°C - 123-395 Дж/см² при среднем значении 261 Дж/см².

Структура листового проката толщиной 16, 20, 25 и 30 мм, выявленная методом оптической металлографии, однородна по толщине и представляет собой смесь дисперсного бейнита и мартенсита различных морфологических форм. При этом исследование структуры листового проката толщиной 30 мм, определенный методом ПЭМ, показал, что основной структурной составляющей в стали является реечный мартенсит, объемная доля которого составляет до 50 %. Доли реечного и гранулярного бейнита в структуре занимают ~20 % и ~25 % соответственно. Также в структуре наблюдается до 5 % высокотемпературного мартенсита. Полученные данные близки к результатам, полученным в лабораторных условиях после отпуска при температурах 570-600°C. Результаты данных EBSD-анализа (рисунок 8) подтвердили, что в листовом прокате толщиной 30 мм по всей его толщине средние размеры структурных элементов близки (11,5-13 мкм).

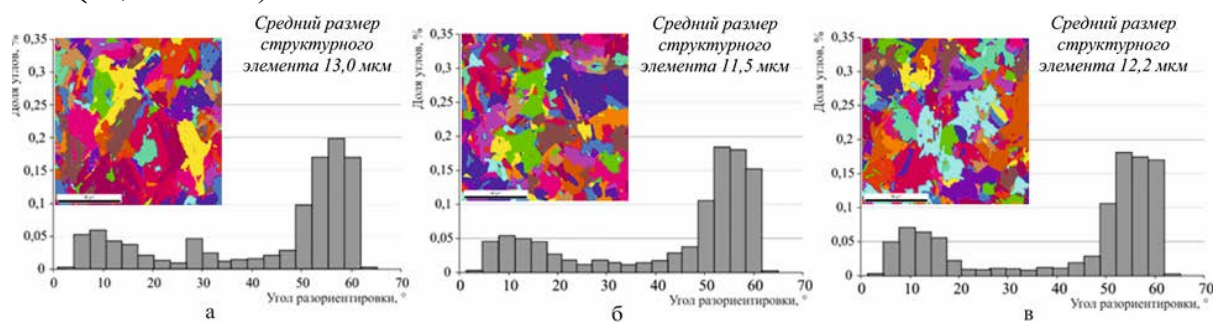
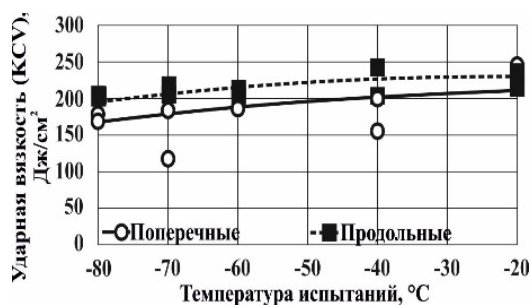


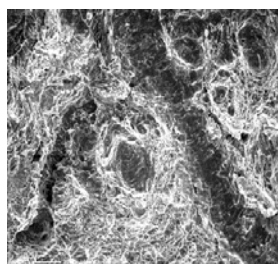
Рисунок 8 - Распределение межкристаллитных границ по разориентировкам со средним размером структурного элемента при угле толерантности 5° в листовом прокате 30 мм по толщине: поверхность 1 (а) – середина (б) – поверхность 2 (в) и ориентационные карты

Оценка хладостойкости листового проката из разработанной стали производилась по результатам испытаний на ударный изгиб и ударный изгиб после механического старения в продольном и поперечном направлении при низких температурах испытаний в диапазоне $-20 \div -80^\circ\text{C}$, а также по результатам фрактографических исследований поверхности разрушения образцов от листового проката толщиной 30 мм. Также учитывалась оценка вида излома полнотолщинных проб, как одного из важнейших показателей качества листового проката.

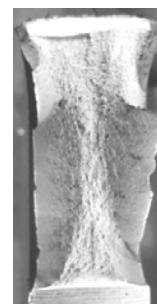
Листовой прокат обладает высоким уровнем ударной вязкости вплоть до температуры испытаний -80°C , рисунок 9 а. Исследование поверхности разрушения ударных образцов, испытанных при температуре -70°C , показало, что непосредственно под надрезом в области зарождения магистральной трещины разрушение образцов проходило с формированием преимущественно вязкого чашечного излома по телу зёрен, рисунок 9 б. Вид излома полнотолщинных образцов полностью волокнистый без расщеплений (рисунок 9 в), что говорит о высоком сопротивлении металла хрупким разрушениям и свидетельствует о формировании однородной по толщине листового проката бейнитно-мартенситной структуры.



а



б



в

Рисунок 9 - Зависимость ударной вязкости от температуры испытаний образцов, вырезанных из середины по толщине листового проката (а), с характерным участком зарождения магистральной трещины (б), а также вид излома полнотолщинной пробы (в) листового проката толщиной 30 мм

Проведены испытания листового проката на растяжение при пониженных температурах от -20 до -100°C . Установлено, что при понижении температуры испытаний до -100°C происходит лишь небольшое повышение прочностных характеристик $\sim$ на 10%, что подтверждает возможность его применения для строительства сварных конструкций, работающих при низких температурах.

Таким образом, достижение требуемых прочностных характеристик при сохранении высоких значений пластичности и ударной вязкости обеспечивается за счет формирования в экономнолегированной стали марки 09ХГН2МД ($C_{\text{экв}} \leq 0,53\%$) дисперсной бейнитно-мартенситной структуры, содержащей до 50% реечного и до 5% высокотемпературного мартенсита, а также до 45 % бейнита (до 20% бейнита реечной и до 25% гранулярной морфологии). При этом изменение доли структур реечной и гранулярной морфологии (зависящей, в том числе и от заданной толщины листов) при

неизменном соотношении общей доли бейнита и мартенсита практически не оказывает влияния на конечные механические свойства листового проката.

В шестой главе представлены результаты исследования качества сварного соединения, полученного электродуговой сваркой в условиях завода-строителя, а также результаты оценки возможности применения лазерной сварки для листового проката небольших толщин (10-12 мм).

Результаты исследований сварного стыкового соединения, полученного электродуговой сваркой в условиях ОАО «БЕЛАЗ», показали, что разработанная сталь отличается удовлетворительной свариваемостью без проведения дополнительных технологических мероприятий (предварительного подогрева и послесварочной термической обработки). Сварное соединение обладает повышенной ударной вязкостью в ЗТВ при температуре испытаний -70°C (среднее значение - 125 Дж/см^2) и обеспечивает равнопрочность с основным металлом ($\sigma_{\text{в}}=820-825 \text{ МПа}$).

Оценка возможности применения лазерной сварки производилась путем установления влияния более высокой скорости нагрева (характерной для лазерной сварки) на размер зерна, фазовые превращения и структуру на первых двух участках ЗТВ, а также посредством анализа влияния погонной энергии (при варьировании скорости сварки) и предварительного подогрева на структуру и микротвердость в ЗТВ и механические свойства сварных соединений, в том числе при низких температурах.

Применение высокоскоростного нагрева, характерного для лазерной сварки (500°C/с), по сравнению со скоростью нагрева 5°C/с способствует формированию более мелкого аустенитного зерна (рисунок 10 а, г) – на 15-20 %, и, как следствие, более дисперсной структуры на наиболее опасных участках ЗТВ.

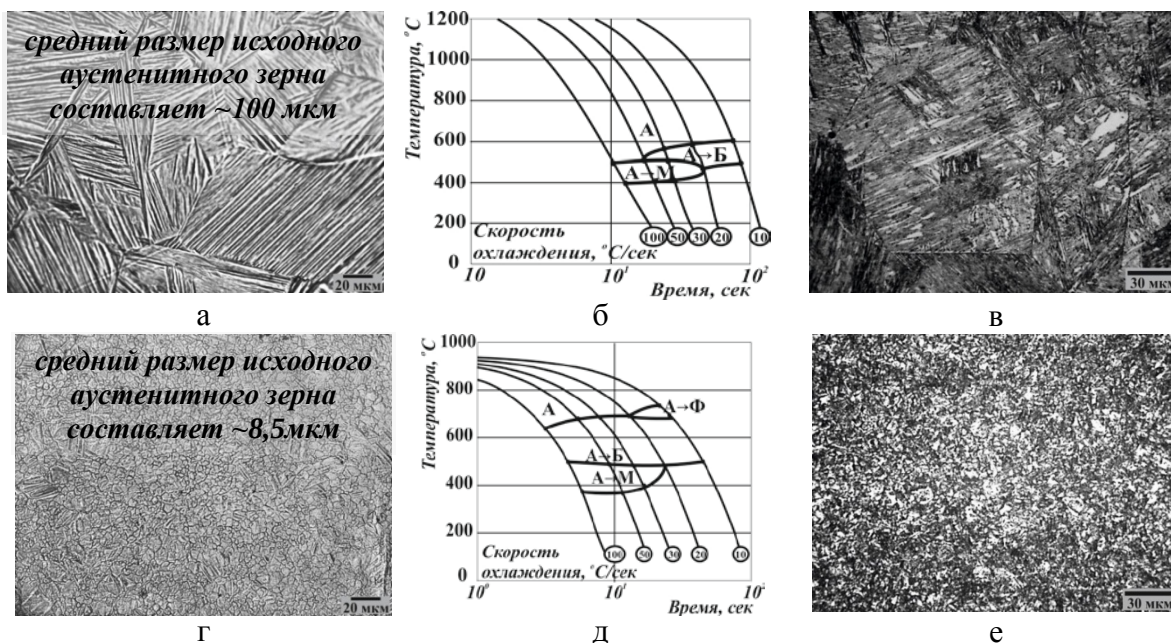


Рисунок 10 - Размер аустенитного зерна, полученного методом вакуумного травления (а, г), термокинетические диаграммы превращения аустенита (б, д) и микроструктура (в, е) после нагрева со скоростью 500°C/с до температур 1350°C (а-в) и 950°C (г-е), характерных для первого и второго участков ЗТВ

Высокоскоростной нагрев способствует формированию бейнитно-мартенситной структуры в более широком диапазоне скоростей охлаждения, а также повышению температурного интервала как мартенситного, так и бейнитного превращений (рисунок 10 б, д), что позволяет уменьшить вероятность получения грубых игольчатых структурных составляющих на наиболее опасных участках ЗТВ.

Ряд экспериментов по установлению влияния погонной энергии при сварке в результате проплавления образцов листового проката толщиной 10 мм на структуру и микротвердость в ЗТВ показал следующее. Снижение погонной энергии при лазерной сварки от 5 до 2,5 кДж/см приводит к уменьшению ширины ЗТВ и ее отдельных участков, при этом наблюдается увеличение средних значений микротвердости на участках крупного зерна и полной перекристаллизации (на 29 и 39 $HV_{0,1}$ соответственно) вследствие повышения доли структурных составляющих реечной морфологии (мартенсита и бейнита) за счет повышения скорости охлаждения после сварочного нагрева, рисунок 11 а-в и рисунок 12 а-в и д-ж.

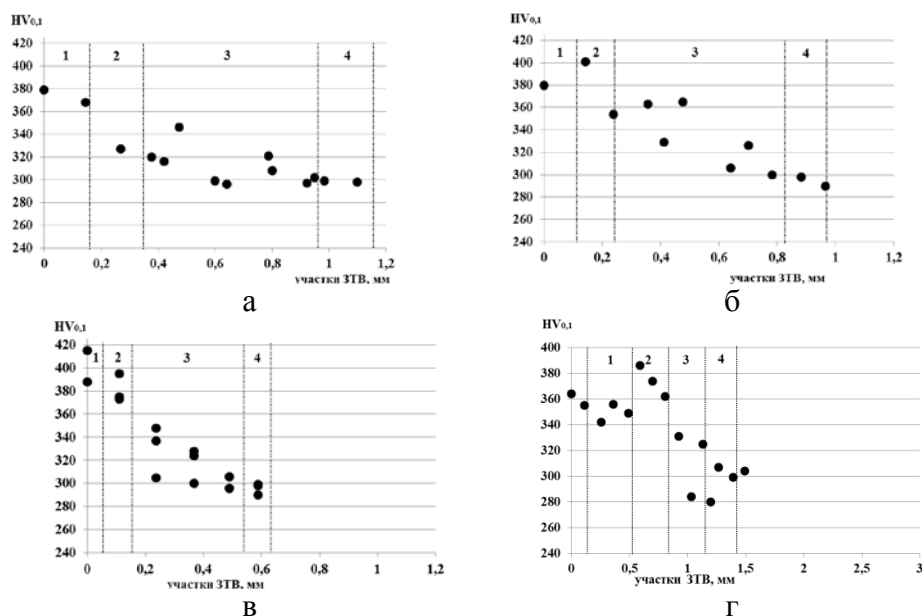


Рисунок 11 - Микротвердость $HV_{0,1}$ и ширина участков ЗТВ (обозначены цифрами) образцов, полученных в результате лазерного проплавления с погонной энергией 5 кДж/см (а), 3,3 кДж/см (б), 2,5 кДж/см (в) и стыкового сварного соединения с погонной энергией 3,8 кДж/см (г)

Установлено, что введение предварительного подогрева при лазерной сварке с погонной энергией 3,3 кДж/см для получения сварных соединений листового проката толщиной 10 мм способствует формированию дисперсной структуры по всей ЗТВ, что приводит к снижению и выравниванию значений микротвердости $HV_{0,1}$ на всех участках ЗТВ (средние значения микротвердости на различных участках уменьшаются на 43-58 $HV_{0,1}$) и не оказывает значительного влияния на механические свойства. При этом значения ударной вязкости образцов с надрезом по линии сплавления при температуре испытаний -60°C превышают требования технической документации и составляют $\sim 200 \text{ Дж/см}^2$, рисунок 13.

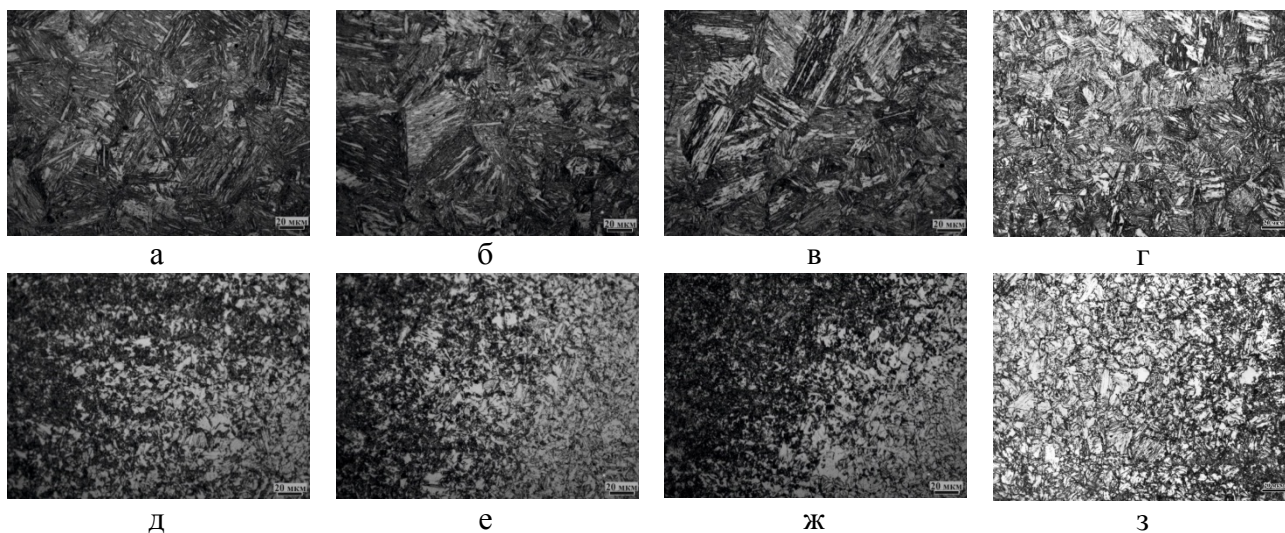


Рисунок 12 - Структура ЗТВ, полученной в результате лазерного проплавления с погонной энергией 5 кДж/см (а, д); 3,3 кДж/см (б, е); 2,5 кДж/см (в, ж) и в стыковом сварном соединении, полученном в результате лазерной сварки с погонной энергией 3,8 кДж/см, где: а-г – участки перегрева и полной перекристаллизации (1 и 2); д-з – участки частичной перекристаллизации и отпуска (3 и 4)

Применение лазерной сварки с погонной энергией 3,8 кДж/см для полного проплавления при изготовлении сварных соединений листового проката толщиной 12 мм из стали марки 09ХГН2МД способствует формированию дисперсной бейнитно-мартенситной структуры в ЗТВ (рисунок 12 г, з) со значениями микротвердости, соответствующими требованиям нормативной документации, и значениями ударной вязкости образцов с надрезом по линии сплавления при температуре испытаний -100°C - 100 Дж/см^2 (рисунок 13), что выше требований технической документации.

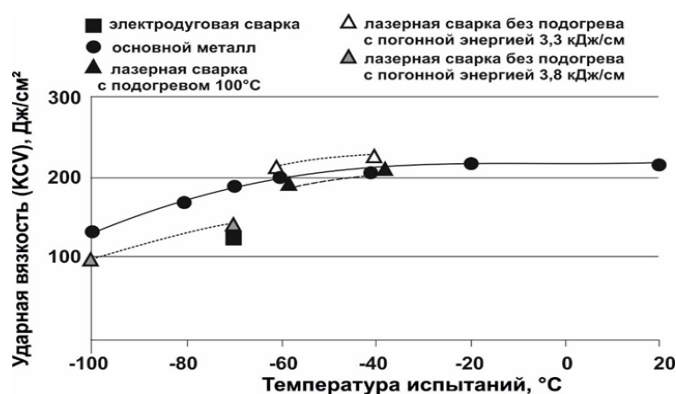


Рисунок 13 – Зависимости ударной вязкости для основного металла и сварных стыковых соединений, полученных электродуговой и лазерной сваркой, от температуры испытаний

Таким образом, определена возможность применения лазерной сварки для получения сварных стыковых соединений листового проката из разработанной стали марки 09ХГН2МД в толщинах до 12 мм.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ:

1. Разработан химический состав новой экономнолегированной стали улучшенной свариваемости ($C_{\text{экв}} \leq 0,53\%$) с гарантированным пределом текучести 690 МПа и ударной вязкостью не менее 35 Дж/см^2 при -70°C : углерод – 0,08-0,10%, никель – 1,65-1,75%,

медь - 0,50-0,60%, хром – 0,45-0,55%, молибден - 0,30-0,35%, ниобий - 0,02-0,04%, кремний - 0,30-0,40%, марганец - 0,65-0,75%, алюминий - 0,02-0,05%, фосфор - не более 0,012%, сера - не более 0,005%, азот - не более 0,008%. Подана заявка на патент № 209120117 от 26.06.2019 г.

2. Исследованы фазовые превращения в экономнолегированной низкоуглеродистой стали при варьировании никеля, хрома, меди и молибдена в узких пределах и показано, что:

- снижение содержания хрома от 1,12 до 0,48% при содержании никеля ~1,4% приводит к расширению температурной области бейнитного превращения, а также сдвигу ферритно-перлитного и мартенситного превращений в область более высоких скоростей охлаждения, что способствует формированию структуры преимущественно гранулярного бейнита с ферритом в середине по толщине листового проката и не позволят получить требуемую прочность;

- повышение содержания никеля до 2,02% при содержании хрома ~1,16% и молибдена 0,15% приводит к расширению температурных интервалов образования бейнита и мартенсита. При этом ферритно-перлитное превращение хотя и сдвигается в область более низких скоростей охлаждения (от 10 до 5°C/с), однако это не исключает вероятности образования феррита в середине по толщине толстолистового проката и приводит к снижению прочностных характеристик;

- повышение содержания никеля до 2,12% и молибдена до 0,24% при снижении содержания хрома до ~0,7% приводит к сдвигу всех превращений в область более низких скоростей охлаждения и более низких температур. Вышеуказанные изменения способствуют формированию структуры с бейнитом и мартенситом преимущественно реечной морфологии, что приводит к снижению вязкопластических характеристик в листовом прокате;

- в стали разработанного химического состава в диапазоне скоростей охлаждения, характерных для охлаждения листового проката толщиной до 50 мм при закалке, интервал бейнитного превращения составляет 640-420°C, мартенситного - 440-300°C, обеспечивая формирование бейнитно-мартенситной структуры по всему сечению.

3. Определены требования к структуре стали выбранного легирования для обеспечения требуемых механических свойств:

- формирование при закалке аустенита с размером зерна не крупнее 14 мкм бейнитно-мартенситной структуры с плотностью дислокаций в мартенсите $21 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$, бейните $(2,6-2,8) \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$, при этом мартенсита должно быть ~ 50-55%, а соотношение долей бейнита реечной и гранулярной морфологии зависит от толщины листового проката;

- образование при отпуске мелкодисперсной карбидной фазы (со средними размерами не более 12 нм) внутри реек/фрагментов реечного мартенсита, реечного

бейнита и областей гранулярного бейнита, а также карбидов по границам кристаллитов со средними размерами не более 50-120 нм.

4. Рекомендовано для условий ПАО «ММК» осуществлять прокатку для листов толщиной более 25 мм по режимам двухстадийной прокатки с максимально возможными обжатыми (не менее 12 %) для обеспечения максимальной проработки срединных слоев листового проката. Для листового проката толщиной до 25 мм рекомендована одностадийная прокатка с увеличением относительной величины обжатий по проходам от начала к концу прокатки с температурой окончания прокатки 870-930°C.

5. Разработаны режимы закалки и высокого отпуска листового проката толщиной до 50 мм на основании проведенных исследований и показано следующее:

- закалка от температуры 950°C способствует повышению прокаливаемости и формированию структуры со структурными составляющими преимущественно реечной морфологии: реечного мартенсита и реечного бейнита;

- отпуск рекомендован в диапазоне температур 570÷600°C во избежание образования областей переотпущенного мартенсита, приводящих к недопустимому снижению прочностных характеристик; время выдержки зависит от толщины листа и определяется в соответствии с параметром Холломона ($H_p = T \times (C + \log(\tau))$), который должен составлять от 16,9 до 17,3.

6. Показана принципиальная возможность применения лазерной сварки для листового проката толщиной до 12 мм из разработанной стали, которая обеспечивает в стыковых сварных соединениях равнопрочность с основным металлом при ударной вязкости в ЗТВ вблизи линии сплавления не менее 128 Дж/см² при температуре испытаний -100°C. При этом установлено:

- применение нагрева со скоростью 500°C/сек по сравнению с нагревом со скоростью 5 °C/сек приводит к снижению устойчивости аустенита, обеспечивая протекание фазовых превращений при более высоких температурах и формирование более дисперсных структур, уменьшая вероятность получения грубых игольчатых структурных составляющих на наиболее опасных участках зоны термического влияния, что позволяет получить повышенные значения ударной вязкости при низких температурах в ЗТВ;

- при снижении погонной энергии лазерной сварки (варьирование скорости сварки) уменьшается ширина ЗТВ и ее отдельных участков, однако происходит увеличение микротвердости на участках крупного зерна и полной перекристаллизации из-за повышения доли структурных составляющих реечной морфологии, тем не менее не приводящее к охрупчиванию.

7. Разработана техническая и технологическая документация на поставку и изготовление листовой стали марки 09ХГН2МД, внедренная в промышленном производстве ПАО «ММК», и изготовлена опытно-промышленная партия листового

проката объемом 250 т с требуемым уровнем механических свойств, что подтвердило обоснованность разработанных решений.

8. Изготовленный с применением разработанных режимов и испытанный в условиях ПАО «ММК» и ОАО «БЕЛАЗ» листовой прокат и его сварные соединения из новой высокопрочной хладостойкой стали марки с пониженным уровнем легирования ($C_{э\text{кв}} \leq 0,53\%$), выполненные электродуговой сваркой, обладают повышенным комплексом механических свойств, включая хладостойкость при температурах до -70°C . Полученные характеристики соответствуют требованиям ОАО «БЕЛАЗ» к материалам для изготовления карьерных самосвалов перспективных проектов, предназначенных для эксплуатации в сложных климатических условиях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

В журналах из списка, рекомендованного ВАК России:

1. **Голубева М.В.**, Сыч О.В., Хлусова Е.И., Мотовилина Г.Д. Исследование механических свойств и характера разрушения новой экономнолегированной хладостойкой стали с гарантированным пределом текучести 690 МПа // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. - №4 (49). - С. 19-24.
2. **Голубева М.В.**, Сыч О.В., Хлусова Е.И., Мотовилина Г.Д., Святышева Е.В., Рогожкин С.В., Лукьянчук А.А. Изменение структуры высокопрочной экономнолегированной стали марки 09ХГН2МД при отпуске // *Вопросы материаловедения*. – 2018. - № 1 (93). - С.15-26.
3. Сыч О.В., **Голубева М.В.**, Хлусова Е.И. Разработка хладостойкой свариваемой стали категории прочности 690 МПа для тяжелонагруженной техники, работающей в арктических условиях // *Тяжелое машиностроение*. – 2018. - № 4. - С. 17-25.
4. **Голубева М.В.**, Сыч О.В., Хлусова Е.И. Исследование структуры и свойств сварных соединений из высокопрочной хладостойкой стали марки 09ХГН2МД, полученных электродуговой и лазерной сваркой // *Тяжелое машиностроение*. - 2018. - № 7-8. - С. 23-31.

Изданных на английском языке и индексируемых в базе данных SCOPUS:

5. Sokolov M., Salminen A., Khlusova E.I., Pronin M.M., **Golubeva M.**, Kuznetsov M. Testing of New Materials and Computer Aided Optimization of Laser Beam Welding of High-Strength Steels // В сборнике: *Physics Procedia* 15. Сер. “15th Nordic Laser Materials Processing Conference, Nolamp 2015” - 2015. - С. 255 – 264.
6. **Golubeva M.V.**, Sych O.V., Khlusova E.I., Motovilina G.D., Sviatysheva E.V., Rogozhkin S.V., Lukyanchuk A.A. Structure Changes of High-Strength Economically Alloyed Steel 09KhGN2MD (09CrMnNi2MoCu) When Tempering // *Inorganic Materials: Applied Research*. - 2018. - Т. 9. - № 6. - С. 997-1005.

В прочих изданиях:

7. **Голубева М.В.** Особенности формирования структуры и свойств в зоне термического влияния высокопрочной стали при лазерной сварке // Тезисы докладов. XIV Международная конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». - С-Пб. - 17-19 июня 2015. - С. 9.
8. **Голубева М.В.** Влияние параметров лазерной сварки на формирование структуры и свойств в зоне термического влияния высокопрочной стали // Тезисы докладов в сборнике

материалов XII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (с международным участием), ИМЕТ РАН. - Москва. - 13-16 октября 2015. - С. 31-33.

9. **Голубева М.В.** Исследование структуры и свойств свариваемой стали класса прочности 690, предназначенной для изготовления кузовов и платформ большегрузных автомобилей // Тезисы докладов. XV Международная конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». - С-Пб. - 29-30 июня 2016. - С. 12.

10. **Голубева М.В.,** Сыч О.В., Орлов В.В., Денисов С.В. Разработка и исследование свариваемой стали класса прочности 690, предназначенной для изготовления кузовов и платформ большегрузных автомобилей // Сборник материалов научных чтений им. гл.-корр. РАН Ивана Августовича Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов». - ИМЕТ РАН. – Москва. - 6-7 сентября 2016. - С. 36-37.

11. **Голубева М.В.,** Сыч О.В., Хлусова Е.И., Мотовилина Г.Д. Исследование механических свойств и характера разрушения новой экономнолегированной хладостойкой стали с гарантированным пределом текучести 690 МПа // Сборник материалов IX Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (посвященной 110-летию со дня рождения профессора, д.т.н. Николая Митрофановича Складова). - ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ. - г. Москва. - 20 апреля 2017. - С. 15.

12. **Голубева М.В.,** Мотовилина Г.Д., Святышева Е.В., Сыч О.В. Особенности формирования структуры в стали марки 09ХГН2МД после термоулучшения // Сборник материалов Уральской школы молодых металловедов XVIII Международной научно-технической школы-семинара металловедов-молодых ученых. Ответственный редактор: А.А. Попов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Ключевой Центр превосходства «Материаловедение перспективных металлосодержащих материалов и технологий их обработки». - 2017. - С 138-142

13. Сыч О.В., Хлусова Е.И., **Голубева М.В.,** Гусев М.А., Яшина Е.А., Денисов С.В., Горшков С.Н., Стеканов П.А., Авраменко В.А., Мычак М.Н. Разработка и внедрение технологий производства хладостойкого металлопроката для ледокольного флота, морской и инженерной техники, эксплуатирующейся в Арктике // Сборник лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа в рамках Международной конференции и выставки по освоению нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Offshore). - г.Санкт-Петербург. - 12-15 сентября 2017г. - С.31-33.

14. **Голубева М.В.,** Сыч О.В., Святышева Е. В. Влияние режимов отпуска на структуру и свойства новой высокопрочной хладостойкой стали марки 09ХГН2МД // В книге: Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов материалы XXIV Уральской школы металловедов-термистов. ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». -2018. - С. 234-235.

15. **Голубева М.В.,** Сыч О.В. Исследование сварных соединений из стали категории прочности 690 МПа, полученных электродуговой и лазерной сваркой // Сборник докладов IX Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий». - ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». – Москва. – 2018. - С. 32-40.