

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»,
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от «28» октября 2025 № 10

О присуждении Молочковой Ольге Сергеевне, Российская Федерация,
ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Комплексное воздействие легирования, микролегирования,
модифицирования и условий охлаждения при кристаллизации на струк-
турно-фазовое состояние и свойства жароизносостойких белых чугунов» по
специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и
сплавов принята к защите 25 июня 2025 г. (протокол заседания № 8) диссер-
тационным советом 24.2.324.03, созданным на базе федерального государствен-
ного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носо-
ва», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации,
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 1193/нк от 12 октября
2022 года.

Соискатель Молочкова Ольга Сергеевна, «04» октября 1983 года рождения,
диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Вы-
бор состава и исследование структуры, свойств жароизносостойких ком-
плексно-легированных белых чугунов» защитила в 2012 году в диссертаци-
онном совете Д 212.111.05, созданном на базе федерального государствен-
ного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального
образования «Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова». Диссертацию на соискание ученой степени доктора техни-
ческих наук подготовила в докторантуре при федеральном государственном
бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнито-
горский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
работает доцентом кафедры литьевых процессов и материаловедения в фе-
деральном государственном бюджетном образовательном учреждении выс-
шего образования «Магнитогорский государственный технический универ-

ситет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре Литейных процессов и материаловедения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук, Колокольцев Валерий Михайлович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», советник при ректорате.

Официальные оппоненты:

1. Макаров Алексей Викторович, доктор технических наук, академик РАН, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН), главный научный сотрудник лаборатории механических свойств,

2. Банных Игорь Олегович, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук, заведующий лабораторией Конструкционных сталей и сплавов, ведущий научный сотрудник,

3. Панов Алексей Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, Набережночелбинский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», кафедра материалов, технологий и качества, профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти в своем положительном отзыве, подписанном Болдыревым Денисом Алексеевичем, доктором технических наук, доцентом, кафедра «СОМДиРП» ИМХиЭ ТГУ, профессором, Клевцовым Геннадием Всеволодовичем, доктором технических наук, профессором, кафедра «СОМДиРП» ИМХиЭ ТГУ, профессором, указала, что «...сформулированные в диссертационной работе Молочковой О.С. теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, которое заключается в разработке новых принципов создания жароизносостойких белых чугунов для изготовления отливок различного функционального назна-

чения с высоким комплексом специальных свойств, являются актуальными для современного металловедения. Диссертационное исследование Молочковой О.С. на тему: «Комплексное воздействие легирования, микролегирования, модифицирования и условий охлаждения при кристаллизации на структурно-фазовое состояние и свойства жароизносостойких белых чугунов» соответствует паспорту специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов и является законченной научно-квалификационной работой. По актуальности, новизне полученных результатов, их теоретическому и практическому значению работа полностью соответствует требованиям п. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Молочкова Ольга Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Соискатель имеет 63 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 44 работы, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, опубликовано 13 работ, в изданиях, входящих в научометрические базы Web of Science и Scopus, опубликовано 4 работы, изданы 2 монографии. Сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Авторский вклад соискателя объемом 16,4 п.л. в опубликованных работах общим объемом 56,5 п.л. состоит в проведении анализа существующих и разработке принципов создания новых комплексно-легированных белых чугунов (КЛБЧ) с сочетанием высоких специальных свойств, проведении теоретических и экспериментальных исследований закономерностей влияния химического состава, модифицирования, микролегирования, температурно-временных режимов охлаждения сплавов в литейной форме на структуру, фазовый состав, механические и специальные свойства КЛБЧ, определении закономерностей формирования оксидных слоев, образующихся на поверхности КЛБЧ в процессе испытаний при повышенных температурах, разработке математических зависимостей совместного влияния C, Cr, Mn, Ni, Ti, Nb, Al, а также условий охлаждения при затвердевании и структурных параметров на твердость, износостойкость и жаростойкость чугунов, подготовке научных работ к опубликованию в открытой печати.

Наиболее значительные публикации по теме диссертации:

1. Молочкова, О. С. Влияние бора и скорости охлаждения при затвердевании на химический состав структурных составляющих комплексно-легированных белых чугунов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti / О. С. Молочкова,

Е. В. Петроченко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 15-22.

2. Колокольцев, В. М. Комбинированное влияние добавок бора и условий охлаждения при затвердевании на структуру и свойства комплексно-легированного белого чугуна системы Cr - Mn - Ni - Ti / В. М. Колокольцев, Е. В. Петроченко, О. С. Молочкова // Черные металлы. – 2024. – № 2. – С. 39-45. – DOI 10.17580/chm.2024.02.07.

3. Молочкова, О. С. Основные принципы рационального легирования и модификации комплексно-легированных белых чугунов для обеспечения высоких показателей специальных свойств / О. С. Молочкова // Технология машиностроения. – 2023. – № 11. – С. 21-28.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск), подписанный доктором технических наук, доцентом, профессором кафедры технологии материалов и транспорта Агеевой Е.В. Замечания: 1. Из текста автореферата не ясно, каким образом осуществлялась оптимизация оптимального количества модификаторов при разработке нового состава чугунов, и что при этом являлось критерием оптимизации. 2. Из текста автореферата не ясно, каковы перспективы дальнейшей разработки темы.

2. ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (г. Тюмень), подписанный доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой материаловедения и технологии конструкционных материалов Ковенским И.М. Замечания отсутствуют.

3. ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (г. Санкт-Петербург), подписанный доктором технических наук, доцентом, профессором кафедры материаловедения и технологии художественных изделий Шахназаровым К.Ю. Замечания отсутствуют.

4. ООО «УралЭнергоРесурс» (г. Магнитогорск), подписанный доктором технических наук, генеральным директором Зубковым А.А. Замечания отсутствуют.

5. ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского Центра «Курчатовский институт»» (г. Санкт-Петербург), подписанный доктором технических наук, профессором, начальником 31 лаборатории Цукановым В.В. Замечания: 1. На основании каких данных приведены ряды влияния химических элементов на свойства чугунов опытных составов (стр. 16). 2. На стр. 19 приводится утверждение «Дополнительное легирование Сг-Мn чугуна ниобием обеспечивает значительный эффект дисперсионного упрочнения сплава». При каком режиме термической обработки

данный эффект реализуется (Примечание- на стр. 29 показано, что термическая обработка не проводилась). 3. На стр. 20-21 указывается: «вторичное твердение в литейной форме при охлаждении», при этом не указывается, когда было «первичное твердение». 4. На стр. 24 приведено: «Показано влияние добавок бора в количестве 0.0046-0.036%...». Однако эти данные не представлены, а рекомендовано содержание бора 0,02-0,03 %. Обширные литературные данные обычно рекомендуют более низкое содержание бора.

6. ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (г. Магнитогорск), подписанный доктором технических наук, главным специалистом группы по научной деятельности НТЦ ПАО «ММК» Денисовым С.В. Замечания: 1. В отливках из любых чугунов сильно развита ликвация, кроме того, структура изменяется от поверхности в глубину отливки, а в диссертации на фотографиях микроструктур и в таблицах свойств не указаны места вырезки образцов. А отличие структур даже в одной и той же плавке затрудняет понимание действия модификаторов и трактовку выводов. 2. В работе представлены результаты большого количества экспериментов, однако не вполне понятно какие из апробированных технологий реально внедрены в действующее производство.

7. ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород), подписанный доктором технических наук, профессором, профессором кафедры материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов Гавриловым Г.Н. Замечания: 1. В автореферате не отмечено, какой материал был взят в качестве эталона при испытаниях на изнашивание. 2. Из текста автореферата не понятно, почему в качестве базового легирующего комплекса были выбраны хром, марганец, никель и титан. 3. В автореферате на стр. 11 автор утверждает, что при повышении содержания хрома в сплаве снижается температура начала кристаллизации первичных карбидов TiC. Механизм этого процесса требует разъяснения.

8. ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург), подписанный доктором физико-математических наук, доцентом, профессором кафедры термообработки и физики металлов Окишевым К.Ю. Замечания: 1. Не вполне ясно, почему один и тот же состав материала оказался оптимальным одновременно и как износостойкого при комнатных температурах, и как окалиностойкого при высоких: влияние совместного воздействия износа и высоких температур, насколько можно судить, не изучалось. Кроме того, условия кристаллизации зависят не только от материала формы, но и от размера отливки, однако влияние второго фактора в выводах не обсуждается.

9. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (г. Новокузнецк), подписанный доктором физико-математических наук, доцентом, заведующим кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля Громовым Е.В.; подписанный доктором технических наук, доцентом, профессором кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля Невским С.А. Замечания: 1. В автореферате термины «жаростойкость» и «окалиностойкость» часто употребляются для обозначения одного и того же понятия. 2. На стр. 10 автореферата написано, что бор в основном растворяется в карбидной фазе. А есть ли в сплаве нитриды бора? 3. На стр. 18 утверждается, что «наилучшие механические и специальные свойства – у чугуна с содержанием алюминия 2,5%», но не написано какие свойства.

10. Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН (ИМАШ УрО РАН) (г. Екатеринбург), подписанный доктором технических наук, доцентом, главным научным сотрудником лаборатории микромеханики материалов Пугачевой Н.Б. Замечания отсутствуют.

11. ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (г. Владимир), подписанный доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Технологии функциональных и конструкционных материалов» Кечиным В.А. Замечания: 1. Из автореферата не ясно, по каким методикам и режимам осуществляли испытания разработанных комплексно-легированных белых чугунов на абразивную износостойкость в соответствии с предполагаемыми условиями эксплуатации изделий. 2. В автореферате отсутствуют сведения о параметрах технологических процессов плавки и литья, применяемых для получения опытных чугунов.

12. ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (г. Екатеринбург), подписанный доктором технических наук, профессором, профессором Высшей школы транспортно-технологических систем Потехиным Б.А. Замечания: 1. Почему бор в 3 раза повышает окалиностойкость (стр. 36, вывод 3)? Из автореферата этот факт не просматривается. 2. Кроме того, не понятно влияние формы (сухая, сырая, кокиль) на износостойкость и «рост сплавов»? Факт убедительный, интерпретаций нет (стр. 37, вывод 7)?

13. ООО «Механоремонтный комплекс» (г. Магнитогорск), подписанный кандидатом технических наук, главным инженером (в промышленности) Юсиным А.Н. Замечания отсутствуют.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается соответствием их научных интересов профилю рассматриваемой диссер-

тации, а также наличием публикаций в области металловедения, формирования структурно-фазового состояния и эксплуатационных свойств железоуглеродистых сплавов в зависимости от химического состава, технологии их модифицирования и скорости охлаждения в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus. Это подтверждает их способность квалифицированно определить и оценить научную новизну и практическую ценность исследований.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана и теоретически обоснована научная концепция создания новых жароизносостойких белых чугунов и повышение их специальных свойств путем легирования, микролегирования и модифицирования высокоактивными элементами; которая реализуется за счет получения жароизносостойких материалов с высоким комплексом специальных свойств с гетерофазной структурой, состоящей из стабильной аустенитной металлической основы и упрочняющих фаз: первичных и эвтектических карбидов типа МС и M_7C_3 ;

предложена оригинальная научная гипотеза о возможности повышения окалиностойкости, ростоустойчивости и износстойкости сплавов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti путем дополнительного легирования ниобием и алюминием вследствие повышения структурно-фазовой стабильности сплавов и образования на поверхности отливок оксидных пленок типа шпинели;

доказаны зависимости между химическим составом, структурными параметрами (микротвердость эвтектики, объемная доля карбидов $(Nb, Ti)C$, объемная доля карбидов $(Cr, Fe, Mn)_7C_3$, длина карбидов, площадь карбидов и расстояние между карбидами), условиями охлаждения при затвердевании и твердостью, износстойкостью и жаростойкостью чугунов, которые могут использоваться для разработки новых жароизносостойких сплавов систем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb с высоким уровнем специальных свойств: окалиностойкостью, ростоустойчивостью и износстойкостью,

впервые **получены** ряды влияния параметров микроструктуры на свойства чугунов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb, основанные на анализе полученных в результате обработки экспериментальных данных математических зависимостей специальных свойств сплавов от параметров микроструктуры и нейросетевого моделирования, которые позволяют определить эффективность влияния параметров микроструктуры на твердость и специальные свойства сплавов;

определен, что формирование оксидных слоев непосредственно зависит от первичной литой структуры: структура оксидной пленки повторяет исходную структуру чугуна; состав оксидной пленки существенно зависит от рас-

пределения легирующих элементов между структурными составляющими поверхностного слоя литых чугунов, и, таким образом, определено, что окалиностойкость зависит не только от химического состава сплава, но и от особенностей его структуры (литье в кокиль и песчано-глинистую форму).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что обнаруженные закономерности формирования структурно-фазовых состояний в зависимости от химического состава и условий охлаждения в литейной форме и подходы к выбору легирующих элементов для управления структурой и свойствами комплексно-легированных белых чугунов различных систем легирования создают основу для разработки новых составов жароизносостойких чугунов для работы в условиях повышенных температур и абразивного изнашивания;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** методы анализа структуры и свойств, в том числе оптическая и электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, рентгеноспектральный микронализ, методы количественной металлографии с использованием анализатора изображений Thixomet PRO, методы проведения испытаний на износостойкость, окалиностойкость и ростоустойчивость, измерения микротвердости структурных составляющих жароизносостойких чугунов различных систем легирования;

изложены данные о влиянии бора на структуру и свойства комплексно-легированных белых чугунов, показывающие, что микролегирующее влияние бора сопровождается перераспределением легирующих элементов между фазами сплава и изменением количественного соотношения фаз и свидетельствует, что бор влияет на превращения в твердом состоянии – происходит вторичное твердение при охлаждении сплавов в литейной форме с выделением дисперсных карбидов типа MC и M_7C_3 в зависимости от системы легирования, а также демонстрирует, что модифицирующий эффект бора проявляется в изменении параметров дендритной структуры и карбидных фаз, а условия охлаждения при затвердевании оказывают существенное влияние на эффективность действия бора, как модифицирующей и микролегирующей добавки;

раскрыта проблема ухудшения механических и специальных свойств комплексно-легированных белых чугунов систем $Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti$, $Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb$ при введении в сплав более 0,02% бора, т.к. это приводит к укрупнению карбидов, уменьшению их объемной доли и к огрублению структуры, происходит снижение модифицирующего эффекта, (так называемое перемодифицирование или «старение» модифицирующего эффекта);

изучены закономерности формирования структуры и свойств чугунов систем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti, Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb, модифицированных кальций-стронциевым карбонатом, подтверждающие, что в зависимости от условий охлаждения при затвердевании, обработка чугунов карбонатом повышает специальные свойства: окалиностойкость, износостойкость и ростоустойчивость;

проведена модернизация существующих математических моделей и численных методов решения задачи прогнозирования свойств экспериментальных сплавов, позволившая получить количественные зависимости между химическим составом, структурными параметрами, условиями охлаждения при затвердевании и твердостью, износостойкостью и жаростойкостью чугунов, которые могут использоваться для разработки новых жароизносостойких сплавов систем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb с высоким уровнем специальных свойств.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан и рекомендован к внедрению новый состав белого жароизносостойкого чугуна для производства облицовочных плит, идущих на комплектацию тушильных вагонов для коксохимического производства в условиях ПАО «Гайский ГОК» (г. Гай), что позволило более чем в 2 раза продлить их срок эксплуатации и привело к сокращению количества текущих и капитальных ремонтов самих тушильных вагонов; разработан и рекомендован к внедрению новый состав белого жароизносостойкого чугуна для производства экспериментальной брони желоба агломерата в ООО «Буруктальский металлургический завод» (г. Светлый), которая оказалась более износостойкой при высоких температурах; разработан и рекомендован к внедрению новый состав белого жароизносостойкого чугуна для производства колосников спекательных тележек на предприятии ЗАО «Южуралвтормет» (г. Челябинск), что увеличило срок их службы более чем в 2 раза, и позволило получить экономический эффект более 2 млн руб. в ценах 2008 года; разработан и рекомендован к внедрению новый состав белого жароизносостойкого чугуна для производства конус-клиньев в условиях предприятия ООО «УралЭнергоРесурс» (г. Магнитогорск), что позволило повысить несущую способность до 90 кН для данного типа отливок, увеличить срок службы более чем в 2 раза и исключить потерю несущей способности вследствие увеличенных физико-механических свойств, при этом достигаемый экономический эффект при изготовлении обеспечил сокращение себестоимости изделия на 30%;
определены основные принципы рационального легирования и модификации комплексно-легированных белых чугунов для обеспечения высоких

показателей специальных свойств деталей машин и механизмов, которые работают в условиях абразивного изнашивания, при нормальных и повышенных температурах: при разработке комплексно-легированных белых чугунов, обладающих высокими специальными свойствами, систему Fe-Cr-Mn-Ni-Ti целесообразно использовать в качестве основы для легирования; для формирования устойчивой структуры металлической основы с карбидным упрочнением и образования оксидных фаз шпинельного типа, а также повышения уровня окалиностойкости, ростоустойчивости и износостойкости необходимо применять дополнительное легирование сплавов ниобием и алюминием; в связи с отрицательным влиянием феррита на свойства жароизносостойких КЛБЧ его количество регламентируется: не более 15-19%; при низкой скорости охлаждения отливки рациональное количество бора должно быть порядка 0,01%, а при охлаждении отливки с высокой скоростью – до 0,03%; максимальные износостойкость и окалиностойкость у сплавов системы Fe-Cr-Mn-Ni-Ti будут обеспечены при обработке карбонатом в количестве 5-6 кг/т, для сплавов системы Fe-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb рациональное количество вводимого карбоната должно составлять 3-5 кг/т. Эти принципы могут быть использованы при создании сплавов для оборудования металлургической и нефтеперерабатывающей промышленности, сельскохозяйственной техники, горно-обогатительного производства и других отраслей;

создана модель эффективного применения полученных знаний в виде разработанных аналитических схем закономерностей формирования структуры и свойств в зависимости от условий охлаждения при затвердевании и химического состава сплавов для следующих систем легирования: Fe-Cr-Mn-Ni-Ti; Fe-Cr-Mn-Ni-Ti-Al; Fe-Cr-Mn-Ni-Ti-Nb; Fe-Cr-Mn-Ni-Ti-B; Fe-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb-B; Fe-Cr-Mn-Ni-Ti+(Ca, Sr)CO₃; Fe-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb+(Ca, Sr)CO₃;

представлены технологические рекомендации по содержанию бора в количестве 0,02% для сплавов систем Fe-Cr-Mn-Ni-Ti-B и Fe-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb-B для повышения комплекса специальных свойств: окалиностойкости, ростоустойчивости, износостойкости и твердости этих сплавов; выявлено, что максимальные износостойкость, окалиностойкость и ростоустойчивость у сплавов системы Fe-Cr-Mn-Ni-Ti будут обеспечены при обработке карбонатом в количестве 5 кг/т - для сплавов системы Fe-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb рациональное количество вводимого карбоната составляет 3-5 кг/т, а при введении кальций-стронциевого карбоната свыше 6 кг/т произойдет эффект перемодифицирования сплавов, что приведет к снижению износостойкости и жаростойкости чугунов; при этом допустимое содержание феррита в металлической основе чугунов должно составлять 15-19%, поскольку увеличение

количества феррита приводит к снижению жароизносостойкости. Скорость охлаждения отливок влияет на соотношение феррита и аустенита, поэтому при заливке чугунов в сухую песчано-глиняную форму (ПГФ) количество алюминия не должно превышать 2%, при заливке в кокиль – 2,5%; количество ниобия не должно превышать 1,5–2,0% при заливке в сухую ПГФ и 3,0% при заливке в кокиль.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

достоверность обеспечена применением комплекса стандартных и современных методов исследования: сканирующей микроскопии, количественного анализа с применением статистической обработки данных, рентгенографии, рентгеноспектрального микроанализа, измерений микротвердости, испытаний на твердость, износстойкость и жаростойкость; согласованностью результатов лабораторного и промышленных экспериментов; большим объемом выполненных экспериментальных данных с их статистико-вероятностной обработкой и воспроизводимостью результатов эксперимента; проведением опытных и промышленных плавок чугунов разработанных составов и использованием их для производства отливок различного функционального назначения; использованием современных методов компьютерной обработки данных для сопоставления собственных экспериментальных результатов со сведениями, известными из зарубежных и российских научных публикаций;

теория построена на фундаментальных положениях теории легирования, микролегирования и модификации жароизносостойких белых чугунов и не противоречит им, согласуется с опубликованными экспериментальными данными ведущих исследователей по теме диссертации;

идея базируется на обобщении передового опыта разработки жароизносостойких белых чугунов с высоким комплексом специальных свойств, работающих в условиях интенсивного абразивного износа и повышенных температурах, анализе требований к структуре чугунов, а также с учетом различных условий охлаждения при затвердевании (конфигурация отливок, масса и толщина стенки) и возможности внедрения в серийное производство;

использованы сравнения полученных автором данных о формировании структуры и свойств комплексно-легированных белых чугунов с ранее полученными результатами экспериментальных исследований других авторов;

установлено качественное и количественное совпадение результатов, проведенных в диссертационной работе исследований и испытаний, полученных с использованием различных методик, с известными теоретическими и экспериментальными данными и научными представлениями;

использованы современные методики сбора и обработки исходной информации, сертифицированные измерительные системы, высокопроизводительные компьютерные комплексы и лицензионное специализированное программное обеспечение.

Личный вклад соискателя состоит в:

инициативе постановки, планирования и выполнения работы по теме диссертации, основывающейся на результатах собственных экспериментов и аналитическом рассмотрении современных научных знаний о химическом составе, структурных превращениях, механических, специальных свойствах комплексно-легированных белых чугунов. Большая часть результатов, изложенных в диссертации, получены лично автором, другая часть – при ее активном участии в работе совместно с коллективами соавторов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания.

В отзыве ведущей организации:

1. В цели работы отмечается про легирование, микролегирование и модифицирование высокоактивными элементами. С модифицированием высокоактивными элементами, а это - ЩМ, ЩЗМ и РЗМ - можно согласиться, однако легирование, микролегирование высокоактивными элементами - спорное утверждение. Главное отличие модифицирования от легирования в том, что содержание модифицирующего элемента снижается со временем практически до нуля (эффект старения, увядания), а содержание легирующего элемента сохраняется практически постоянным. Далее в работе отмечается про применение в качестве легирующих таких карбидообразующих элементов как Cr, Mn, Ni, Ti, Nb, которые, строго говоря, не относятся к высокоактивным (окисляющимся на открытом воздухе и т.д.).

2. Задача 3. Необходимо уточнить о каких именно защитных свойствах оксидных слоёв идёт речь: износостойких, задиростойких, окалиностойких и т.д.

3. Стр. 7. Отмечается про раскисление чугуна алюминием в ковше перед разливкой. Непонятно для чего оно проводится, если в составе чугуна априори присутствуют все необходимые раскислители, в частности, Si и Mn. Или же ставилась задача обеспечить достаточно глубокое раскисление? Тогда до какой степени и зачем?

4. Стр. 8. Почему в качестве сравнительного эталона износостойкости выбрана сталь 45, не являющаяся износостойким материалом.

5. Стр. 17. При температурах выше 800°C не сами ферритные хромистые стали настолько теряют жаропрочность, что часто прогибаются под собственным весом, а конструкции и узлы, изготовленные из этих сталей.

6. Стр. 20. Насколько, в какой степени влияет на себестоимость проведение после закалки двух-, трёхкратного отпуска?

7. Стр. 21. Высокохромистый чугун назван природным. То есть он действительно встречается в дикой природе?

8. Стр. 25. Кремний способствует образованию не перлита, а феррита.

9. П. 1.5. Модифицирование является синонимом инокулирования, поэтому в названии подраздела необходимо оставить что-то одно.

10. Стр. 37. Ещё раз про разницу между модифицированием и легированием. Отличие заключается не только в стадийности, но во временном факторе.

11. Стр. 44. К модифицирующим элементам также относятся цирконий и РЗМ.

12. Стр. 52. В чём разница между повышенными и высокими температурами?

13. Стр. 53. Переменный нагрев и охлаждение, чередование нагрева и охлаждения носит термин – термоциклирование.

14. В задаче №6 речь идёт о разработке только одного состава нового жароизносостойкого чугуна. Это как пример практического применения оптимального химического состава?

15. В обозначении систем чугунов разделов 3.1, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2, главы 4, выводов по главе 4, главы 5 и др. местах по тексту пропущены железо (Fe), углерод (C), кремний (Si).

16. С. 137. А может быть наоборот - при неровной поверхности карбидов за счёт своих выступов они лучше удерживаются в металлической основе?

17. Чем можно объяснить, см. табл. 3.14, 4.2-4.4, 4.7, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, рис. 4.20 и др. места, различные тенденции повышения или понижения структурных параметров чугунов, залитых в сухую и сырую ПГФ и кокиль, см. табл. 3.16, различные тенденции или отсутствие тенденций повышения или понижения содержания химических элементов по глубине?

18. С. 142. Укрупнение карбидов и уменьшению их объёмной доли - это процесс коагуляции, но не старение или перемодифицирование. Старение и перемодифицирование – это разные процессы.

19. На с. 173 и 174 информация про диссоциацию кальций-стронциевого карбоната повторяется.

20. Общее замечание – работа не структурирована по части отдельного выделения методической главы, из-за чего эта информация размыта по всем главам, а также в части информации из чужих литературных источников, перемежающейся вместе с собственными результатами. Все ссылки на чужие литературные источники необходимо перенести в 1-ю главу. В остальных

главах – только собственные результаты, при этом допускаются ссылки на собственные литературные источники.

В отзыве официального оппонента А.В. Макарова:

1. Формулировки положения 2 раздела «Научная новизна» носят заявительный характер («Описаны... зависимости...», «Впервые получены ряды влияния параметров микроструктуры...»), не раскрывают существо полученных научных результатов. Это затрудняет оценку их научной новизны.

2. Положения, выносимые на защиту, должны в значительной мере соответствовать положениям научной новизны. Однако в формулировках двух указанных разделов такое соответствие можно проследить не во всех случаях.

3. На стр. 12 диссертации сказано, что «разработанный новый состав белого жароизносостойкого чугуна (патент РФ № 2777733) обеспечивает лучшие показатели специальных свойств по сравнению с прототипом» (с указанием повышения в процентах износостойкости и окалиностойкости). Однако не приведен химический состав этого прототипа, что не позволяет проанализировать отличия в легировании сравниваемых чугунов.

4. Трудно согласиться с утверждением на стр. 25 диссертации о том, что твердость кубического карбида Me_{23}C_6 в среднем сопоставима с твердостью тригонального карбида Me_7C_3 , поскольку карбид M_7C_3 (Me – в основном Cr) значительно тверже.

5. Сформулированные в выводе 7 к главе 2 диссертации пути повышения специальных свойств чугунов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti не были обоснованы в указанной главе, а были выбраны «на основании информационно-патентных исследований и литературного обзора», представленных в главе 1.

6. Испытания на износостойкость проводили по методике, регламентированной ГОСТ 23.208-79 «Метод испытания материалов на износостойкость при трении о не жестко закрепленные абразивные частицы». В качестве абразива использовали электрокорунд зернистостью №16П, предусмотренный указанным ГОСТ при проведении общей сравнительной оценки износостойкости материалов. Однако ГОСТ допускает при оценке износостойкости в конкретных условиях изнашивания использовать «абразивный материал, соответствующий материалу, воздействующему при эксплуатации». Изделия из белого чугуна в подавляющем большинстве случаев в процессе эксплуатации подвергаются изнашиванию природными абразивами на основе диоксида кремния SiO_2 с твердостью около 10 ГПа, а не электрокорундом Al_2O_3 – синтетическим абразивом (получаемый методом переплавки чистого глинозема или восстановительной плавки алюмосодержащих бокситов в электродуговых печах) с твердостью порядка 20 ГПа. Развитие основных механизмов из-

нашивания (микрорезание и царапание) определяется соотношением твердостей абразива и испытуемого материала (или его упрочняющих фаз). Поэтому с научной и практической точек зрения предпочтительнее было использовать в качестве абразива кварцевый песок или природный абразив кремень с основой диоксида кремния (кремнезема).

7. К сожалению, в работе не уделяется должного внимания анализу абразивной износостойкости. Не исследованы: механизмы абразивного изнашивания; роль металлической основы (развитие или отсутствие мартенситного превращения при изнашивании; приводится лишь исходная микротвердость аустенита, однако износостойкость определяется не исходной твердостью, а эффективной прочностью на поверхности изнашивания); не приводится микротвердость различных карбидных фаз и эти значения не соотносятся с твердостью абразива для обоснования механизмов изнашивания; на стр. 130 диссертации при получении математических зависимостей коэффициента относительной износостойкости от параметров карбидной фазы использовали микротвердость эвтектики, а не микротвердость собственно карбидной фазы, хотя например, на стр. 141 сказано «карбиды являются важной составной fazой в структуре чугуна, их объемная доля может достигать 40%».

8. На страницах 20 и 194 диссертации использован термин «композиционный механизм упрочнения». Следует пояснить, что понимается под указанным механизмом упрочнения применительно к белым чугунам.

9. На микрофотографиях на рисунках 3.4 и 3.7 приведены слишком мелкие «нечитаемые» размерные полки, а на рисунках 3.10а, 3.11а, 3.19а, 3.31а и 5.11а размерные полки отсутствуют. Это затрудняет оценку размеров отдельных структурных составляющих, фаз.

В отзыве официального оппонента И.О. Банных:

1. Среди использованных в работе литературных источников малое количество современных и зарубежных публикаций, вследствие чего из рассмотрения выпадают актуальные данные по легированию, модификации и структурно-фазовому состоянию жаро-, износостойких белых чугунов.

2. Ограничен выбор методик проведения экспериментов, из рассмотрения выпадает кинетика процессов образования окалины и формирования специальных свойств (износостойкость). Поскольку рабочие условия рассматриваемых в работе материалов подразумевают одновременное, протяженное во времени воздействие высокой температуры и абразивного износа, для лучшего понимания закономерностей влияния структурно-фазового состояния на свойства, при проведении эксперимента следовало бы определять структуру, фазовый состав, состав, глубину слоя окалины и износостойкость на одном образце.

3. В экспериментальных данных практически отсутствуют погрешности измерения и сведения о количестве исследованных образцов.

4. В работе в значительном объёме представлены данные локального рентгеноспектрального анализа. Однако при использовании данной методики следует с осторожностью относиться к количественному содержанию лёгких элементов, таких как кислород, углерод, бор, определение которых, в силу физических основ этого метода, приводит к высокой погрешности измерения. Для оценки состава неметаллических фаз целесообразно рассматривать содержание элементов в атомных процентах.

5. Предложенный на стр. 162-163 диссертации механизм влияния бора на твёрдость структурных составляющих чугуна при замещении атомов углерода представляется спорным и не подтверждён какими-либо структурными исследованиями: вследствие более высокого сродства к углероду бор будет предпочтительно заменять железо, а не углерод в Fe-C сплавах. Большой размер атома бора по сравнению с углеродом будет приводить не к уменьшению, как это утверждается в работе, а к увеличению параметра кристаллической решётки при замещении им углерода. Следует отметить, что атомы углерода, замещённые бором, не обязательно будут участвовать в образовании карбидов, но могут находиться в твердом растворе в той или иной концентрации.

6. При проведении рентгеноструктурного анализа не определялись параметры кристаллической решётки структурных составляющих, что могло бы дать информацию о перераспределении элементов, особенно внедрения, в структурных составляющих рассматриваемых чугунов.

В отзыве официального оппонента А.Г. Панова:

1. Автором выполнен анализ опыта исследований структурообразования и свойств белых чугунов преимущественно отечественных источников информации. Полезно было бы более широко сопоставить полученные результаты с зарубежными достижениями в области жароизносостойких чугунов.

2. В диссертации методология и методы исследования представлены лишь во введении, описанию методик удалено мало внимания, особенно методикам получения образцов, в том числе модифицирования, методикам испытаний ростустойчивости, износстойкости и окалиностойкости, определения «эффективности модификации».

3. В работе разработаны модели прогнозирования свойств для сплавов с Cr ~ 18–19 %, однако не раскрыт вопрос о границах применимости моделей при более низком или высоком содержании хрома (например, 12–14 % или > 20 %), что ограничивает возможность экстраполяции результатов.

4. Большая часть экспериментальных результатов получена на лабораторных образцах, промышленная апробация которых произведена на ограниченном наборе изделий. Остаётся вопрос масштабируемости результатов для производства крупных отливок с относительно низкими скоростями кристаллизации и охлаждения.

5. Из материалов диссертации не до конца понятным и очевидным выглядит механизм формирования относительно прочной защитной оксидной плёнки, содержащей стронций, выявленной при испытаниях на окалиностойкость образцов КЛБЧ, полученных с модифицированием материалами, содержащими карбонат стронция.

6. В рукописи не представлены общие выводы с результатами анализа предшествующего опыта исследований по теме диссертации, что затрудняет понимание, каким образом автор поставил цель исследования.

7. Рукопись не содержит раздела с терминами и определениями, однако в тексте встречаются термины, не являющиеся стандартизованными или общепринятыми, что затрудняет понимание текста, например, «избыточные дендриты твёрдого раствора». Кроме того, в тексте встречаются термины, относящиеся к области модифицирования расплавов (инокулирование, модифицирование), которые использовались до выхода ГОСТ Р 72222-2025 (Национальный стандарт Российской Федерации. Модификаторы расплавов. Термины и определения) с разным толкованием, автору следовало пояснить, в каком толковании он использует эти термины.

В ходе заседания диссертационного совета:

В таблицах с рентгеноспектральным количественным микроанализом показано количество карбидообразующих элементов столько-то, а до 100% какой элемент дополняет. В докладе было сказано про карбиды M_7C_3 , однако карбидообразующих элементов должно быть гораздо больше, как это объяснить. Бор - очень активный элемент, почему Вы считаете, что он входит в состав карбоборидов, а не образует собственные бориды, вы пытались их обнаружить в структуре? Ниобий и титан очень близки по своим свойствам, зачем вводили ниобий, а не увеличили количество титана. Какие оксиды образует ниобий в отличие от титана. В чем заключается микролегирующее и модифицирующее бором, в чем отличие. На сколько точно выполняется условие кодирования при переводе абсолютных величин содержания легирующих элементов. Какова погрешность при практически проведенном эксперименте. Каким образом коррелирует износостойкость с окалиностойкостью и ростустойчивостью сплавов при введении алюминия и ниobia. Результаты работы использованы для ряда изделий, для которых можно было бы разделить влияние на эксплуатационную стойкость окисления, роста или износа. Каким

образом и на каком объеме выборки обучали нейросетевую программу «Модель» на исследуемых сплавах. Можно ли использовать разработанные аналитические схемы зависимостей свойств сплавов от химического состава и условий охлаждения для других сложнолегированных сплавов (чугунов).

Соискатель Молочкова О.С. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию. Так как РСКА – это полуколичественный метод анализа, то содержание углерода не учитывается. По результатам термодинамического моделирования процессов кристаллизации, а также рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализов карбобориды не были обнаружены в структуре исследуемого типа чугунов. При содержании в сплаве более 0,6% титана в чугуне образуются пленочные включения оксидов титана, что отрицательно сказывается на механических и специальных свойствах. Ниобий вводится в состав чугунов, чтобы получить стойкие комплексные карбиды $(Nb,Ti)C$, а также ниобий повышает окалиностойкость сплавов за счет того, что он входит в состав оксидных слоев, образующихся при температуре 800°C при испытаниях. Ниобий имеет большее сродство к углероду и сразу образует стойкие карбиды $(Nb,Ti)C$. Бор действует для данного типа отливок как микролегирующий и модифицирующий элемент. Если превысить содержание бора более 0,03%, происходит эффект перемодификации, что приводит к укрупнению карбидов. По результатам многих исследователей, например, Счастливцева В.М., бор образует твердые растворы с железом: в α -железе бор образует твердые растворы замещения, а в γ -железе – твердые растворы внедрения. Поэтому если мы превысим концентрацию модификатора в 0,03%, то это приведет к укрупнению и росту карбидных частиц и эффекту перемодификации, что нежелательно. В соответствии с матрицей планирования были выплавлены сплавы в три типа литьевых форм, определяли химический состав всех сплавов. Ошибка не превышала 5-7%, это не сказалось на расчете регрессионных уравнений. Адекватность регрессионных уравнений оценивали по коэффициенту Фишера, значимость коэффициентов в уравнении оценивали по коэффициенту Стьюдента, все коэффициенты значимы, уравнения адекватны.

Если легировать сплавы только ниобием, то повышается износостойкость, а окалиностойкость ухудшается. Если легировать сплавы алюминием, то повышается окалиностойкость, а износостойкость будет на низком уровне. При совместном легировании алюминием и ниобием удалось достичь одновременного повышения этих двух специальных свойств. При анализе данных по всем образцам, которые были изучены в работе, более 1300 образцов, было выявлено, что наилучшие показатели специальных свойств: износостойкость, окалиностойкость и ростоустойчивость у сплавов, одновременно до-

полнительно легированных 2% алюминия, 2% ниобия и модифицированных бором в количестве 0,02%. Это и было целью работы. Для изделий, которые работают при повышенных температурах из ранее использованных сталей 110Г13Л и 75Х24ТЛ, катастрофическое окисление начинается уже при 560-570°C, оксидные пленки не обладают защитными свойствами, идет окисление вглубь стали, происходит растрескивание поверхности, что ухудшает износостойкость. Явление необратимого увеличения объема при нагревании данного типа изделий приводит к ухудшению окалинностойкости и износостойкости, будет происходить растрескивание оксидных пленок на поверхности сплавов, которое приведет к ухудшению эксплуатационных характеристик.

Нейросетевая программа «Модель» - это инструмент программы Microsoft Excel 1997 года, которая позволяет получать ряды влияния различных факторов на свойства исследованных сплавов. Коэффициенты в этих рядах влияния показывают, например, на сколько сильно каждый химический элемент влияет на то или иное свойство (твердость, износостойкость, окалинностойкость). Благодаря этим рядам мы можем анализировать, какие химические элементы, входящие в состав чугунов, залитых в сухую и сырую песчано-глинистую форму, и кокиль, будут оказывать наибольшее влияние на эксплуатационные свойства. Нейросеть была обучена на базе данных исследованных чугунов в количестве более 1300 штук. Аналитические схемы являются инструментом системного анализа, который позволяет установить взаимосвязь различных факторов и параметров между собой. Пользуясь данными аналитическими схемами, наглядно можно увидеть, к чему приведет изменение химического состава сплавов и скорости охлаждения, а также в результате чего повышаются эксплуатационные свойства. Если химический состав сплавов будет подобен рассмотренной группе жароизносостойких чугунов, то этими схемами можно пользоваться.

На заседании 28 октября 2025 года диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, заключающееся в установлении закономерностей кристаллизации, формирования структурно-фазового состояния и свойств жароизносостойких чугунов в различных условиях охлаждения и в процессах их легирования, микролегирования, модификации, позволяющих управлять структурой и специальными свойствами сплавов в процессе изготовления из них изделий с высоким потенциалом работоспособности, что имеет важное хозяйственное значение для предприятий горно-металлургического и машиностроительного комплексов и вносит су-

щественный вклад в развитие экономики Российской Федерации, присудить Молочковой О.С. ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 8 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 17, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель
диссертационного совета

Чукин Михаил Витальевич

Ученый секретарь
диссертационного совета

Полякова Марина Андреевна

28 октября 2025 г.