

## **О Т З Ы В**

**официального оппонента Макарова Алексея Викторовича**

**на диссертационную работу**

**МОЛОЧКОВОЙ ОЛЬГИ СЕРГЕЕВНЫ**

**«Комплексное воздействие легирования, микролегирования, модифицирования и условий охлаждения при кристаллизации на структурно-фазовое состояние и свойства жароизносостойких белых чугунов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности**

**2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов**

Диссертационная работа Молочковой О.С. направлена на разработку научных и технологических подходов к созданию новых жароизносостойких белых чугунов и улучшению комплекса их специальных эксплуатационно-важных свойств за счет рационального легирования и научно-обоснованного выбора условий кристаллизации при охлаждении в литейной форме.

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Литейный легированный белый чугун продолжает оставаться базовым материалом для деталей горно-металлургического и коксохимического оборудования, эксплуатируемых при повышенных температурах и интенсивном абразивном износе. Изготовление изделий сложной геометрии экономически целесообразно и зачастую единственно возможно только методами литья. В условиях интенсификации современного производства к материалу изделий предъявляются все более высокие требования по одновременному обеспечению улучшенных механических и специальных свойств (износостойкости, окалинестойкости, ростоустойчивости), недостижимых для традиционных легированных чугунов. Дальнейшие перспективы совершенствования белых чугунов в качестве конкурентоспособных полифункциональных материалов связаны исключительно с комплексно-легированными белыми чугунами (КЛБЧ). Поэтому одной из приоритетных задач современного металловедения черных сплавов является разработка и внедрение в производство КЛБЧ, дополнительно легированных, микролегированных и модифицированных для улучшения их структурно-фазового состояния, механических и служебных свойств. Поэтому рассматриваемая диссертационная работа, направленная на решение указанных задач, является актуальной и практически важной.

### **Структура диссертации и ее основное содержание**

Диссертация соискателя состоит из следующих разделов: введение; представленный в первой главе аналитический обзор современной литературы; три

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА |            |
| ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»             |            |
| за №                                       | _____      |
| Дата регистрации                           | 10.10.2025 |
| Фамилия регистратора                       | _____      |



экспериментальные главы; глава с обобщением экспериментальных подходов, описанием промышленной апробации и перспектив применения результатов исследований; заключение; список литературы, включающий 277 наименований; 5 приложений (включая акты о внедрении результатов научно-исследовательской работы). Работа изложена на 226 страницах.

**Во введении** показана актуальность тематики исследований, обозначены цель и задачи работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту диссертационной работы, и полученная научная новизна. Представлена практическая значимость проделанных исследований, описаны методология и методы исследований, приведены данные о степени достоверности и обоснованности результатов и выводов работы, личном вкладе автора и апробации результатов исследований, описана структура и объём диссертации.

**В первой главе** диссертационной работы проведён достаточно обстоятельный обзор литературных источников, посвящённых различным аспектам (формирование первичной литой структуры, металлургические факторы) обеспечения высокого комплекса механических и специальных свойств многофункциональных сложнолегированных белых чугунов. Особое внимание уделено вопросам модифицирования и микролегирования чугунов, механизмам кристаллизации в отливках, внутренним и внешним факторам, определяющим строение и тип оксидных плёнок и, соответственно, жаростойкость чугунов, а также обеспечению износостойкости белых чугунов, в особенности в условиях высокотемпературного абразивного изнашивания. На основе анализа литературных данных обоснованы направления исследований, сформулированы цель диссертационной работы и решаемые в ней конкретные задачи.

**Во второй главе** проведен детальный анализ влияния химического состава чугуна и условий охлаждения при кристаллизации на особенности структурообразования (химический состав формируемых фаз и структурных составляющих, морфология и тип эвтектик, тип металлической основы, морфология первичных и эвтектических карбидов), а также твердость и специальные свойства: износостойкость, жаростойкость и ростоустойчивость комплексно-легированных белых чугунов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti.

**В третьей главе** диссертации изучено влияние дополнительного легирования алюминием и ниобием отдельно и совместно, а также условий охлаждения таких сплавов на закономерности структурообразования, механические и специальные свойства (износостойкость, окалиностойкость, ростоустойчивость) комплексно-легированных жароизносостойких белых чугунов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti, рассмотренной в предыдущей главе.

**В четвертой главе** диссертации рассмотрено комбинированное влияние добавок бора и условий охлаждения при затвердевании на структуру и свойства комплексно-



легированных белых чугунов систем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb. Показано, что специфическое влияние бора на структурно-фазовое состояние и химический состав фаз может проявляться как в микролегирующем, так и в модифицирующем воздействии. Микролегирующее влияние бора проявляется в перераспределении легирующих элементов между фазами сплава и в изменении количественного соотношения фаз. Модифицирующий эффект бора, когда он действует не как обычный легирующий элемент, а как поверхностно-активный элемент, зависит от скорости охлаждения при кристаллизации, определяющейся характеристиками отливки: толщина стенки, масса и размеры.

В **пятой главе** диссертации исследованы белые чугуны систем Fe-C Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb, дополнительно обработанные кальций-стронциевым карбонатом. Изучено комбинированное влияние такого модифицирования и условий охлаждения при затвердевании на особенности структуры и свойства комплексно-легированных чугунов (жаростойкость и износостойкость).

В заключительной **шестой главе** на основании анализа экспериментальных результатов, изложенных в предыдущих главах, уточнены известные и сформулированы новые принципы создания комплексно-легированных белых чугунов с уникальным сочетанием высоких специальных свойств (окалиностойкости, ростоустойчивости и износостойкости) одновременно, в зависимости от характеристики отливки (размеры, масса, толщина стенки отливки) и условий охлаждения металла в литейной форме.

На основании установленных принципов легирования предложены целесообразные области практического применения комплексно-легированных белых чугунов различных систем легирования с заданным комплексом специальных и механических свойств: в металлургической промышленности, где чугуны данного класса используются при изготовлении печного оборудования; в сельском хозяйстве для изготовления деталей машин и механизмов, которые работают в абразивных средах при нормальных и повышенных температурах; в горно-обогатительном производстве, где требуется стабильность эксплуатационных свойств изделий в агрессивной окружающей среде при повышенных температурах (например, колосники для грохотов агломерационных машин); в коксохимической промышленности, например, облицовочные плиты тушильных вагонов; в современной энергетике, газотурбостроении, нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности, при производстве органических и синтетических материалов.

Приведены результаты апробации результатов исследования в условиях промышленных предприятий.



## Научная новизна диссертационной работы

Можно выделить следующие важнейшие положения научной новизны работы.

Автором путем анализа и обобщения многочисленных экспериментальных данных экспериментально доказано, что в сплавах системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti высокий комплекс специальных свойств (износостойкости, жаростойкости и ростоустойчивости) достигается за счет создания гетерофазной структуры, состоящей из аустенитной металлической основы и упрочняющих фаз: первичных и эвтектических карбидов типа MC и  $M_7C_3$ . Дополнительное легирование ниобием и алюминием позволяет улучшить специальные свойства рассматриваемых сплавов вследствие повышения их структурно-фазовой стабильности в результате вторичного твердения в литейной форме и образования на поверхности отливок оксидных пленок типа шпинели. Одновременно достичь высоких показателей окалинотойкости, ростоустойчивости и износостойкости позволяет только совместное легирование алюминием и ниобием жароизносостойких комплексно-легированных белых чугунов.

Определено, что формирование оксидных слоев и окалинотойкость зависят не только от химического состава сплава, но и от особенностей его первичной литой структуры, поскольку изменение скорости охлаждения при затвердевании влияет на количество и плотность эвтектики, а также на химический состав металлической основы, дендритов и эвтектики.

Соискателем впервые показана возможность управления структурно-фазовым составом и свойствами комплексно легированных белых чугунов систем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb за счет добавок бора и изменения условий охлаждения при затвердевании. Положительное влияние микролегирования бором на специальные свойства связано с дисперсионным твердением в литейной форме с выделением карбидов типа  $M_7C_3$  и MC в зависимости от системы легирования. Модифицирующий эффект бора проявляется в изменении параметров дендритной структуры, типа вторичных карбидов, химического состава первичных и эвтектических карбидных фаз.

Продемонстрированы возможности повышения специальных свойств жароизносостойких чугунов путем обработки кальций-стронциевым карбонатом. При этом рост износостойкости сплавов происходит за счет увеличения объемной доли карбидной фазы, а улучшение окалинотойкости – в результате образования на поверхности отливок оксидной пленки хромата стронция. Структурно-модифицирующий эффект карбоната зависит от количества добавки и условий охлаждения при кристаллизации.



## Практическая значимость результатов

Разработан новый состав белого жароизносостойкого чугуна системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb-B (патент РФ № 2777733) с повышенными показателями износостойкости и окалиностойкости при нулевом показателе ростоустойчивости. Показано, что для повышения комплекса специальных свойств сплавов систем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-B и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb-B необходимое количество бора должно составлять 0,02%.

Установлено, что для повышения комплекса специальных свойств чугунов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti рациональное количество вводимого кальций-стронциевого карбоната должно составлять 5 кг/т. Введение карбоната свыше 6 кг/т приводит к отрицательному эффекту перемодифицирования сплавов систем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb со снижением износостойкости и жаростойкости чугунов. Для достижения максимальной окалиностойкости необходимо производить заливку сплавов в сухую песчано-глинистую форму. Максимальная износостойкость наблюдается у сплавов, залитых в кокиль (быстрое охлаждение), а при заливке в сухие и сырые песчано-глинистые формы достигается наибольшая ростоустойчивость.

Получены положительные результаты промышленного опробования чугунов для производства деталей, эксплуатируемых в условиях абразивного изнашивания при повышенных температурах (до 800-1000 °С): облицовочных плит из разработанного состава белого износостойкого чугуна ИЧ220Х18Г4Ю2Б2НТ для тушильных вагонов в коксохимическом производстве (ПАО «Гайский ГОК»); экспериментальной брони желоба агломерата из чугуна ИЧ220Х18Г4Ю2Б2НТ (Буруктальский металлургический завод); колосников спекательных тележек из чугуна ИЧ220Х18Г4Ю2Б2НТ (ЗАО «Южуралвормет»); экспериментальных образцов конус-клиньев из белого чугуна ИЧ220Х18Г4Ю2Б2НТР (ООО «УралЭнергоРесурс»).

### Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, базируется на использовании современных взаимодополняющих методов исследования, включающих сканирующую электронную микроскопию, рентгенофазовый анализ, количественный анализ с применением статистической обработки данных, микрорентгеноспектральный анализ, измерения микротвердости, твердости по Роквеллу, износостойкости и жаростойкости; согласованностью результатов лабораторного и промышленных экспериментов; большим объемом выполненных экспериментальных данных с их статистико-вероятностной обработкой и воспроизводимостью результатов эксперимента; проведением опытных и промышленных плавов чугунов разработанных составов. Анализ диссертационного исследования позволяет сделать вывод, что все заявленные



соискателем составляющие научной новизны и положения, выносимые на защиту, базируются на достаточном объёме полученных экспериментальных и теоретических результатов, хорошо обоснованы и согласуются между собой и не противоречат известным научным представлениям и результатам исследований других авторов.

**Основные положения и результаты работы опубликованы** в 44 публикациях, из них 13 статей в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 4 статьи проиндексированы в наукометрических базах Scopus и Web of Science, в других изданиях – 24 работы. Получен 1 патент на новый состав белого жароизносостойкого чугуна. Опубликовано 2 монографии в соавторстве.

**Диссертация и автореферат** написаны понятным научным языком. Содержание диссертации достаточно ясно раскрывает постановку, методы исследования и результаты решения рассмотренных задач. Автореферат отражает содержание основных результатов и положений, представленных в диссертации.

#### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности**

По объектам, целям, методам проведенных исследований и содержанию диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.1. М-металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки) в пунктах п.1 (Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм), в том числе диаграммами состояния с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов), п.3 (Теоретические и экспериментальные исследования влияния разнородных структур, в том числе кооперативного, на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование), п.7 (Изучение взаимодействия металлов и сплавов с внешними средами в условиях работы различных технических устройств, оценка и прогнозирование на этой основе работоспособности металлов и сплавов) и п.8 (Исследование работоспособности металлов и сплавов в различных условиях, выбор и рекомендация наиболее экономичных и надежных металлических материалов для конкретных технических назначений с целью сокращения металлоемкости, увеличения ресурса работы, повышения уровня заданных физических и химических характеристик деталей машин, механизмов, приборов и конструкций).

#### **Замечания по работе**

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  $Me_7C_3$  ( $Me$  – 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, воздействию 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 изнашивания (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 фазой 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.

Отмеченные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы и не снижают ее научной и практической значимости.

### **Заключение**

Диссертационная работа О.С. Молочковой является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем на актуальную тему на высоком научно-методическом уровне. Представленное исследование характеризуется обоснованностью вынесенных на защиту научных положений, выводов и практических рекомендаций. По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования диссертационная работа, заявленная на соискание ученой степени доктора технических наук, полностью соответствует специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. В работе содержится решение важной, имеющей значение для металловедения, проблемы создания научных и технологических основ получения новых жароизносостойких белых чугунов и повышения комплекса их специальных свойств путем рационального легирования и научно-обоснованного выбора условий кристаллизации.

Таким образом, по актуальности и объему выполненных исследований, новизне, достоверности, научной и практической значимости полученных результатов и выводов диссертационная работа О.С. Молочковой «Комплексное воздействие легирования, микролегирования, модифицирования и условий охлаждения при кристаллизации на структурно-фазовое состояние и свойства жароизносостойких белых чугунов»



соответствует требованиям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации 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.

Официальный оппонент,

доктор технических наук, академик РАН,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики металлов  
имени М.Н. Михеева Уральского отделения  
Российской академии наук, главный научный  
сотрудник лаборатории механических свойств



Макаров Алексей Викторович

Докторская диссертация защищена по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18, ИФМ УрО РАН  
Телефон (343) 378-36-40 e-mail: [avm@imp.uran.ru](mailto:avm@imp.uran.ru)

Согласен на обработку персональных данных.



Макаров Алексей Викторович  
08.10.2025



Подпись *Макарова А.В.*  
Секретарь ИФМ УрО РАН  
И.Ю. Арапова  
» 08.10.2025 г.