

ОТЗЫВ

официального оппонента Панова Алексея Геннадьевича

на диссертацию 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 учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.1.

Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

1. Общая характеристика работы

На отзыв представлена диссертация в виде рукописи и автореферата.

Текст рукописи состоит из введения, 6 глав основной части, заключения, списка литературы из 277 наименований, 5 приложений на 8 страницах, изложена на 226 страницах машинописного текста, включает 98 рисунков и 52 таблицы.

Во введении автором обоснована актуальность избранной тематики, сформулированы цель и задачи проводимого исследования, представлены методология и методы исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, указан личный вклад, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения, обеспечивающие достоверность и обоснованность результатов и научных выводов работы, а также приведены сведения об апробации результатов диссертации.

В первой главе автором представлен анализ отечественных и зарубежных литературных источников, посвященных исследованиям и применению комплексно-легированных белых чугунов (КЛБЧ) для различных отраслей промышленности, включая металлургию, машиностроение, химическую и нефтеперерабатывающую отрасли. Автором изучен научно-практический опыт легирования, микролегирования, рафинирования и модифицирования белых чугунов во взаимосвязи со структурой, механическими свойствами, жаростойкостью и износостойкостью. На основе результатов анализа поставлена цель и сформулированы 6 научных задач исследования.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния химического состава и условий охлаждения в процессе затвердевания на состав и строение объёмных и поверхностных структурных составляющих сплавов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti, а также на твердость, износостойкость, окалиностойкость и ростоустойчивость образцов исследуемых сплавов.

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА	
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»	
за №	
Дата регистрации	09.09.2025
Фамилия регистратора	

В третьей главе излагаются результаты исследования влияния раздельного и совместного дополнительного введения алюминия, и ниобия в систему Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti на структуру и фазовый состав основного сплава, химический состав оксидных пленок, формирующихся при испытаниях на окалиностойкость, а также показатели эксплуатационных свойств жароизносостойких чугунов.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния микродобавок бора на системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb. Установлено специфическое влияние бора на структурно-фазовое состояние и химический состав фаз, проявляющееся в микролегирующем и модифицирующем воздействии, которое зависит от скорости охлаждения при кристаллизации.

В пятой главе представлены результаты оценки влияния модифицирования материалом КСК, содержащим карбонаты кальция и стронция, на структуру и специальные свойства комплексно-легированных белых чугунов систем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb.

В шестой главе представлены основные принципы легирования и модифицирования, разработанные на основе обобщения результатов исследования, обеспечивающих получение белых чугунов с уникальным сочетанием характеристик окалиностойкости, износостойкости и стабильности структуры.

В автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации автора, показаны вклад автора в проведенное исследование, степень новизны и практическая значимость результатов исследований автора, приводится список публикаций автора по теме диссертации.

2. Актуальность работы

Несмотря на большое количество работ, посвященных белым чугунам, до сих пор не было достаточно изучено влияние комплексного внешнего воздействия микролегирования, модифицирования и различных технологических скоростей кристаллизации и последующего охлаждения на формирование неравновесного структурно-фазового состояния и функциональных свойств жароизносостойких белых чугунов различных систем легирования. И главная проблема в том, что не были созданы адекватные модели, описывающие фазовые и структурные превращения жароизносостойких чугунов различных систем легирования в неравновесных условиях структурообразования, которые бы позволяли прогнозировать необходимые характеристики будущих сплавов.

Возможности улучшения характеристик традиционных легированных белых чугунов практически исчерпаны, достигнув предела развития по своим фи-

зико-химическим и эксплуатационным свойствам. Именно поэтому особое внимание в настоящее время уделяется разработке и применению новых перспективных материалов – комплексно-легированных белых чугунов (КЛБЧ). Особенностью данной группы сплавов является большой разброс характеристик микроструктур и, соответственно, эксплуатационных свойств изготовленных из них изделий даже в пределах одной партии продукции с идентичным химическим составом. Как показали исследования, наблюдаемое явление связано с определяющим влиянием технологических воздействий на сплав в жидком состоянии, а также условий кристаллизации и последующего охлаждения на процессы структурообразования сплавов в изделиях.

Таким образом, тема изучения фазовых и структурных превращений в зависимости от технологических воздействий и во взаимосвязи со специальными свойствами, а также изучения возможностей комплексного легирования белых чугунов сохраняет высокую актуальность благодаря потенциальным преимуществам в повышении долговечности и надежности конструкций, работающих в экстремальных условиях промышленного производства.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность представленных в диссертации О.С. Молочковой результатов обеспечивается большим статистически достоверным экспериментальным материалом, корректностью применения современных методов тонких исследований структуры, механических и специальных свойств, корректным сопоставлением полученных данных с известными экспериментальными данными других исследователей; высокой воспроизводимостью экспериментальных данных и их проверкой в практике (что отражено в актах испытаний, прилагаемых к диссертации и других справочных материалах), а также широким освещением результатов работы на конференциях различного уровня и в публикациях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. По результатам исследования опубликованы 44 авторских работы, из которых в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, опубликовано 13 работ, в изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus опубликовано 4 работы, изданы 2 монографии, получен 1 патент РФ на изобретение.

Полученные результаты согласуются с известными публикациями и дополняют их новыми важными наблюдениями.

4. Новизна научных положений диссертационной работы

Как следует из содержания, объектом исследования в диссертационной

работе О.С. Молочковой являются фазовые и структурные превращения в жароизносостойких белых чугунах, происходящие при различных внешних технологических воздействиях, направленных на повышение стойкости к износу и росту сплавов в различных условиях эксплуатации.

Известны способы решения вопросов повышения эксплуатационных свойств белых чугунов отечественными и зарубежными учёными, в которых предлагалось управлять теми или иными свойствами преимущественно путём разработки только легирующих комплексов в субъективных условиях проведения экспериментов.

Однако в отличие от известных данных, в диссертационной работе О.С. Молочковой впервые на основе результатов экспериментальных исследований с планируемыми условиями, включающими модифицирование расплавов и контролируемое варьирование скоростей их охлаждения, разработан аппарат математического моделирования свойств сплавов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti в зависимости от химического состава и технологических воздействий, с помощью которого определён оптимальный состав жароизносостойкого чугуна.

Впервые определено влияние отдельного и совместного введения алюминия и ниобия на структуру, фазовый состав, химический состав оксидных плёнок, а также показатели эксплуатационных свойств жароизносостойких чугунов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti. Определено рациональное содержание алюминия в сплавах – 2,0–2,5%; снижение концентрации алюминия ухудшает окислостойкость, повышение снижает ростоустойчивость. Увеличение скорости охлаждения при кристаллизации приводит к повышению легированности твердого раствора, улучшая окислостойкость (Δm^{800} снижается в 2–3,7 раза). Совместное легирование ниобием и хромом обеспечивает дисперсионное твердение, стабилизирует аустенит и улучшает механические свойства. Добавление 1,5% ниобия повышает окислостойкость и защищает металл от окисления, создавая плотную оксидную плёнку; увеличение количества ниобия сверх 1,5% ведет к негативным последствиям.

Доказано, что легирование ниобием повышает износостойкость вследствие роста объема и дисперсности карбидов типа MC , стабилизации аустенита и выделения дисперсных карбидов типа M_7C_3 . Для одновременного улучшения всех эксплуатационных свойств КЛБЧ системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti автором рекомендовано дополнительное легирование алюминием и ниобием.

Также в диссертации впервые установлено специфическое влияние бора на структурно-фазовое состояние и химический состав фаз в белых чугунах си-

стем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb, проявляющееся в микролегирующем и модифицирующем воздействии, которое зависит от скорости охлаждения при кристаллизации. В частности, при увеличении содержания бора: хрома больше содержится в первичных карбидах типа MC , а в эвтектических карбидах его концентрация снижается; металлическая основа обогащается хромом почти в полтора раза; выделяются вторичные карбиды типа M_7C_3 . Кроме того, бор изменяет химический состав карбидов в сплавах с алюминием и ниобием, увеличивая в них долю титана и уменьшая долю ниобия. Необходимое количество бора составляет 0,02%, что повышает износостойкость на 22–30%, окалиностойкость в 3 раза, ростоустойчивость на 22–30% и твердость на 19–25%. Однако избыток бора негативно сказывается на эффективности модифицирования.

Автором впервые проведена оценка влияния модифицирования материалом КСК, содержащим карбонаты кальция и стронция, на структуру и специальные свойства комплексно-легированных белых чугунов систем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb. Результаты показали, что воздействие исследуемым материалом улучшает жаростойкость, износостойкость и другие важные характеристики жароизносостойких белых чугунов.

Научная значимость диссертационной работы О.С. Молочковой заключается в применении результатов экспериментальных исследований для объяснения закономерностей влияния химического состава и технологических воздействий на фазовые и структурные превращения в жароизносостойких белых чугунах. Полученные экспериментальные результаты показали, что химический состав и морфологические особенности эвтектики подвергаются существенным изменениям в зависимости от микролегирования, модифицирования и кинетики теплоотвода, что непосредственно обуславливает вариативность эксплуатационных свойств данного класса сплавов и демонстрирует принципиально новый подход для решения важнейших задач металловедения.

5. Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертационного исследования О.С. Молочковой заключается в следующем:

1. Сформулированы основные требования к базовому составу сплавов системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti. Дополнительное введение в чугуны системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti легирующих добавок, таких как ниобий и алюминий, усиливает стабильность материала при термоциклировании в условиях эксплуатации и

инициирует образование защитных оксидных слоев типа шпинелей, существенно повышающих устойчивость к высокотемпературному окислению.

2. Получены новые данные о механизмах действия бора и его влиянии на структуру и свойства жароизносостойких чугунов, что открывает широкие перспективы для создания сплавов с регулируемыми характеристиками, адаптированными к различным условиям эксплуатации.

3. Определено, что обработка расплава карбонатами стронция приводит к формированию на поверхности чугунов защитных оксидных слоёв, содержащих соединения хрома и стронция, способствующих улучшению окалиностойкости.

4. Новые виды жароизносостойкого чугуна внедрены на крупных предприятиях (Гайский горно-обогатительный комбинат, Буруктальский металлургический завод). Эти внедрения показали значительное увеличение производительности и снижение издержек эксплуатации оборудования. Патент РФ № 2777733, классифицируемый по коду C22C 37/06, закрепляет приоритет авторских разработок и защищает интеллектуальную собственность автора. Данный патент подтверждает инновационность и техническую значимость предложенного подхода.

5. Материалы и результаты исследований включены в учебный процесс Магнитогорского Государственного Технического Университета имени Г.И. Носова. Студенты получают уникальные знания и практические навыки, что готовит квалифицированные кадры для металлургической отрасли.

Оценка диссертационной работы

В диссертационной работе О.С. Молочковой впервые представлены статистически значимые корреляционные зависимости между химическим составом сплавов, технологическими воздействиями и формирующейся микроструктурой белых чугунов систем Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti и Fe-C-Cr-Mn-Ni-Ti-Al-Nb, что даёт возможность с определённой степенью точности прогнозировать механические характеристики и функциональные свойства этих сплавов путём применения разработанных регрессионных моделей. Показано, что ключевую роль в поведении материала при высокотемпературном окислении играет первичная литая структура чугуна, а в формировании и типе образующихся оксидных слоев – распределение легирующих элементов в поверхностном слое. Определение механизма формирования оксидных слоев и выявление их зависимости от исходной литой структуры позволило автору разработать рекомендации относительно принципов микролегирования и модифицирования, которые позволяют

создавать белые чугуны с уникальным сочетанием характеристик окалиностойкости, износостойкости и стабильности структуры. Данные сплавы перспективны для изготовления ответственных конструктивных функциональных элементов, эксплуатируемых в экстремально тяжёлых условиях горнодобывающей и металлургической отраслях.

По диссертационной работе О.С. Молочковой имеются следующие замечания:

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 уделено мало внимания, особенно методикам получения образцов, в том числе модифицирования, методикам испытаний ростоустойчивости, износостойкости и окалиностойкости, определения «эффективности модифицирования».

3. В работе разработаны модели прогнозирования свойств для сплавов с $\text{Cr} \sim 18\text{--}19\%$, однако не раскрыт вопрос о границах применимости моделей при более низком или высоком содержании хрома (например, $12\text{--}14\%$ 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 стандартизированными или общепринятыми, что затрудняет понимание текста, например, «избыточные дендри-

ты 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.

Заключение

Диссертационное исследование О.С. Молочковой посвящено актуальной области металловедения, связанной с изучением процессов формирования структурно-фазовых состояний и специфических физико-химических характеристик жаростойких легированных чугунов сложного состава под воздействием варьирующихся технологических факторов.

Несмотря на имеющиеся замечания, общая оценка диссертационной работы остается положительной. Цель, поставленная в работе, достигнута, сформулированные задачи успешно решены. Сформулированные научные положения, выводы и рекомендации достаточно обоснованы, подтверждены соответствующими публикациями, результатами экспериментов, опытно-промышленного и производственного опробования.

Исследование носит фундаментальный характер, дополняя знания о процессах формирования структуры и свойств жаростойких материалов. Оно включает глубокие теоретические выкладки и четкие объяснения явлений, научную новизну, соответствующую пунктам 1-3 и 7-9 паспорта научной специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. Полученные результаты вносят существенный вклад в теорию и практику металловедения, стимулируют дальнейшие исследования и развитие знаний в области формирования структуры и специальных свойств легированных железоуглеродистых сплавов.

Диссертация выполнена в соответствии с правилами оформления. Выводы четко сформулированы и аргументированы.

Автореферат и опубликованные работы автора верно и исчерпывающе передают содержание и суть представленного диссертационного исследования.

Считаю, что диссертационная работа «Комплексное воздействие легирования, микролегирования, модифицирования и условий охлаждения при кристаллизации на структурно-фазовое состояние и свойства жароизносостойких белых чугунов» соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 г. № 842 (пункты 9-14), а ее ав-

тор, Молочкова Ольга Сергеевна, достойна присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент,

доктор технических наук

(05.16.04 Литейное производство),

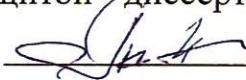
доцент, профессор кафедры материалов, технологий и качества

Набережночелнинский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»



Панов Алексей Геннадьевич

Дата: 27.08.2025

Я, Панов Алексей Геннадьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Молочковой Ольги Сергеевны, и их дальнейшую обработку 

Набережночелнинский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Адрес: 423812, Россия, Республика Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Сююмбике, д. 10А.

Телефон: +7 8552510107. E-mail: panov.ag@mail.ru

Подпись Панова А.Г. заверена:

