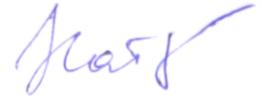


На правах рукописи



Степанова Наталья Владимировна

**ВЛИЯНИЕ МЕДИ НА КОМПЛЕКС МЕХАНИЧЕСКИХ И
АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ И
ЧУГУНОВ**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

- Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Батаев Иван Анатольевич
- Официальные оппоненты: Шевченко Олег Игоревич, доктор технических наук, доцент, Нижнетагильский технологический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой металлургических технологий
- Чумаевский Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, младший научный сотрудник Лаборатории контроля качества материалов и конструкций
- Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Защита состоится «13» декабря 2018 г. в 16⁰⁰ часов в конференц-зале НГТУ на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Новосибирского государственного технического университета,
http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=17081

Автореферат разослан « » ____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тюрин Андрей Геннадиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Снижение стоимости материалов антифрикционного назначения с сохранением их функциональных свойств представляет собой одну из актуальных задач современного материаловедения. В наибольшей степени значимость этой проблемы проявляется при изготовлении деталей крупногабаритных подшипников скольжения. Замена бронз на менее дефицитные сплавы на основе железа является техническим решением, позволяющим экономить большой объем дорогостоящей меди, существенно снизить затраты на эксплуатацию различных видов технологического оборудования. Дополнительным аргументом, позволяющим рассматривать антифрикционные сплавы на основе железа в качестве альтернативы широко используемым бронзам, является необходимость повышения износостойкости втулок скольжения в условиях повышенной запыленности и в присутствии абразивной среды.

Одно из кардинальных решений отмеченной задачи заключается в замене меди на менее дорогостоящие материалы, например, на сплавы на основе железа. Примерами таких сплавов являются стали и чугуны антифрикционного назначения. Являясь более экономичными по сравнению с бронзами, серые антифрикционные чугуны, тем не менее, обладают относительно невысокими триботехническими свойствами, не позволяющими их во многих случаях использовать для изготовления подшипников скольжения. Одним из негативных качеств, характерных для антифрикционных чугунов, является коррозионное разрушение их поверхностных слоев при воздействии влажной атмосферы. Продукты коррозии, попадая в зону сопряжения взаимодействующих элементов, ускоряют выход из строя подшипников скольжения. В этой связи актуальным является поиск и обоснование технических решений, обеспечивающих улучшение антифрикционных свойств сплавов на основе железа, применение которых по сравнению с бронзами будет экономически выгодным.

Анализ литературных данных и результатов, предварительно проведенных экспериментов, показывает, что решение отмеченной проблемы может быть основано на легировании медью высокоуглеродистых сплавов, в первую очередь чугунов или заэвтектоидных сталей. Фактором, обеспечивающим низкий уровень коэффициента трения, является присутствие в структуре этих сплавов медьсодержащих частиц различного размера. В технической литературе подробно описаны особенности строения низкоуглеродистых сталей с малым содержанием меди (менее 1...2 %). Хорошо изучены механические свойства и поведение этих материалов в условиях коррозионного воздействия. В то же время железоуглеродистые сплавы с высоким содержанием углерода и меди изучены гораздо в меньшей степени. Применение этих сплавов ограничено главным образом негативным влиянием меди, содержащейся в количестве более 2 %, на технологические свойства в условиях горячей обработки давлением.

Роль дополнительных легирующих элементов, вводимых с железоуглеродистыми сплавами в сочетании с медью, также изучена слабо. В то же время, имеются основания для улучшения структуры анализируемых материалов путем

введения в них алюминия, повышающего растворимость меди в железе и способствующего повышению равномерности распределения медьсодержащих частиц в железоуглеродистой матрице.

Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете при поддержке:

- гранта в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы № 14.132.21.1660;

- гранта РФФИ в рамках конкурса инициативных научных проектов, выполняемых молодыми учеными № 14-03-32022;

- гранта компании *OPTEC Holding B.C. LLC* № 16/2014/71-75/Nvs;

- гранта РНФ в рамках конкурса «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований по приоритетным тематическим направлениям исследований» № 15-19-00230.

Степень разработанности темы исследования

Исследования влияния меди на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов интенсивно проводятся с середины XX века по сегодняшний день. По данной тематике опубликовано большое количество работ такими известными специалистами, как А.А. Бочвар, А.П. Преварский, И.В. Крагельский, Д.Н. Гаркунов, Ю.Г. Бобро, Л.А. Платонова, Г.И. Сильман, В.В. Камынин, В.В. Гончаров, А.А. Чикова, И. Ле Мэй, *K. Shubhank, Osterle, B. Liu, Y. Prasetyo, H.I. Aaronson, M.R. Plichta, R. A. Ricks, T. Chairuangstri* и др.

Считается, что добавление в железоуглеродистые сплавы более 2 мас. % меди нецелесообразно в виду того, что крупные выделения богатых медью фаз повышают краснеломкость материалов. По этой причине выполнено весьма ограниченное количество работ, посвящённых изучению чугунов и сталей с повышенным содержанием меди. Научные задачи, связанные с получением антифрикционных чугунов, содержащих до 6 мас. % меди, решались специалистами Брянской государственной инженерно-технологической академии (БГИТА). Ряд работ, посвящённых изучению влияния меди на антифрикционные свойства чугунов, был выполнен Г.И. Сильманом, В.В. Камыниным, В.В. Гончаровым, А.А. Тарасовым. Следует, тем не менее, отметить, что особенности тонкого строения разработанных материалов в них не рассматривались.

В большинстве выполненных ранее работ, ориентированных на анализ особенностей тонкой структуры легированных медью железоуглеродистых сплавов методами просвечивающей электронной микроскопии изучены, главным образом низкоуглеродистые стали, содержащие менее 2 мас. % меди. Данные о влиянии выделений ϵ -Cu на антифрикционные свойства материалов ограничены. Во многих работах отмечается положительно влияние меди на коррозионные свойства сталей.

Малый объем исследований, соответствующих анализируемой области, не позволяет в полной мере сформулировать обоснованные представления о механизмах выделения медьсодержащих частиц и о влиянии их на механические и антифрикционные свойства железоуглеродистых сплавов.

Целью диссертационной работы является:

Разработка антифрикционных железоуглеродистых сплавов с высоким содержанием углерода, комплексно упрочненных компактными частицами на медной основе.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Изучение структурных особенностей железоуглеродистых сплавов с высоким содержанием меди. Объяснение природы процесса выделения частиц ϵ -*Си* в широком диапазоне размеров.

2. Классификация частиц ϵ -*Си* и оценка их влияния на механические свойства железоуглеродистых сплавов с высоким содержанием углерода.

3. Исследование влияния меди на механические и антифрикционные свойства железоуглеродистых сплавов с высоким содержанием углерода.

4. Исследование особенностей строения доэвтектического чугуна, легированного медью и алюминием в термически обработанном состоянии.

Научная новизна

1. На основании анализа диаграммы состояния «*Fe-Si-C*» и результатов структурных исследований медистых чугунов выявлены четыре характерных типа частиц ϵ -*Си*, отличающиеся происхождением, размерами и формой. Частицы первого типа размерами 20...30 мкм образуются в высокотемпературном состоянии при расслоении расплава на две составляющие, одна из которых обогащена медью, другая – железом. Включения второго типа размерами ~ 1...5 мкм формируются в γ -*Fe* при температуре выше 1094 °С и в момент образования находятся в жидком состоянии. Медистые частицы третьего типа, имеющие сферическую форму со средним размером ~ 200 нм, выделяются в твердом состоянии внутри зерен аустенита в интервале температур 1094...727 °С. Включения четвертого типа размерами ~ 20 нм выделяются в феррите перлитных колоний при температуре ниже 727 °С.

2. Методами структурного анализа обнаружены кристаллы цементита с частицами ϵ -меди размерами ~ 1...2 мкм, выделившимися в виде ожерелий в приграничных слоях карбидов. Предложен механизм, объясняющий их происхождение, в соответствии с которым рост кристаллов эвтектического цементита сопровождается оттеснением меди и преимущественным ее выделением в виде микрообъемов фазы ϵ -*Си* по контуру карбидов. При последующем нарастании на эвтектические карбиды слоя вторичного цементита медистые частицы оказываются окруженными со всех сторон цементитом.

3. Установлено, что рост прочностных свойств колоний пластинчатого перлита в легированных медью заэвтектоидных сталях и чугунах обусловлен повышением дисперсности феррито-цементитной смеси, выделением упрочняющих наноразмерных частиц ϵ -*Си* в ферритных промежутках колоний, а также растворением атомов меди в α -*Fe*. Эффект упрочнения феррито-цементитной смеси, обусловленный введением меди, проявляется при содержании ее в сплавах до ~ 5...6 %. В графитизированной стали, легированной медью, упрочняющий эффект выражен в меньшей степени, чем в неграфитизированной.

4. Установлено, что совместное легирование алюминием и медью представляет собой эффективный подход к решению проблемы повышения анти-

фрикционных свойств и износостойкости чугунов и заэвтектоидных сталей, находящихся в графитизированном и неграфитизированном состоянии. Наименьшими значениями коэффициента трения из исследованных в работе сталей обладает сплав, содержащий $\sim 9\%$ *Si*. По уровню антифрикционных свойств легированные медью высокоуглеродистые сплавы являются промежуточными между чугуном АЧС-1 и бронзой БрА9ЖЗЛ. В условиях трения о закрепленные частицы абразива максимальным уровнем износостойкости, в 3,6 раза превосходящим стойкость бронзы БрА9ЖЗЛ, обладает медистый чугун, характеризующийся наиболее высокой твердостью. Основным структурным фактором, определяющим такой комплекс свойств, является замена графита в сплаве на цементит, т.е. переход от серого чугуна к белому.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы определяется результатами структурных исследований высокоуглеродистых сплавов, легированных медью и алюминием. Анализ материалов, выполненный на различных масштабных уровнях, позволил уточнить происхождение частиц ϵ -меди, связать их природу с диаграммой состояния «*Fe-C-Si*». Методами структурного анализа подробно изучены форма, размеры и характер выделения медистых частиц при различных температурах сплавов.

Результаты проведенных исследований и разработанные рекомендации ориентированы на решение прикладных задач и обладают практической ценностью.

1. Обоснованные в диссертации предложения использованы при разработке антифрикционных материалов, предназначенных для изготовления втулок тяжело нагруженных узлов трения горнодобывающих машин. Из доэвтектического чугуна с $\sim 6\%$ меди и $\sim 1\%$ алюминия, характеризующегося оптимальным сочетанием механических и антифрикционных свойств, на предприятии «Центролит-С» были изготовлены втулки скольжения опорных катков экскаваторов ЭКГ-8. Апробация предложенных изделий на горнодобывающих предприятиях «Сорский ГОК» и ООО Горная компания «Майская» показала их высокую эффективность.

2. С использованием результатов экспериментальных исследований разработан способ получения нанодисперсных порошков карбидов вольфрама и титана, на который получен патент *RU2508249C1*. Применение предложенных модификаторов позволяет на $\sim 25\%$ повысить предел прочности чугуна, содержащего 9% меди и $1,5\%$ алюминия.

3. В ходе диссертационной работы проведен глубокий анализ процесса выделения частиц ϵ -*Si* различного типа, предложен механизм, объясняющий происхождение кристаллов цементита с частицами ϵ -меди. Данные результаты используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия» (в лекционных курсах «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов»), а также при выполнении лабораторных работ).

Личный вклад автора заключается в постановке задач диссертационной работы, выполнении экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту.

Методология и методы исследования

Сплавы, используемые для получения испытательных образцов, были получены в индукционной печи ОКБ-281 с кислой футеровкой и емкостью тигля 750 кг. Разливка металла производилась из ковша емкостью 200 кг, что обеспечивало одинаковые температурные условия при получении всех отливок. Основной для получения всех легированных медью и алюминием материалов являлись три типа сплавов: заэвтектоидная сталь, графитизированная заэвтектоидная сталь и серый чугун. Максимальное содержание меди, введенной в сплавы, составляло 14,7 %.

Для проведения аналитических исследований и изучения механических свойств полученных материалов использовали оборудование центра коллективного пользования НГТУ, уровень которого соответствует современным отечественным и зарубежным центрам. Структурные исследования проведены на различных масштабных уровнях с привлечением методов световой микроскопии (микроскопы *Carl Zeiss AXIO Observer A1m* и *Carl Zeiss AXIO Observer Z1m*), растровой электронной микроскопии (микроскоп *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального анализа *Oxford Instruments X-Act*) и просвечивающей электронной микроскопии (микроскоп *Tecnai G2 20 TWIN* с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа *EDAX*). Фазовый состав исследуемых в работе материалов изучен с использованием дифрактометра *ARL X'TRA*. Образцами для проведения исследований являлись изломы, шлифы и фольги. Пробоподготовка осуществлялась с использованием оборудования, позволяющего сохранить структуру анализируемых материалов.

Предел прочности материалов оценивался при реализации схем одноосного статического растяжения и сжатия образцов на универсальной сервогидравлической машине типа *Instron 300 DX*. Микротвердость фаз определена на металлографических шлифах с использованием прибора *Wolpert Group 402 MVD*. Значение коэффициента трения скольжения и показатели износостойкости легированных медью сплавов оценивались на испытательном оборудовании отечественного производства. Относительную износостойкость полученных в работе материалов при трении о закрепленные абразивные частицы определяли в соответствии с ГОСТ 17367-71.

Положения, выносимые на защиту:

1. Легирование медью в сочетании с алюминием является эффективным техническим решением, обеспечивающим повышение антифрикционных свойств высокоуглеродистых сплавов. Оптимальное содержание меди в чугуне антифрикционного назначения составляет 6 %, в стали заэвтектоидного состава – 9 %.

2. В высокоуглеродистых сплавах, легированных медью, образуются частицы ϵ -Си различных размеров и происхождения. Максимальные по размеру

частицы образуются в высокотемпературном состоянии в результате расслоения расплава на две составляющие, резко различающиеся по содержанию меди и железа. Частицы минимального (нанометрового) размера выделяются при пониженных температурах при пересыщении медью ε -фазы. Диапазон размеров, соответствующих частицам ε -Си, выделяющимся в медистых чугунах, составляет четыре с половиной порядка.

3. Основными факторами, определяющими прочностные свойства перлита в заэвтектонидных медистых чугунах и сталях, являются растворение атомов меди в α -железе, повышение дисперсности феррито-цементитной смеси и выделение упрочняющих наноразмерных медистых частиц в ферритных промежутках колоний. Эффект упрочнения феррито-цементитной смеси, обусловленный введением меди, проявляется при содержании ее в сплавах до $\sim 5\text{--}6\%$.

4. Формирование в медистом чугуне крупных карбидов с расположенными внутри них мелкодисперсными частицами ε -Си обусловлено оттеснением меди растущими эвтектическими кристаллами и последующим нарастанием поверхностного слоя вторичного цементита.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением промышленного оборудования для получения массивных отливок, большим объемом натуральных экспериментов, сочетанием различных взаимодополняющих методов структурных исследований, применением статистических методов оценки погрешности измерений, использованием современного аналитического оборудования, применением современных программных продуктов. Материалы экспериментов не противоречат экспериментальным данным, полученным другими авторами.

Апробация. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на российской национальной конференции по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике НМСТ-2016 (г. Новосибирск, 2016); международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (г. Томск, 2015); международной научно-технической конференции «Высокие технологии в современной науке и технике» (г. Томск, 2014); международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы в машиностроении» (г. Новосибирск, 2014, 2016); международных научно-практических конференциях «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2013, 2014); международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (г. Томск, 2014); на международных форумах по стратегическим технологиям (IFOST) (г. Улан-Батор, 2013, г. Новосибирск 2016); всероссийских научно-технических конференциях «Наука. Промышленность. Оборона» (г. Новосибирск, 2013, 2016); всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (г. Новосибирск, 2013); международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Новосибирск, 2013); всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2011); международной конференции «Современные

технологии и материалы новых поколений» (г. Томск, 2017).

По результатам исследований опубликовано 25 работ, из них 8 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 8 публикаций в зарубежных изданиях, входящих в перечни *Web of Science* или *Scopus*, 9 - в журналах, сборниках научных трудов и трудов международных и всероссийских научно-технических конференций. Кроме того, получен 1 патент Российской Федерации.

Структура и объем работы

Диссертационная работа включает в себя введение, 5 разделов, заключение, список литературы и три приложения. Общий объем работы составляет 203 страницы, включая 62 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 212 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, а также описаны основные направления проведенных исследований.

В первом разделе «Сплавы системы “*Fe-C-Cu*” - как антифрикционные материалы для тяжело нагруженных узлов трения скольжения (литературный обзор)» проведен аналитический обзор научных работ по проблемам, связанным с улучшением антифрикционных свойств материалов, из которых изготавливаются тяжело нагруженные узлы трения крупногабаритных механизмов, используемых в горнодобывающей промышленности, сельском хозяйстве, строительстве. Отражены проблемы, связанные с возможностью разработки экономичных антифрикционных материалов на основе железоуглеродистых сплавов, легированных медью и способных заменить в узлах трения скольжения дорогостоящие сплавы на основе меди, сформулированы задачи исследования.

Во втором разделе «Материалы и методы исследования» представлены используемые в работе материалы, дана характеристика методов исследования их структуры и свойств. Методом литья в песчано-глинистые формы были получены три серии отливок из графитизированных и неграфитизированных сталей с содержанием меди от 0 до 9 мас. %, и 1,2 мас. % Al, а также из чугуна, содержащего медь от 0 до 14,7 мас. % и 0,9 мас. % Al. Плавление шихты осуществлялось в индукционной тигельной печи.

Для проведения структурных исследований использовали микроскоп *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*, растровый электронный микроскоп *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, а также трансмиссионный электронный микроскоп *FEI Tecnai G2 20 TWIN*. Фазовый анализ полученных сплавов исследовали с использованием рентгеновского θ - θ дифрактометра *ARL X'TRA*. Структура сплавов оценивалась как с литом, так и термически обработанном состоянии.

Механические свойства определяли на приборах *Wolpert Group 402MVD* и *Instron 300 DX*. Для оценки влияния меди на триботехнические свойства железоуглеродистых сплавов использовали отечественное оборудование.

Третий раздел «Влияние меди на структуру заэвтектоидных сталей и чугунов, легированных алюминием» посвящен исследованию структурных преобразований, происходящих при легировании железоуглеродистых сплавов медью. На основании проведенных работ представлена уточненная диаграмма со-

стояния «Fe-Cu-C», построенная с применением программного обеспечения FactSage (рисунок 1). Анализ ее свидетельствует о различном происхождении обогащенных медью частиц ϵ -Cu и обусловленных этим обстоятельством различиях в размерах выделений, формирующихся из жидкого расплава, аустенита и феррита. Размеры включений ϵ -Cu, образующихся в чугунах СЧ14,7Cu, находятся в диапазоне от 5 нм до 250 мкм. Результаты рентгеноструктурного анализа иллюстрируют изменение объемной доли фазы ϵ -Cu (рисунок 2).

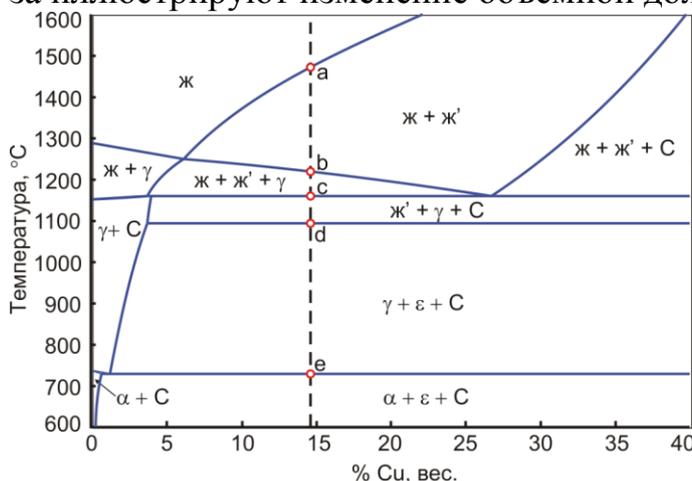


Рисунок 1 - Изоплетное (политермное) сечение диаграммы состояния Fe-Cu-C, соответствующее сплавам с 3 вес. % углерода

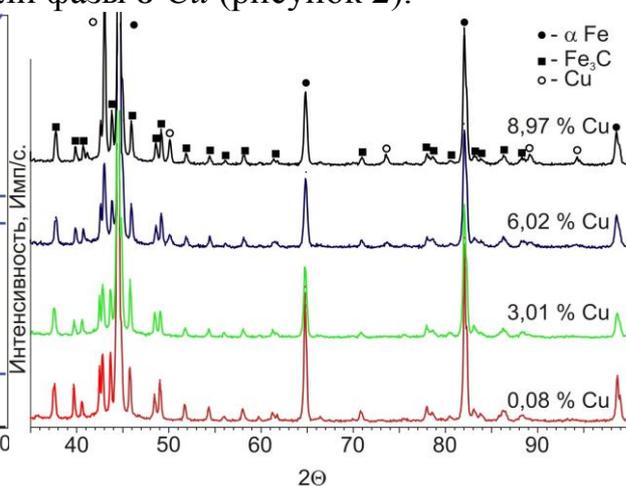


Рисунок 2 - Результаты рентгенофазового анализа заэвтектоидных сталей, легированных медью и алюминием

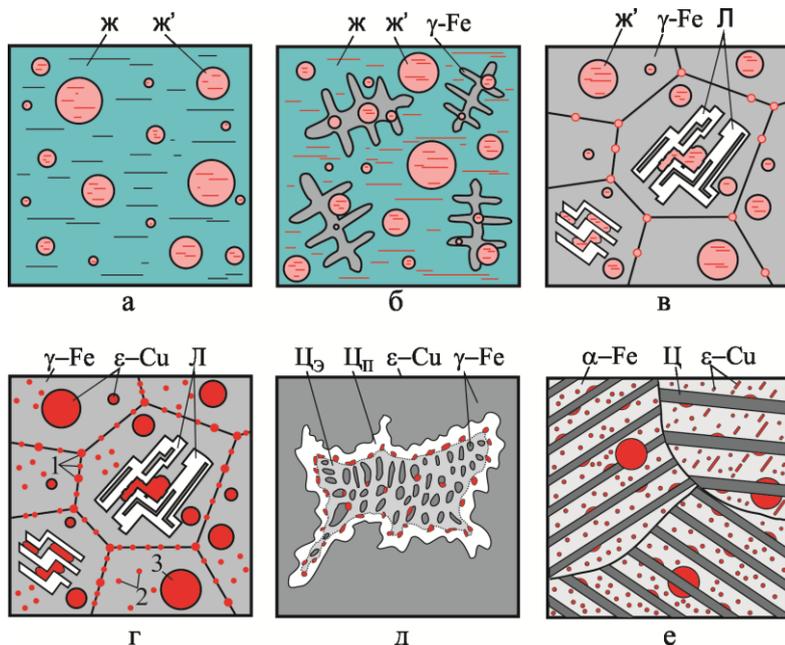


Рисунок 3 - Особенности выделения обогащенной медью фазы в чугунах, содержащем 2,9 % C и 14,7 % Cu. Л – ледебурит, Ц_I и Ц_{II} – кристаллы эвтектического и вторичного цементита.

В ходе работы были выявлены четыре характерных типа частиц ϵ -Cu. Особенности их представлены на схеме (рисунок 3). Наиболее крупные частицы (1 типа) образуются при расщеплении расплава на две составляющие (обогащенные медью и железом), имеют форму, близкую к сферической, располагаются преимущественно в междендритном пространстве (рисунок 3 а-б, 4а, 4г). Средний размер частиц ϵ -Cu, возникающих при расщеплении расплава на двухфазную

жидкость, составляет 20...30 мкм. При повышении в чугунах содержания меди размер частиц ϵ -Cu первого типа возрастает. Включения 2 типа формируются в γ -Fe при температуре выше 1094 °C и в момент образования находятся в жидком состоянии. Выделяются они преимущественно по границам аустенитных зерен, характеризуются размерами в пределах 1...5 мкм (рисунок 3 в-г, 4а). Медистые частицы 3 типа имеют сферическую форму со средним размером ~ 200

нм, выделяются в твердом состоянии внутри зерен аустенита в интервале температур 1094...727 °С (рисунок 3г, 3е, 5б). Включения 4 типа образуются ниже линии сольвуса (при температуре ниже 727 °С), располагаются в феррите перлитных колоний, имеют сферическую форму, характеризуются средним размером на уровне 20 нм (рисунок 3е, 5а).

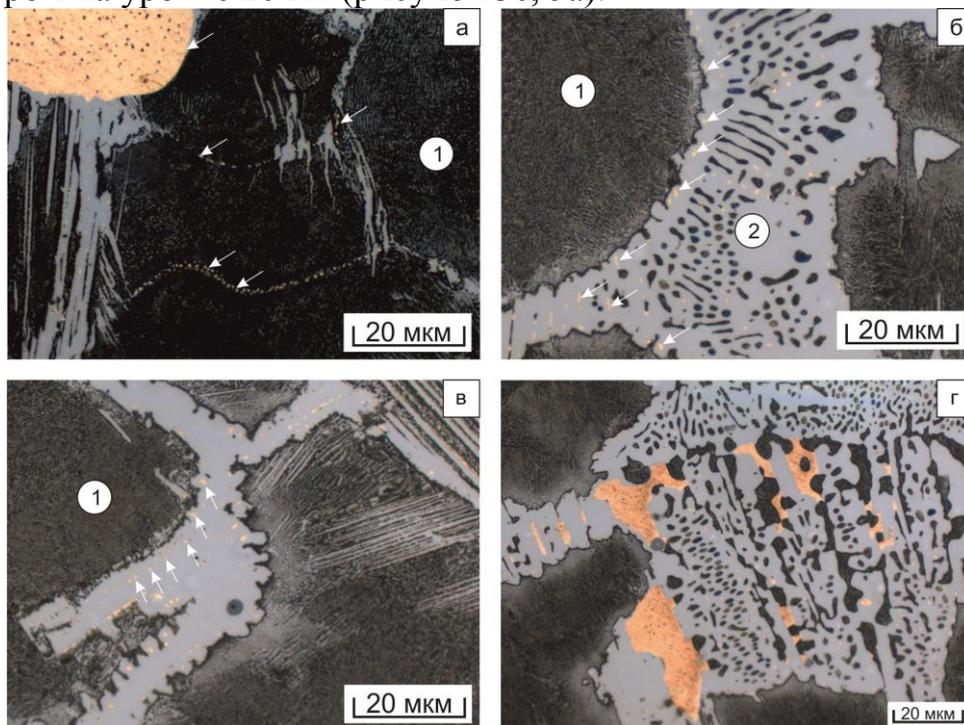


Рисунок 4 – Структура чугуна, содержащего 14,7 % Si (1 – перлит, 2 – ледебурит). Стрелками показаны частицы ε-Si

Абсолютное большинство частиц ε-Si, расположенных в пределах колоний ледебурита, имеет искаженную форму, отличную от сферической (рисунок 4 г). Механизм формирования частиц ε-Si неправильной формы объясняется присутствием медистой фазы при образовании колоний

ледебурита в расплавленном состоянии и ростом кристаллов Fe_3C в направлении друг к другу. Находящиеся между ними капли жидкого раствора на основе меди механически деформируются, приобретая форму имеющихся полостей (рисунок 3в, 3г).

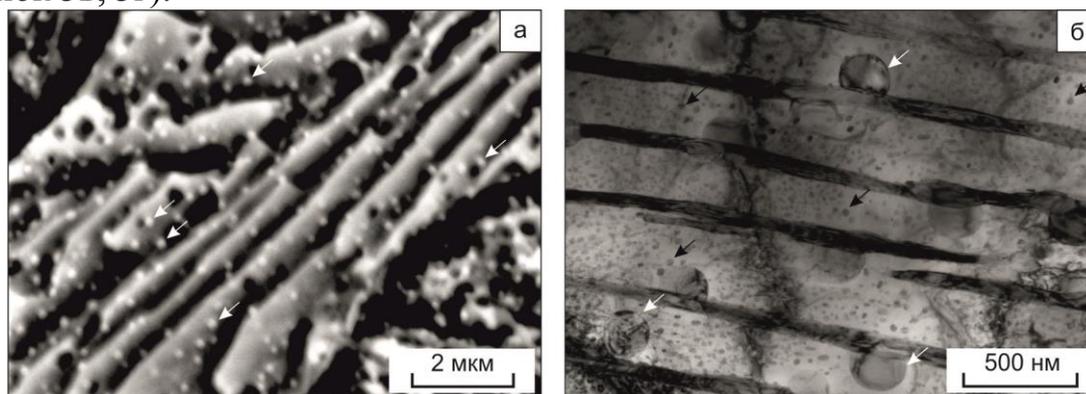


Рисунок 5 – Структура чугуна, с 14,7 % Si. а - РЭМ перлита с частицами ε-Si, б – ПЭМ перлита с субмикронными (белые стрелки) и наноразмерными (черные стрелки) частицами на основе меди

Предложен механизм выделения частиц ε-меди в виде ожерелий, расположенных в приграничных слоях внутри крупных карбидов (рисунок 2д, 3б, 3в). В соответствии с ним рост кристалла эвтектического цементита сопровождается оттеснением меди и преимущественным ее выделением в виде микрообъемов ε-фазы по контуру карбида. При последующем нарастании вторичного цементита на эвтектические карбиды эти частицы оказываются окруженными

со всех сторон цементитом. Как правило, частицы ϵ -*Сu* такого рода имеют неправильную форму, размер их составляет $\sim 1 \dots 2$ мкм.

При оценке влияния закалки на структуру белого чугуна, легированного 14,7 % меди особое внимание уделялось преобразованиям, происходящим в медистой фазе. Нагрев медистого чугуна до $1000 \dots 1120$ °С сопровождается полным растворением в аустените включений ϵ -*Сu* 4 типа и частичным растворением более крупных частиц. В закаленном от 1000 °С чугуне размер более 90 % частиц ϵ -меди составляет менее 30 мкм. Вся растворенная в аустените медь в процессе ускоренного охлаждения переходит в мартенсит. Повышение температуры закалки чугуна, легированного медью от 1000 до 1120 °С сопровождается увеличением доли остаточного аустенита от 18,8 до 69 %.

В четвертом разделе «Влияние меди на механические и антифрикционные свойства чугунов и заэвтектоидных сталей» представлены результаты механических и триботехнических испытаний графитизированных и неграфитизированных заэвтектоидных сталей, а также чугунов с различным содержанием меди. Основными параметрами, которые анализируются в данном разделе являются твердость, предел прочности при растяжении и сжатии, значения коэффициентов трения исследуемых материалов, уровень их износостойкости в условиях трения скольжения и трения о закрепленные частицы абразива.

Легирование медью в сочетании с алюминием является эффективным способом улучшения комплекса свойств высокоуглеродистых сплавов на основе *Fe*. Введение меди сопровождается ростом микротвердости колоний пластинчатого перлита как в чугуне (рисунок 6), так и в обоих типах заэвтектоидных сталей. Упрочнение пластинчатого перлита, являющегося одной из наиболее важных структурных составляющих исследуемых в работе железоуглеродистых сплавов, лежит в основе повышения их прочностных свойств. Чугуны, содержащие до $\sim 6 \dots 7$ % *Сu*, являются серыми. Сплав с 14,7 мас. % *Сu*, следует отнести к группе белых чугунов. Этим обстоятельством объясняется рост предела прочности чугуна в диапазоне $6,57 - 14,7$ % *Сu* при испытаниях по схеме сжатия цилиндрических образцов и снижение предела прочности при испытаниях на растяжение. Предел прочности при растяжении серого чугуна, содержащего 6,6 % *Сu* и 0,9 % *Al*, составляет 410 МПа (рисунок 7).

Основные причины этого связаны с повышением дисперсности ферритоцементитной смеси, присутствием растворенных атомов меди в α -*Fe*, а также выделением упрочняющих наноразмерных частиц ϵ -*Сu* в ферритных промежутках колоний. Данные включения, равномерно распределенные в ферритной матрице, являются эффективными барьерами на пути движущихся дислокаций (рисунок 8). Большинство дислокаций, наблюдаемых в феррите, закреплено на расположенных рядом частицах ϵ -*Сu*. Прирост значений микротвердости перлита, входящего в состав исследованных сплавов, составляет 70-80 МПа. Эффект упрочнения феррито-цементитной смеси, обусловленный введением меди, проявляется при содержании ее в сплавах до $\sim 5 \dots 6$ %.

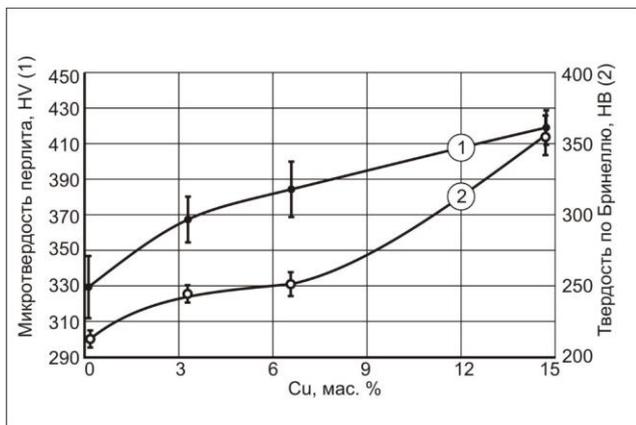


Рисунок 6 – Влияние содержания меди на свойства чугунов. 1 - микротвердость перлита, 2 - твердость чугунов по Бринеллю

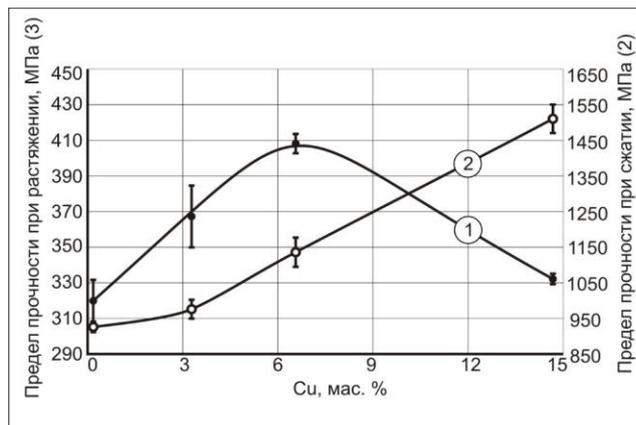


Рисунок 7 – Влияние меди на уровень предела прочности в условиях одноосного статического растяжения (1) и сжатия образцов (2) чугуна, легированного медью

При выполнении работы исследовано влияние меди на коэффициент трения скольжения чугуна, а также графитизированной и неграфитизированной стали. Свойства заэвтектоидных сталей, легированных медью, являются промежуточными между чугуном АЧС-1 и бронзой БрА9ЖЗЛ. Присутствие около 1 % *Al* в сочетании с *Cu* в количестве 6 % и более, а также формирование медь-содержащих включений, близких по составу к алюминиево-железистым бронзам, является одним из наиболее существенных факторов, объясняющих улучшение триботехнических свойств железоуглеродистых сплавов.

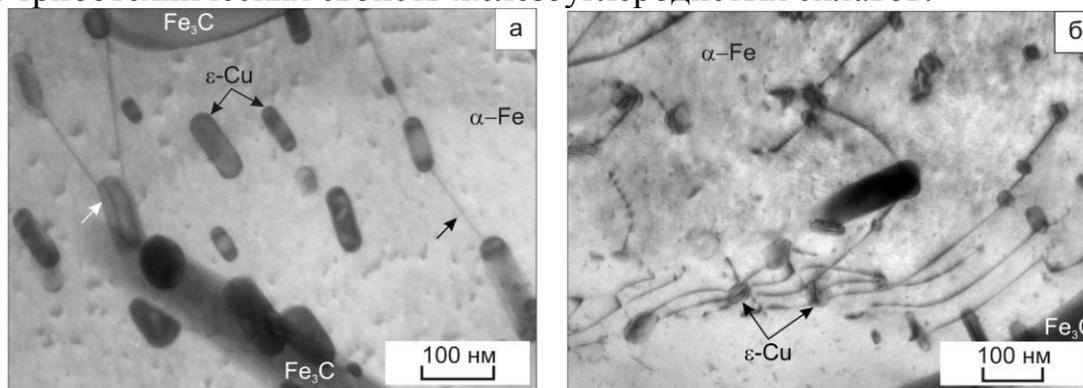


Рисунок 8 – Тонкое строение чугуна, легированного *Cu* (дислокации закреплены на частицах ϵ -*Cu*)

Наличие в структуре медистых сталей и чугунов включений графита с развитой поверхностью, оказывает положительное влияние на антифрикционные свойства сплавов. Значения коэффициента трения легированных медью сталей, находящихся в графитизированном состоянии, меньше по сравнению с термически необработанными (неграфитизированными) сталями. Наименьшими значениями коэффициента трения из исследованных в работе сталей обладает сплав, содержащий ~ 9 % *Cu* (рисунок 9). В диапазоне удельных нагрузок от 7 до 10 МПа его антифрикционные свойства уступают бронзе БрА9ЖЗЛ, но существенно выше по сравнению с антифрикционным чугуном АЧС-1.

Высокий уровень антифрикционных свойств в сочетании с комплексом показателей прочности, определяемых растворением меди в ферритной матрице, повышенной дисперсностью феррито-цементитной смеси и выделением наноразмерных частиц в ферритной матрице пластинчатого перлита, являются основными факторами, обеспечивающими повышенную стойкость легирован-

ных медью и алюминием железоуглеродистых сплавов при испытании их по схеме трения скольжения.

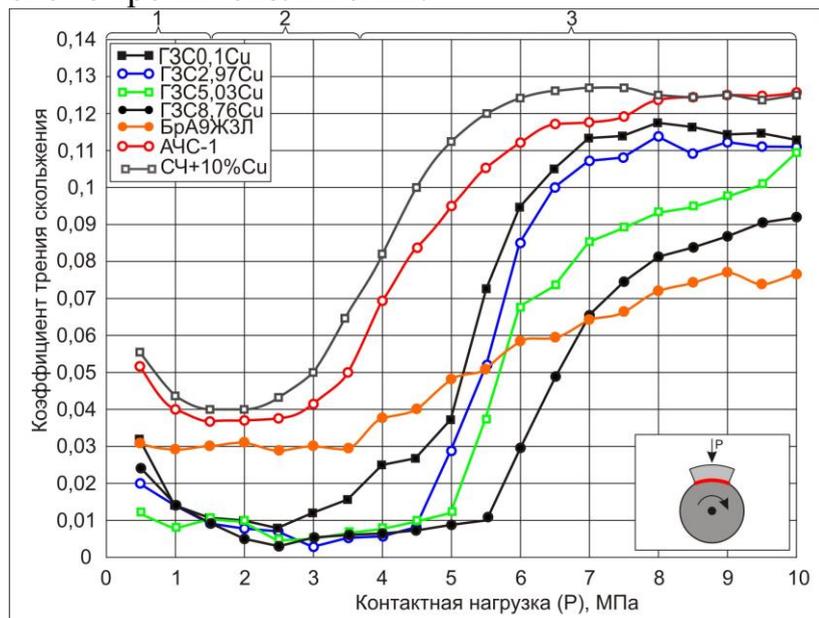


Рисунок 9 – Влияние меди на коэффициент трения графитизированных заэвтектидных сталей при испытаниях с частотой вращения контртела 300 об/мин

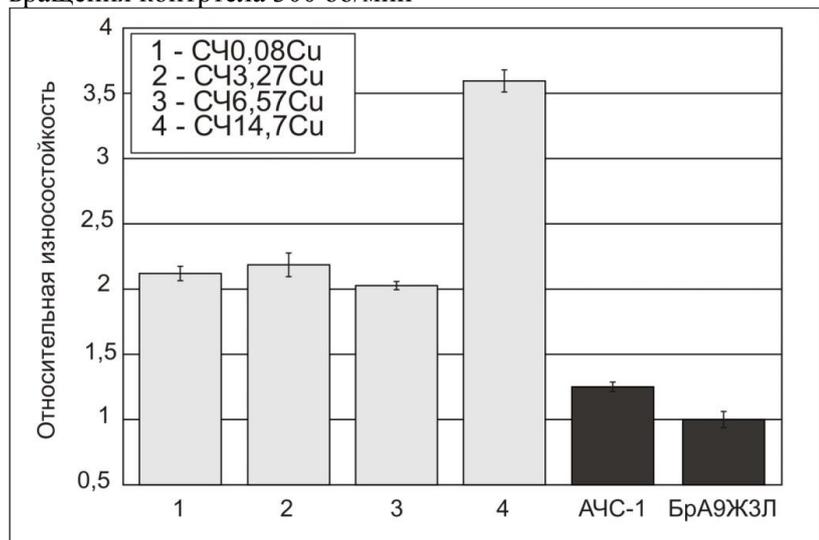


Рисунок 10 - Относительная износостойкость легированного медью чугуна при испытаниях на трение о закрепленные частицы абразива (в сравнении с чугуном АЧС-1 и бронзой БрА9ЖЗЛ)

готовления втулок тяжело нагруженных узлов трения горнодобывающих машин. Установлено, что наилучшим комплексом механических и антифрикционных свойств обладает доэвтектический чугун, содержащий ~ 6 % *Si* и ~ 1 % *Al*. Из предложенного в работе материала на предприятии «Центролит-С» были изготовлены втулки скольжения опорных катков экскаваторов ЭКГ-8. Апробация втулок на горнодобывающих предприятиях «Сорский ГОК» и ООО горная компания «Майская» показала высокую эффективность по сравнению с изделиями из бронзы.

С использованием результатов экспериментальных исследований был разработан способ получения нанодисперсных порошков карбидов вольфрама и

Уровень относительной износостойкости легированных медью железоуглеродистых сплавов коррелирует с твердостью этих материалов. Максимальным уровнем износостойкости, в 3,6 раза превосходящим стойкость бронзы БрА9ЖЗЛ, обладает чугун, содержащий 14,7 % *Si* и характеризующийся наиболее высокой твердостью (рисунок 10). Основным структурным фактором, определяющим такой комплекс свойств, является замена графита в сплаве на цементит, т.е. переход от серого чугуна к белому.

В пятом разделе «Апробация результатов экспериментальных исследований» проведен анализ возможности практического применения полученных результатов. Полученные в работе данные были использованы при разработке антифрикционных материалов, предназначенных для из-

титана, на который получен российский патент RU2508249C1. Применение предложенных модификаторов позволяет повысить на ~ 25 % предел прочности чугуна, в состав которого входят 9 % меди и 1,5 % алюминия.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия» (в лекционных курсах «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов» а также при выполнении лабораторных работ).

Заключение

Результаты экспериментальных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Интенсивное изнашивание в процессе эксплуатации является одной из причин выхода из строя многих видов горно-шахтного, строительного, сельскохозяйственного оборудования. Разработка новых износостойких материалов взамен дорогостоящих бронз, представляет собой актуальную техническую проблему, решение которой позволяет в значительной степени снизить затраты на эксплуатацию оборудования. Устранение недостатков, характерных для бронз, возможно путем замены их на более экономичные сплавы на основе железа, в частности на чугуны. Основные недостатки, характерные для чугунов, обусловлены высокими значениями коэффициента трения в паре со сталью, а также низкими показателями коррозионной стойкости. Одним из технических решений, позволяющих улучшить триботехнические свойства и повысить коррозионную стойкость чугунов, является легирование их медью.

2. Медь, введенная в чугун, представляет собой легирующий элемент, для которого характерна ограниченная растворимость как в жидком, так и в твердофазном состоянии. Введение меди является существенным фактором, оказывающим влияние на структуру и свойства чугуна, а также на его склонность к отбелу. С повышением содержания меди в чугуне до ~ 6 % глубина отбеленного слоя уменьшается. При дальнейшем увеличении содержания меди величина этого параметра возрастает.

3. Анализ уточненной диаграммы состояния «Fe-Cu-C», построенной с применением программного обеспечения *FactSage*, свидетельствует о различном происхождении обогащенных медью частиц ϵ -фазы и обусловленных этим обстоятельством различиях в размерах выделений, формирующихся из жидкого расплава, аустенита и феррита. Размеры включений ϵ -Cu, образующихся в чугуне CЧ14,7Cu, находятся в диапазоне от 5 нм до 250 мкм, т.е. различаются на четыре с половиной порядка.

4. На основании анализа диаграммы состояния «Fe-Cu-C» и результатов структурных исследований медистых чугунов выявлены четыре характерных типа частиц ϵ -Cu. Наиболее крупные частицы (1 типа) средним размером 20...30 мкм образуются при расслоении расплава на две составляющие (обогащенные медью и железом), имеют форму, близкую к сферической, располагаются преимущественно в междендритном пространстве. Включения 2 типа формируются в γ -Fe при температуре выше 1094 °C и в момент образования

находятся в жидком состоянии. Выделяются они преимущественно по границам аустенитных зерен и характеризуются размерами в пределах 1...5 мкм. Медистые частицы 3 типа имеют сферическую форму со средним размером ~ 200 нм, выделяются в твердом состоянии внутри зерен аустенита в интервале температур 1094...727 °С. Включения 4 типа выделяются при температуре ниже 727 °С, располагаются в феррите перлитных колоний, имеют сферическую форму, характеризуются средним размером на уровне 20 нм.

5. Методом световой микроскопии зафиксированы кристаллы эвтектического цементита с частицами ϵ -меди, выделившихся в виде ожерелий в приграничных слоях карбидов. Предложен механизм, объясняющий их происхождение, в соответствии с которым рост кристалла цементита сопровождается оттеснением меди и преимущественным ее выделением в виде микрообъемов ϵ -фазы по контуру карбида. При последующем нарастании на эвтектические карбиды слоя вторичного цементита эти частицы оказываются окруженными со всех сторон цементитом. Как правило, частицы ϵ -*Сu* такого рода имеют неправильную форму, размер их составляет ~1...2 мкм.

6. Легирование медью в сочетании с алюминием является эффективным способом улучшения комплекса свойств высокоуглеродистых сплавов на основе железа. Введение меди сопровождается ростом микротвердости колоний пластинчатого перлита, как в чугунах, так и в заэвтектоидных сталях. Основные причины этого связаны с повышением дисперсности феррито-цементитной смеси, присутствием растворенных атомов меди в α -железе, а также выделением упрочняющих наноразмерных медистых частиц в ферритных промежутках колоний. Эффект упрочнения феррито-цементитной смеси, обусловленный введением меди, проявляется при содержании ее в сплавах до ~ 5...6 %. Введение в неграфитизированную заэвтектоидную сталь 9 % *Сu* приводит к увеличению предела прочности в условиях растяжения от 300 до 430 МПа. В графитизированной заэвтектоидной стали аналогичного состава прирост σ_b на 50 МПа меньше.

7. Совместное легирование алюминием и медью представляет собой эффективный подход к решению проблемы повышения антифрикционных свойств заэвтектоидных сталей, находящихся в графитизированном и неграфитизированном состоянии. Свойства заэвтектоидных сталей, легированных медью, являются промежуточными между чугуном АЧС-1 и бронзой БрА9ЖЗЛ. Повышение содержания меди сопровождается снижением значений коэффициента трения скольжения сталей. Присутствие около 1 % алюминия в сочетании с медью в количестве более 6 процентов, а также формирование медьсодержащих включений, близких по составу к алюминиево-железистым бронзам, является одним из наиболее существенных факторов, объясняющих улучшение триботехнических свойств высокоуглеродистых сплавов.

8. Наличие в структуре медистых сталей и чугунов включений графита с развитой поверхностью оказывает положительное влияние на антифрикционные свойства сплавов. Наименьшими значениями коэффициента трения из исследованных в работе сталей обладает сплав, содержащий ~ 9 % *Сu*. В диапазоне удельных нагрузок от 7 до 10 МПа его антифрикционные свойства усту-

пают бронзе БрА9Ж3Л, но существенно выше по сравнению с антифрикционным чугуном АЧС-1.

9. Добавление меди в высокоуглеродистые сплавы приводит к росту их относительной износостойкости в условиях трения о закреплённые частицы абразива. При добавлении в заэвтектоидную неграфитизированную сталь 6 % меди величина её относительной износостойкости при трении о закреплённые частицы абразива возрастает от 2,5 до 3 раз. Введение в доэвтектический чугун 6 % меди приводит к повышению его относительной износостойкости ϵ от 2 до 2,3 раз. Максимальным уровнем износостойкости, в 3,6 раза превосходящим стойкость бронзы БрА9Ж3Л, обладает чугун, содержащий 14,7 % *Si*, высокая износостойкость которого обусловлена повышением объёмной доли ледебурита. Эффект увеличения износостойкости, в первую очередь, объясняется повышением твёрдости железоуглеродистых сплавов при их легировании медью.

10. С использованием результатов экспериментальных исследований разработан способ получения нанодисперсных порошков карбидов вольфрама и титана, на который получен патент *RU2508249C1*. Применение предложенных модификаторов позволяет на ~25 % повысить предел прочности чугуна, содержащего 9 % меди и 1,5 % алюминия.

11. Обоснованные в диссертации предложения использованы при разработке антифрикционных материалов, предназначенных для изготовления втулок тяжело нагруженных узлов трения горнодобывающих машин. Установлено, что наилучшим комплексом механических и антифрикционных свойств обладает доэвтектический чугун, содержащий ~ 6 % меди и ~ 1 % алюминия. Из предложенного в работе материала на предприятии «Центролит-С» были изготовлены втулки скольжения опорных катков экскаваторов ЭКГ-8. Апробация втулок на горнодобывающих предприятиях «Сорский ГОК» и ООО горная компания «Майская» показала их высокую эффективность.

12. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия» (в лекционных курсах «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов», а также при выполнении лабораторных работ).

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Анализ результатов проведенных исследований свидетельствует о целесообразности использования предложенных материалов, как сплавов антифрикционного назначения с повышенным уровнем износостойкости. Наиболее рационально их применение для изготовления крупногабаритных втулок скольжения, к которым применяются относительно невысокие требования по значениям скоростей трения. Особенности структуры, механических и триботехнических свойств, характерные для анализируемых материалов, предполагают возможность их эффективной эксплуатации в присутствии абразивных частиц. Это качество может иметь особое значение при выборе анализируемых материалов для изготовления узлов трения крупных технологических горных машин. На изучение отмеченных особенностей следует обратить особое внима-

ние при дальнейшем развитии темы. Одно из направлений дополнительных исследований, которые связаны с результатами, полученными в данной работе, заключается в поиске иных систем легирования железоуглеродистых сплавов, в которых наряду с медью могут быть введены другие элементы, способствующие росту износостойкости и улучшению антифрикционных свойств.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Особенности выделения фазы ϵ -Cu в чугунах, легированных медью и алюминием [Текст] / А. А. Батаев, Н. В. Степанова, И. А. Батаев, Й. Канг, А. А. Разумаков // *Металловедение и термическая обработка металлов* - 2018. - № 3. - С. 18-25.

2. Влияние меди на антифрикционные свойства серых чугунов [Текст] / Е. Д. Головин, В. А. Кузнецов, В. Кумар, П. А. Попелюх, Н. В. Степанова // *Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты*. – 2012. – № 1(54). – С. 81 – 84.

3. Особенности выделения наноразмерных частиц ϵ -фазы меди в ферритных промежутках пластинчатого перлита [Текст] / И. А. Батаев, Н. В. Степанова, А. А. Батаев, А. А. Никулина, А. А. Разумаков // *Физика металлов и металловедение*. - 2016. - Т. 117, № 9. - С. 932-937.

4. Структура и свойства наплавленных электродуговых покрытий из порошков механоактивированных СВС-композитов [Текст] / А. А. Ситников, Н. В. Степанова, В. И. Яковлев, М. Е. Татаркин, А. В. Собачкин, М. Н. Сейдуров, И. Ю. Резанов // *Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты*. - 2011. - № 3(52). - С. 51-54.

5. Износостойкость заэвтектоидной стали, легированной медью и алюминием [Текст] / Н. В. Степанова, А. А. Батаев, А. А. Ситников, Т. Н. Осколкова // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. - 2015. - № 4 (69). - С. 72-79.

6. Особенности упрочнения феррита и перлита в сталях и чугунах, легированных медью [Текст] / И.А. Батаев, Н.В. Степанова, А.А. Батаев, А.А. Разумаков // *Известия высших учебных заведений. Физика*. - 2017. - Т. 60. - № 6. - С. 86-90.

7. Внутриформенное модифицирование чугунов. Исследование влияния модификаторов на основе карбида кремния на процессы кристаллизации серого чугуна. Сообщение 1 [Текст] / В. А. Полубояров, З. А. Коротаева, А. А. Жданок, В. А. Кузнецов, Н. В. Степанова // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2014. – № 6. – С. 20–24.

8. Структура и механические свойства серого чугуна, модифицированного механо–активированной смесью карбида вольфрама и хрома [Текст] / Н. В. Степанова, В. А. Кузнецов, Ю. Н. Малютина, Д. С. Терентьев, В. С. Ложкин, А. А. Разумаков // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2013. – № 3. – С. 121–126.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных *Web of Science/Scopus*

9. *Stepanova, N. V. The effect of doping with copper and aluminium on structure, mechanical and friction properties of steel [Text] / N. V. Stepanova, A. A.*

Razumakov // *The 8 international forum on strategic technologies (IFOST 2013) : Proc., Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar. – 2013. – Vol. 1. – P. 240 – 242.*

10. *Influence of Surfactants on the Structure and Wear Resistance of Copper Alloyed Hypereutectoid Steel [Text] / N. Stepanova, A. Razumakov, E. Lozhkina, I. Zhil'tsov, V. Kuznetsov // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 53 – 58.*

11. *Stepanova, N. V. Structure and mechanical Properties of Cu–alloyed cast iron [Text] / N. V. Stepanova, A. A. Razumakov, E. A. Lozhkina // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 178 – 182.*

12. *Stepanova N. Influence of copper on mechanical properties of graphitized hypereutectoid steel [Text] / N. Stepanova, T. Ogneva, A. Razumakov // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – Pt. 1. – P. 215-219.*

13. *The structure and properties of cast iron alloyed with copper [Text] / O. Lenivtseva, A. Razumakov, N. Stepanova, I. Bataev, I. Riapolova, K. Emurlaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016. - Vol. 124, № 1. - Art. 012136 (4 p.).*

14. *Stepanova N. Effect of copper on the friction properties of gray cast iron [Text] / N. Stepanova, E. Lozhkina, A. Razumakov // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 698 : Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. - P. 364-368.*

15. *Stepanova N. Quenching of cast iron with a high copper content [Text] / N. Stepanova, A. Bataev, A. Razumakov // AIP Conference Proceedings. - 2015. – Vol. 1683. – Art. 020222 (5 p.).*

16. *Wear resistance of hypereutectoid steel alloyed with copper and aluminium [Text] / N. Stepanova, E. Lozhkina, A. Razumakov, A. Losinskaya // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 788 : Actual Problems and Decisions in Machine Building. - P. 274-280.*

В прочих изданиях:

17. *Степанова Н. В. Особенности образования медьсодержащих включений в чугунах, содержащем 14,7 % меди [Текст] / Н. В. Степанова // Актуальные проблемы в машиностроении. - 2016. - № 3. - С. 404-409.*

18. *Степанова Н. В. Влияние меди на структуру и износостойкость графитизированной заэвтектоидной стали [Текст] / Н. В. Степанова // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ – 2014) : сб. науч. тр. 3 междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студ., 26–28 марта 2014 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2014. – С. 153-156.*

19. *Степанова Н. В. Влияние содержания меди на структуру серого чугуна [Текст] / Н. В. Степанова // Актуальные проблемы в машиностроении: материалы 1 междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 26 марта 2014 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 503-508.*

20. *Степанова, Н. В. Влияние модификатора на основе субмикронных частиц карбида кремния на структуру и механические свойства серого чугуна [Текст] / Н. В. Степанова // Наука. Технологии. Инновации // Материалы все-*

русской научной конференции молодых ученых в 7–и частях, Новосибирск, – 2012. Часть 4. – С. 149–151.

21. Зимоглядова Т. А. Влияние наноразмерных частиц меди на механические и антифрикционные свойства стали [Текст] / Т. А. Зимоглядова, Н. В. Степанова, А. А. Разумаков ; [науч. рук. А. А. Батаев] // 1 ежегодная Российская национальная конференция с международным участием по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике, НМСТ–2016 : conf. proc., Novosibirsk, Sedova Zaimka, 26–29 June 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – P. 138-140.

22. Степанова Н. В. Закалка чугунов с высоким содержанием меди [Текст] / Н. В. Степанова, А. А. Разумаков // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций : тез. докл. междунар. конф., Томск, 21–25 сент. 2015 г. – Томск : Изд-во ИФПМ СО РАН, 2015. – С. 211-212.

23. Влияние содержания меди на структуру и механические свойства серого чугуна [Текст] / Н. В. Степанова, А. А. Разумаков, И. Ю. Жильцов, И. А. Соколов // Актуальные проблемы в машиностроении: материалы 1 междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 26 марта 2014 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 509-513.

24. Степанова Н. В. Структурные особенности серого чугуна, легированного медью [Текст] / Н. В. Степанова, А. А. Разумаков, Е. А. Ложкина // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. тр. 5 междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 22–23 мая 2014 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 428–431.

25. Структура и свойства чугунов, легированных медью после графитизирующего отжига [Текст] / К. И. Эмурлаев, Н. В. Степанова, Т. А. Зимоглядова, Ю. Ю. Ряполова // Современные технологии и материалы новых поколений : сб. тр. междунар. конф. с элементами науч. шк. для молодежи, Томск, 9–13 окт. 2017 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2017. – С. 270-272.

Патент:

1. Способ получения нанодисперсных порошков карбидов вольфрама и титана методом СВС [Текст] // Патент России №. 2508249, 27.02.2014. Бюл. № 6. / Полубояров В.А., Мали В.И., Коротаева З.А., Жданок А.А., Паули И.А., Степанова Н.В.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
Тел./факс: (383)346-31-87
формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.
заказ № 1359 подписано в печать 10.10.2018 г.