

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Степановой Натальи Владимировны «Влияние меди на комплекс механических и антифрикционных свойств заэвтектоидных сталей и чугунов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)**

### **Актуальность темы диссертационной работы**

В настоящее время проблема снижения стоимости материалов, используемых при изготовлении деталей крупногабаритных подшипников скольжения не теряет своей актуальности. Зачастую, в таких узлах используются сплавы на основе меди, в частности бронзы. В связи с высокой стоимостью меди данные сплавы не всегда являются оптимальным выбором. Альтернативным решением может быть использование легированных медью железоуглеродистых сплавов.

Следует отметить, что легирование медью способствует повышению уровня механических свойств железоуглеродистых сплавов, снижению их коэффициента трения скольжения, повышению износостойкости и коррозионной стойкости. В качестве основы для легирования в работе используются железоуглеродистые сплавы с высоким содержанием углерода, а именно заэвтектоидные стали и чугуны. Структура и свойства сплавов такого типа в литературе описаны гораздо в меньшей степени, чем низкоуглеродистые ограниченно легированные медью стали, широко применяемые при изготовлении конструкций ответственного назначения. Таким образом, изучение структуры, механических и триботехнических свойств высокоуглеродистых сплавов, содержащих более 2 % меди, представляет собой актуальную научную и прикладную задачу.

### **Анализ структуры и содержания диссертационной работы**

**Во введении** описана актуальность тематики диссертационной работы, приведены данные о методах исследования, сформулированы цель и задачи работы, отражена научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость, отмечена степень достоверности и апробация результатов диссертации.

**Первый раздел** посвящен анализу отечественной и зарубежной научно-технической литературы по теме диссертационной работы. Проанализированы особенности эксплуатации тяжело нагруженных узлов трения скольжения, описаны все материалы, из которых изготавливаются детали подобных узлов. Наиболее часто в таких узлах используются бронзы различного состава. На основе литературных данных показана возможность замены бронз на железоуглеродистые сплавы, при условии легирования их медью. Проанализированы фазовые диаграммы состояния двух- и трехкомпонентных систем, содержащих железо медь и углерод, а также описано влияние различных элементов на растворимость меди в

железоуглеродистых сплавах. Особое внимание уделено механизмам упрочнения в системе Fe-C-Cu.

**Во втором разделе** дана характеристика исходных материалов, описана технология литья в песчано-глинистые формы и указан химический состав всех полученных отливок. Помимо этого, указаны контрольные материалы, с которыми проводилось сравнение исследуемых сплавов, приведен их состав и механические свойства. Указаны сведения о методах и оборудовании для исследования структурных особенностей, механических и триботехнических свойств полученных материалов (оптическая металлография, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, измерение твердости, испытания на одноосное растяжение и сжатие, измерение коэффициента трения и износостойкости в условиях трения скольжения, а также износостойкость при трении о закрепленные частицы абразива).

**Третий раздел** посвящен влиянию меди на структуру железоуглеродистых сплавов, таких как заэвтектоидные стали в графитизированном и не графитизированном состояниях и доэвтектические чугуны. Проанализирована уточненная диаграмма состояния Fe-C-Cu, описано влияние меди на структуру графита, феррита и перлита. Особое внимание уделено особенностям выделения фаз на основе меди. Описаны условия образования частиц  $\epsilon$ -Cu, образующихся на четырёх различных стадиях. Выявлены новые особенности строения частиц  $\epsilon$ -Cu, выделяющихся внутри колоний ледебурита, а также внутри крупных кристаллов цементита. Предложенные механизмы образования таких структур обоснованы на основании большого объема исследований, которые проведены такими методами как металлография, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, а также рентгеноструктурный анализ. Помимо этого, описаны преобразования, происходящие в структуре чугуна, легированного медью после закалки и графитизирующего отжига.

**В четвертом разделе** приведены результаты оценки механических и триботехнических свойств легированных медью чугунов и заэвтектоидных сталей в графитизированном и не графитизированном состояниях. Показано, что медь оказывает влияние на микротвердость пластинчатого перлита. Прирост микротвердости составляет 70-80 МПа. При увеличении содержания меди в составе как чугуна, так и заэвтектоидных сталей заметен существенный прирост предела прочности при растяжении и сжатии. Основными причинами увеличения показателей механических свойств при легировании исследованных железоуглеродистых сплавов является наличие растворенных атомов Cu в альфа-Fe, увеличение дисперсности пластинчатого перлита, а также наличие наночастиц  $\epsilon$ -Cu. Приведены результаты коэффициента трения скольжения исследованных сплавов в широком диапазоне нагрузок. Показано, что с повышением содержания меди в описанных сплавах коэффициент трения скольжения снижается. За счет совокупности изменения прочностных характеристик и снижения коэффициента трения при увеличении содержания меди возрастает

износостойкость заэвтектоидных сталей в условиях трения скольжения. При этом износостойкость всех исследованных сплавов, легированных медью, в условиях трения о закрепленные частицы абразива коррелирует с твердостью материалов.

**Пятый раздел** посвящен апробации результатов проведенных исследований. Рассмотрены вопросы использования разработанных материалов в горнодобывающей промышленности. Приведены рекомендации по практическому применению материалов, полученных в диссертационной работе. На основании этих рекомендаций 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. Применение разработанных модификаторов позволяет повысить на ~ 25 % предел прочности чугунов, в том числе и легированных медью. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в НГТУ при подготовке бакалавров и магистров. На основании проведенных исследований авторами был получен патент.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы, отображающие достижение цели, поставленной в диссертационной работе.

Общий объем диссертации составляет 203 страницы, пять разделов, в том числе 62 рисунка, 2 таблицы, список используемых источников из 212 наименований. Работа изложена технически грамотным языком, ее содержание наглядно подтверждается иллюстрациями с таблицами, графиками и рисунками, полученные результаты грамотно проанализированы и обобщены. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

**Наиболее важные научные и практически значимые результаты работы, отличающиеся новизной:**

Анализ материалов, выполненный на различных масштабных уровнях, позволил уточнить происхождение частиц  $\epsilon$ -меди, связать их природу с диаграммой состояния «Fe-C-Si». Частицы фазы на основе меди выделяются в широком диапазоне размеров. Природа происхождения этих частиц имеет принципиальное значение, поскольку их размеры и распределение являются факторами, определяющими комплекс механических и триботехнических свойств материалов. Выявлены четыре характерных типа таких частиц, отличающиеся происхождением, размерами и формой. Фаза  $\epsilon$ -Si выделяется из жидкого расплава, аустенита и феррита. Также, методами структурного анализа обнаружены кристаллы цементита с частицами  $\epsilon$ -Si, выделившимися в виде цепочек в приграничных слоях карбидов. Предложен механизм, объясняющий их происхождение.

Установлено, что рост прочностных показателей, легированных медью заэвтектоидных сталей и чугунов, обусловлен повышением дисперсности пластинчатого перлита, выделением упрочняющих наноразмерных частиц  $\epsilon$ -Si в  $\alpha$ -Fe, а также растворением атомов меди в  $\alpha$ -Fe. Помимо этого,

разработан способ получения нанодисперсных порошков карбидов вольфрама и титана, на который получен патент *RU2508249C1*. Применение предложенных модификаторов позволяет дополнительно повысить предел прочности чугунов, легированных медью на ~ 25%.

Автором диссертационной работы установлено, что легирование медью чугунов и заэвтектоидных сталей представляет собой эффективный подход к решению проблемы повышения антифрикционных свойств и износостойкости этих материалов. Среди исследованных в работе сталей наименьшими значениями коэффициента трения обладает сплав, содержащий ~ 9 % меди. Лучшие триботехнические свойства характерны для чугуна, содержащего 6 % меди. Показано, что по уровню антифрикционных свойств легированные медью железуглеродистые сплавы являются промежуточными между чугуном АЧС-1 и бронзой БрА9ЖЗЛ. Обоснованные в диссертации предложения используются на предприятии «Центролит-С» для изготовления деталей крупногабаритных узлов трения скольжения. Апробация втулок опорных катков экскаваторов ЭКГ-8 на горнодобывающих предприятиях «Сорский ГОК» и ООО Горная компания «Майская» показала их высокую эффективность.

#### **Замечания**

1. В работе приведены данные по влиянию меди на коэффициент трения скольжения при разных нагрузках заэвтектоидных сталей и чугунов. Все испытания проводились в среде минерального масла. В работе отсутствуют данные по поведению этих же материалов при сухом трении или трении в агрессивных средах.

2. Фазовая диаграмма системы медь-железо отличается наличием ретроградного солидуса. Тем не менее, рассматривая фазовые превращения при охлаждении сплавов автор этот эффект не рассматривает.

3. В работе неоднократно отмечается, что железуглеродистые сплавы были легированы не только медью, но и алюминием. При этом влиянию алюминия на формирование структуры и свойств разрабатываемых сплавов уделяется недостаточно внимания.

#### **Заключение**

Несмотря на вышеуказанные замечания, диссертация Степановой Н.В. выполнена на высоком научном уровне и является завершенной научно-квалификационной работой. Достоверность научных результатов, а также обоснованность выводов и научных положений, выносимых на защиту, обеспечены использованием широкого спектра современного аналитического и испытательного оборудования для изучения структуры и свойств материалов. Выводы и научные положения по работе надежно подкреплены совокупностью экспериментальных данных, полученных при выполнении большого объема разноплановых исследований.

По результатам диссертации опубликовано 25 печатных работ в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе 8 в журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 8 публикаций в зарубежных изданиях, входящих в перечни Web of Science или Scopus, 9 - в сборниках научных трудов и трудов

международных и всероссийских научно-технических конференций. Кроме того, получен 1 патент Российской Федерации. По объему, актуальности научных исследований, новизне, достоверности и обоснованности полученных результатов, а также научной и практической значимости работа соответствует критериям, предъявляемым к диссертационным работам (раздел II Положения о присуждении ученых степеней).

Диссертация полностью отвечает требованиям, указанным в п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» и содержит научно обоснованные технические, технологические решения, направленные на получение антифрикционных железоуглеродистых сплавов с высоким содержанием углерода, комплексно упрочненных компактными частицами на медной основе.

На основании вышеизложенного считаю, что автор работы Степанова Наталья Владимировна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении).

Официальный оппонент,  
младший научный сотрудник  
Лаборатории контроля качества  
материалов и конструкций Института  
физики прочности и  
материаловедения  
Сибирского отделения Российской  
академии наук (ИФПМ СО РАН),  
кандидат технических наук

Чумаевский Андрей Валерьевич

Контактная информация:  
634055 г. Томск, просп. Академический, 2/4  
Тел.: +7 961-891-41-49  
e-mail: tch7av@gmail.com

Подпись Чумаевского А.В.  
удостоверяю.  
Ученый секретарь ИФПМ С  
к.ф.-м.н.

Матолыгина Н.Ю.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИФПМ СО РАН)

Адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4  
Телефон: +7 (3822) 49-18-81 Факс: +7 (3822) 49-25-76.  
E-mail: root@ispms.tomsk.ru

*Проставил в срок 26.11.2018*

*С докладом ознакомлена 28.11.2018* *руч. Степанова Н.В.*