

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Семенова Константина Геннадьевича
«Развитие научных основ производства фасонных отливок из
низколегированных сплавов меди с железом», представленной на соискание
ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.3 – «Литейное
производство»

Актуальность темы диссертации. Развитие новых технологий требует создания, а также оптимизацию известных составов сплавов на основе меди, от которых требуются повышенные электро- и теплопроводность в сочетании повышенными механическими и литейными свойствами. Традиционные деформируемые и литейные сплавы на основе меди продолжают быть востребованными до настоящего времени там, где требуются высокие коррозионные свойства, криогенные характеристики и другие важные свойства, но в ряде современных технических творениях они не всегда могут обеспечить высокие служебные свойства. За последние годы основными объектами синтеза новых сплавов на основе меди являются низколегированные сплавы. Наиболее известны сплавы систем Cu-Cr, Cu-Zr, Cu-Ni-Si и ряд других, которые входят в число сплавов, где требуются высокие электро- и теплопроводность, и повышенная жаропрочность. Однако, стандартные сплавы имеют ряд особенностей, в частности, невысокие литейные свойства, относятся к числу пленообразующих сплавов, а наиболее высокие свойства у них реализуются после термической обработки. Низколегированные литейные сплавы, которые используются в современной технике, подразделяются на две группы. К первой группе относятся дисперсионно-твердеющие, т.е. у которых повышение жаропрочных свойств приобретает в результате термомеханической обработки. Другая группа сплавов базируется на сплавах, у которых прочностные свойства определяются разностью межатомных размеров между основой сплава и легирующими компонентами. У этих сплавов более высокие технологические и литейные свойства, но пониженные характеристики электропроводности. Стандартные низколегированные сплавы меди в основном относятся к классу деформируемых сплавов (листы, ленты, полосы, прутки, трубки, проволока и др.). Значительно меньше объем производства изделий из литейных сплавов для производства фасонных отливок для электротехнических отраслей (контакты, щеткодержатели, фасонные электроды, теплообменники, фурмы и др.). Для получения фасонных отливок могут быть перспективны сплавы систем Cu-Zr-B; Cu-Fe. При этом сплавы меди с железом, дисперсионно-

твердеющие сплавы, в зависимости от термообработки (М, П, Т) обеспечивают более высокие механические свойства по сравнению с алюминиевыми бронзами.

Поэтому тема диссертационной работы Семенова К.Г., направленной на разработку процессов плавки и литья фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом, отработки режимов термической обработки отливок, исследованию их технологических, физико-механических и триботехнических свойств, отвечает критерию актуальности.

Общая характеристика работы. Диссертационная работа представлена на 337 страницах машинописного текста, из которых основное содержание работы составляет 292 станицы включая список литературы из 221 источника отечественных и зарубежных авторов.

Основные результаты работы изложены в 68 публикациях, в т.ч. трех монографиях; 42 публикациях в научных изданиях рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК; восьми публикаций, индексируемых в базах (Web of Science, Scopus); пяти патентах на изобретения, полезные модели; свидетельствах на базы данных и программы для ЭВМ.

Во введении сформулированы актуальность темы работы, изложены цель и задачи исследования, научная новизна, приведены научные положения, выносимые на защиту, показана теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы.

В первой главе представлен литературный обзор, в первую очередь, направленный на анализ влияния легирующих элементов и примесей на структуру и свойства технически чистой меди, влияния легирующих элементов на электро- и теплопроводность меди, сформированы критерии применения низколегированных медных сплавов для машиностроительных технологий. Рассмотрены особенности технологии подготовки расплава и выбора способа литья с учетом специфики взаимодействия расплава с кислородом, водородом, раскисления, при этом отмечено особое внимание направлено на изучения поведения кислорода при плавке, а также выбору оптимального раскислителя, Рассмотрены фундаментальные критерии прочностного легирования меди. За основу физико-химического анализа выбора эффективных легирующих компонентов приняты критерии диаграмм состояния. Определены критерии применения легирующих элементов при разработке и использовании низколегированных медных сплавов.

Во второй главе рассмотрена методология и методы исследования. Объектами экспериментальных исследований были технологические режимы плавки, опытные отливки и заготовки низколегированных сплавов на основе меди. Рассмотрены вопросы разработки составов низколегированных литейных сплавов меди, проведен выбор легирующих компонентов или их комбинаций составов с учетом ряда факторов, определяющих технологическую эффективность, с целью организации промышленного производства получения фасонных отливок. Отмечена высокая технологичность сплавов на основе системы медь–железо с легирующими добавками, которые обеспечивают возможность получения достаточно высокому сочетанию электропроводности и прочности. Проведена оценка технологичности низколегированных сплавов меди с железом на основе анализа медного угла неравновесной диаграммы состояния, характерной для литого состояния, который позволяет приступить к синтезу низколегированных сплавов меди с железом, что предполагает получение высоких значений электро- и теплопроводности с хорошими механическими, и эксплуатационными свойствами. Рассмотрены особенности кристаллизации низколегированных сплавов меди в интервале содержаний от 0,1 % до 1 % железа. Показано, что темп кристаллизации сплава Cu-1%Fe в интервале кристаллизации 1087 -1085 °С при приближении к температуре солидуса темп кристаллизации непрерывно увеличивается, что определяет динамику неравновесной кристаллизации сплавов и образованию пересыщенного твердого раствора железа в меди. В результате проведенных расчетов были получены результаты, которые позволяют говорить о высокой технологичности сплавов системы медь – железо, что позволяет перейти к синтезу низколегированных литейных сплавов.

В третьей главе рассмотрены особенности процесса плавки низколегированных сплавов меди. Определены наиболее вероятные и объективные данные по термодинамическим расчетам системы медь-кислород, кинетические процессы, характеризуемые значениями диффузии кислорода в меди. Показано, что в металлургическом производстве медных низколегированных сплавов главным является обеспечение минимального окисления легирующих элементов при их введении в медный расплав. Показано, что растворы кислорода в меди подчиняются закону Генри во всем диапазоне его содержания в меди, вплоть до насыщения. Установлено, что необходимо установить стабильное или часто наблюдаемое содержание кислорода в меди после ее расплавления, непосредственно перед раскислением, чтобы содержание кислорода. Для раскисления расплава предложены активные (углерод) и растворимые (фосфор) раскислители. Установлено время диффузионного

раскисления расплава меди углеродом до регламентируемых значений содержаний кислорода, которое не приводит к существенным потерям электропроводности из-за образования химического соединения Fe_3O_4 . Предложены более эффективные углеродсодержащие диффузионные раскислители, в частности, графитовая крошка или графитовый мелкий кокс.

В четвертой главе представлены комплексные исследования литейно-технологических и эксплуатационных свойств при легировании меди добавками Sn, Si, Ni и Fe (до 1%). В результате комплексного исследования традиционных литейных свойств установлено, что легирование меди небольшими добавками этих элементов оказывает существенное влияние на ее литейно-технологические свойства меди. Железо является весьма перспективным легирующим элементом для разработки литейных сплавов. Оно заметно повышает жидкотекучесть меди при легировании до 0,5%, а в пределах 1 % жидкотекучесть остается на достаточно высоком уровне. Железо не приводит к образованию рассеянной пористости в отливках. Легирование меди добавками железа, кремния и никеля в пределах 1 % (по массе) положительно влияет на горячеломкость сплавов. Эти сплавы не склонны к образованию горячих трещин в отливках и могут быть рекомендованы для производства отливок в формы многоразового использования, для которых характерно отсутствие податливости (кокили, пресс-формы ЛПД и ЛКД). Железо повышает жидкотекучесть меди, способствует образованию концентрированной усадочной раковины и при этом несколько снижает линейную усадку, а при концентрации до 0,5% снижает температуру пленообразования. Сплавы меди с железом способны обеспечить высокий уровень литейно-технических свойств для получения фасонных отливок.

В пятой главе проведена оценка технологических свойств низколегированных сплавов меди с железом. Проведена разработка составов низколегированных сплавов меди с железом. Предложен состав двухкомпонентного сплава, состав и технология плавки, на основе диффузионного раскисления расплава меди перед введением железа, защищены патентом на изобретение. Проведены исследования режимов термической обработки сплава: на основе термического отжига и закалке (при фиксированной температуре) со старением, которые позволяют стабилизировать уровень прочностных и эксплуатационных свойств сплава на основе равномерного распределения железа в сплаве. Представлены исследования процессов повторного переплава низколегированных сплавов меди с железом, в том числе с применением рентгеноспектрального анализа. Этот фактор расширяет возможность использования лома меди, образующегося на предприятиях черной

металлургии для получения фасонных отливок. Подтверждена целесообразность использования отходов проката меди, образующегося на предприятиях металлургического комплекса.

В шестой главе обоснована целесообразность применения низколегированных сплавов системы медь – железо в электронной и электротехнической промышленности, криогенной технике и других развивающихся областей современного машиностроения. В данной главе рассмотрено моделирование процессов изготовления отливок из низколегированного сплава медь-железо различными способами литья: в кокиль, по выплавляемым моделям и, впервые, проведено моделирование процесса литья ЛКД низколегированных сплавов меди с 2,65% железа. Представлены данные по промышленным испытаниям сплава для изготовления фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом. Предложено перспективное направление использования сплава для изготовления деталей трения с высокой проводимостью на основе применения термообработки сплава меди с железом, которое значительно повышает антифрикционные свойства, что позволяет повысить работоспособность отливок из сплава меди с железом по сравнению с медью промышленной чистоты в 2...2,5 раза.

В заключении сформулированы выводы, предложены практические рекомендации по применению сплавов меди с железом.

В приложениях представлены карты микроструктуры сплавов меди с железом, рентгеноспектральный анализ и карты распределения легирующих компонентов сплава медь - 2,65 % железа для различных режимов плавки и термообработки, акты промышленных испытаний.

Научная новизна работы. Установлены критерии неравновесной кристаллизации, системы медь–железо в интервале перитектического превращения, которые позволили разработать составы низколегированных сплавов меди с железом. Установлены предельно допустимые значения содержания кислорода в меди перед введением в расплав легирующих элементов. На основе рентгеноспектрального анализа установлено, что в сплавах меди с железом кислород находится в виде инертного химического соединения, а при раскислении расплава фосфором, образуется фосфид железа Fe_3P , включения которого также инертны. Определены значения совместного присутствия железа и фосфора в расплаве меди, при которых содержание кислорода может быть ограничена 0,01 % (по массе).

Практическая значимость. В результате промышленных испытаний предложены рекомендации по производству фасонных отливок из

низколегированных сплавов на основе меди с железом. Технические решения, которые приняты к внедрению: способ подготовки расплава из низколегированных сплавов меди с железом, технологии производства отливок в песчаные формы, кокиль, по выплавляемым моделям и литьем с кристаллизацией под давлением. Разработаны и внедрены технологические рекомендации по изготовлению фасонных отливок из низколегированного сплава медь–железо способом литья с кристаллизацией под давлением, производство корпусных отливок в песчаные формы и кокильного литья.

Достоверность научных положений, выводов и заключений. В работе использованы современные и оригинальные методики, приборы и оборудование, компьютерные технологии, пакеты программ качественной металлографии, моделирование процессов литья. Получены три свидетельства программ для ЭВМ, патенты на полезную модель, патент на изобретение. Основные результаты диссертационной работы изложены в 68 публикациях, в т.ч. трех монографиях, представлены на 30 международных конференциях.

Соответствие автореферата диссертации. Диссертационная и автореферат находятся в полном соответствии по содержанию, оформлены в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Замечания и вопросы по работе

1. Автор справедливо использует диаграмму состояния Cu–Fe в качестве основы для анализа влияния термической обработки на структуру и физико-механических свойств экспериментальных сплавов, однако лишь на качественном уровне. Было бы целесообразно воспользоваться специализированной программой (например, Thermo-Calc), позволяющей проводить количественные расчеты фазового состава не только для данной двойной системы, но и для многокомпонентных систем (т.е. учитывать наличие других элементов, в частности фосфора).
2. Поскольку электропроводность медных сплавов определяется, главным образом, концентрацией легирующих элементов в твердом растворе, было целесообразно провести оценку этих концентраций (прежде всего железа) после различных режимов термообработки.
3. Следует отметить, что локальность микрорентгеноспектрального анализа недостаточна для определения концентрации в растворе меди, поскольку не позволяет выявить наличие частиц субмикронного размера.

4. Выбранная продолжительность старения (1 час) представляется недостаточной для достижения равновесия в сплавах Cu–Fe, особенно при низких температурах. Возможно, что именно степень отклонения от равновесия и объясняет сложный характер зависимостей, приведенных на рис.5.7-5.11. Следовало бы рассмотреть диффузию железа в медном растворе и построить и кинетические кривые твердости и электропроводности при разных температурах.
5. В диссертации для объяснения изменения механических свойств сплавов Cu-Fe используется такая причина «Анализ распределения железа и фосфора указывает на измельчение включений железа после термообработки с образованием дисперсных включений» (с. 197). Это представляется весьма странным, поскольку с повышением температуры должно происходить увеличение концентрации Fe в медном твердом растворе (согласно диаграмме Cu–Fe) и укрупнение нерастворенных частиц железа, а не их измельчение.
6. На с.174 написано «Наиболее точно отражает структурные изменения в сплаве характер кривой электропроводности, представленный на рис 5.11», но на рис.5.11 приведена зависимость не электропроводности, пластичности.
7. На с. 187 написано «.... железо и фосфор образуют в литой структуре химическое соединение в виде фосфидной эвтектики Cu_3P ». Вероятно, речь идет о соединении Fe_3P .
8. На ряде рисунков с микроструктурами отсутствует масштабный маркер (например, 5.3, 5.19, 5.34), что не позволяет оценивать размер структурных составляющих.

Заключение по работе

В целом, указанные замечания не снижают общую положительную оценку, а диссертационная работа Семенова К.Г. **«Развитие научных основ производства фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом»** является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научно-техническая задача, имеющая важное хозяйственное значение, связанное с производством фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом взамен отливок из меди промышленной чистоты.

Работа выполнена на высоком научно-практическом уровне, соответствует паспорту специальности 2.6.3 – «Литейное производство» и отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 N 335, а ее

автор, **Семенов Константин Геннадьевич**, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.3 – «Литейное производство».

Официальный оппонент:

Профессор кафедры «Обработка металлов давлением»


Федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования

«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

г. Москва,

д.т.н., профессор



Н.А. Белов

21.08.23г.

119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

Тел. 8 (910) 476-58-57, Email: nikolay-belov@yandex.ru

Подпись Белова Николая Александровича удостоверяю:

Проректор по безопасности
и общим вопросам



И.М. Исаев