

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО «НПО» ЦНИИТМАШ»,
докт. техн. наук

В.В. Орлов

2023 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Семенова Константина Геннадьевича на тему «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.

В диссертационный совет Д 24.2.345.03 на базе ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет» им. Р.Е. Алексеева

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа изложена на 337 страницах машинописного текста, включает 127 рисунков, 31 таблицу и состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 221 источника отечественных и зарубежных авторов и восьми приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность диссертационной работы, объекты и предметы проведенных исследований, представлены степень разработанности темы диссертации, цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, отражена степень достоверности и апробация результатов разработок, отмечены личный вклад и публикационная активность соискателя ученой степени.

В первой главе представлен глубокий анализ источников литературы, касающихся вопросов легирования меди, разработки низколегированных медных сплавов для современных технологий машиностроения, Представлены общие сведения о легировании меди, на основе влияния легирующих элементов на электро- и теплопроводность меди, сформированы критерии ее применения в промышленности. Отмечается, что фасонные отливки из меди применяют для электротехнических целей, а также для изготовления сварочных машин, котлов и химических аппаратов. В зависимости от требований к свойствам изделий из чистой меди, для изготовления литых заготовок используют катодную медь марок М0, М1, которая имеет низкие литейные и прочностные свойства. При этом применение низколегированных медных сплавов обусловлено как особенностями их химического состава, так и технологическими аспектами изготовления заготовок из этих сплавов: плавки сплавов, литья слитков и фасонных заготовок, горячей и холодной деформации, термической обработки.

Особенно актуально для современных машиностроительных технологий то, что в ряде конструкций эти сплавы могут быть использованы для создания новых технических решений, в т.ч. в космической технике, электронике и других отраслях.

Рассмотрены особенности технологии плавки и литья низколегированных сплавов меди, связанные с раскислением медного расплава при плавке: подборе оптимального раскислителя, как правило, диффузионного, который не снижает проводимость медного сплава. На основе поведенного анализа сформирована программа экспериментальных исследований.

Во второй главе проведена разработка составов литейных низколегированных сплавов меди. Рассмотрены вопросы технологичности литейных низколегированных сплавов. Отмечено, что к технологическим свойствам литейных низколегированных сплавов следует отнести: горячеломкость, свариваемость, жидкотекучесть, склонность к пленообразованию, величины линейной и объемной усадок с учетом характера распределения усадочной рассредоточенной пористости или образования раковины. Причем отмечается, что перспективными следует признать сплавы на основе системы медь – железо с легирующими добавками, которые обеспечивают возможность получения достаточно высокой электропроводности при достижении более высоких показателей прочностных характеристик. Дисперсионно-твердеющие сплавы системы медь – железо характеризуются как материалы с высокими показателями тепло- и электропроводности и могут являться конкурентами хромовых бронз. Автором предложены низколегированные сплавы меди с минимальной до 0,1 % и промежуточной до 1 % массовой долей железа, которые могут применяться в электротехнике вместо меди марки М1, и сплавы специального назначения с высоким содержанием железа (более 2%), которые предполагается применять для заготовок с хорошими антифрикционными свойствами при сохранении высокой электропроводности. Проведена критериальная оценка медного угла неравновесной диаграммы состояния, расчеты темпа кристаллизации низколегированного сплава медь – железо с содержанием Fe 1...2,6 % (по массе), которые показали высокую технологичность сплавов меди с железом для выпуска фасонных отливок.

Третья глава рассматривает особенности плавки низколегированных сплавов на основе меди. Отмечено, что при решении задачи по легированию меди, в первую очередь, стоит вопрос взаимодействия медного расплава с кислородом при этом практически все современные низколегированные сплавы на медной основе ориентированы и производятся в условиях открытой металлургической плавки. Этот фактор весьма существенен, так как ряд новых сплавов, содержащих в качестве основных легирующих добавок элементы с высокой химической активностью, разрабатывались в условиях опытных плавки в защитной атмосфере или в вакууме. Одним из наиболее перспективных низколегированных сплавов на основе меди для получения фасонных отливок, обладающих достаточно высокими литейно-технологическими и механическими свойствами, являются низколегированные сплавы системы Cu – Fe с добавками P, Sn, Zn. Исследования технологических режимов плавки сплавов системы Cu – Fe проводились в индукционных высокочастотных печах. Технологические режимы плавки низколегированных сплавов меди с железом отработывались на основе теории физико-химических процессов. Установлено, что при содержании железа в меди 0,01...0,1 % содержание кислорода в меди находится на уровне допустимом для получения отливок. При более высоких содержаниях железа, которое необходимо растворить в медном расплаве (выше 0,1 %) необходимо проведение операции раскисления расплава элементами с более высоким сродством к кислороду. Опытным путем установлена

длительность диффузионного раскисления меди углеродсодержащими материалами (коксик, графитовая крошка) до искомых значений может быть достигнута за 10...15 мин, для выплавки сплавов медь – железо.

В четвертой главе проведены комплексные исследования литейно-технологических и свойств сплавов, легированных добавками олова, кремния, никеля и железа, которые ранее были оценены, как перспективные для получения фасонных отливок. Установлено, что небольшое влияние на снижение линейной усадки меди, легированием ее никелем и железом обусловлено наличием небольшого интервала кристаллизации этих сплавов и близкими значениями коэффициентов термического сжатия к меди этих элементов. Легирование железом практически не изменяет величину объемной усадки. При этом одновременно не изменяется и объем концентрированной усадки. Медь, легированная железом, не склонна к образованию рассеянной пористости. При увеличении концентрации железа до 1% рассеянная пористость не изменяется и близка к нулю. Установлено, что для изготовления герметичных отливок с высокой гидропрочностью возможно применение низколегированных сплавов меди, содержащих до 1 % (по массе) железа и никеля. Легирование меди добавками железа, кремния и никеля в пределах 1 % (по массе) положительно влияет на горячеломкость сплавов. Такие 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). Легирование меди железом и никелем в пределах 1 % (по массе) несколько повышает температуру пленообразования на расплаве меди. Электропроводность меди при легировании железом и оловом до 0,5% соответствует показанию в 80% от электропроводности технически чистой меди. Показано, что 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 разработка составов низколегированных сплавов меди с железом, оценка литейных и технологических свойств низколегированных сплавов меди и железа для фасонного литья. В результате проведенных исследований предложено четыре сплава меди с различным содержанием легирующих компонентов. Отработка технологических режимов плавки сплавов меди с железом реализовывалась с учетом специфики физико-химических процессов из-за различия физико-химических свойств образующихся продуктов окисления, которые затрудняют последующее рафинирование меди и сплавов. Предложен состав двухкомпонентного сплава медь – железо с содержанием последнего в пределах 2,6...2,85 %. Сплав и способ плавки защищены патентом на изобретение. Проведена разработка режимов термической обработки сплава по двум режимам ТО: термическому отжигу и закалке (при фиксированной температуре) со старением при различных температурах, которые позволяют измельчить включения железа в растворе и стабилизировать уровень прочностных и эксплуатационных свойств сплава медь – 2,6...2,85 % железо. Кроме того, проводилась отработка режимов повторного переплава, которая показала возможность многократного использования в качестве шихтовых материалов сплавов меди с железом.

В шестой главе проведена разработка технологии получения фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом. Рассмотрены основные и вновь возникающие области машиностроения с целью применением низколегированных сплавов меди. Основные: железнодорожный транспорт (двигательные системы на

электрической тяге), судостроение, тяжелое машиностроение и автомобильная промышленность. Перспективные области применения: использование медных деталей в силовой электронике, в цепях с большой силой тока и в системах терморегуляции, а также в системах зарядки аккумуляторных батарей электромобилей. Проведено моделирование процессов изготовления отливок из низколегированных медных сплавов на основе медь – железо с использованием программного обеспечения ProCAST: в кокиль на примере отливки для высоковольтной арматуры и способом литья по выплавляемым моделям на примере отливки токосъемного элемента. Проведена отработка технологических режимов литья ЛКД. Исследовали влияние механического давления на условия затвердевания и охлаждения, кинетику уплотнения при затвердевании отливок типа стакана. Отливки с наружным диаметром 60 мм, высотой 60 мм и толщиной стенки 20 мм изготавливали в условиях пуансонного и поршневого прессования. В результате проведенных исследований предложены технологические режимы изготовления отливок из низколегированных сплавов меди с железом. Для этого применяется пуансонно-поршневая технология прессования. Такая технология позволяет повысить прочностные свойства сплава при увеличении электропроводности и антифрикционных свойств. Кроме того, в главе изложены результаты промышленных испытаний.

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 и практическая значимость

Уточнен механизм влияния физико-химических воздействий легирующих элементов, определяемый критериями:

- растворимости;
- распределения;
- термообработки;
- пористости;
- жидкотекучести

характерными для неравновесной кристаллизации низколегированных медных сплавов.

Впервые установлены критерии неравновесной кристаллизации, системы медь – железо в интервале перитектического превращения, которые позволили разработать составы низколегированных сплавов меди с железом для реализации технологий производства фасонных отливок.

Выявлены предельно допустимые значения содержания кислорода в меди перед введением в расплав легирующих элементов в системе Cu – O, которая относится к системам с отрицательным отклонением от закона Генри, при температуре плавления. Определены значения совместного присутствия железа и фосфора в расплаве меди, при которых содержание кислорода может быть ограничена 0,01 % (по массе), позволяющие получать бездефектные отливки.

Сравнительным анализом автором выявлены и предложены технологические 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.

На основе разработанных автором теоретических рекомендаций и полученных экспериментальных данных разработан и внедрен технологический регламент изготовления компенсаторов из низколегированного сплава медь – железо способом литья с кристаллизацией под давлением в «НПО Гидравлика» (п. Новый Быт), технологический процесс производства корпусных отливок из низколегированного сплава медь – железо в песчаные формы на лигносульфонатном связующем в ООО «Лугасталь» (ЛНР).

Вместе с тем по диссертации имеются **следующие замечания:**

1. В главе 2 приводятся составы низколегированных сплавов с различным содержанием железа от десятых долей процента и практически до 3 %. В этой связи, представляется целесообразным классифицировать сплавы меди с железом с низким, средним и высоким содержанием железа с регламентированным количественным содержанием и соответствующей областью применения отливок.

2. Автором уделено не достаточное внимание экономической стороне применения сплавов меди и железа, в частности применение для легирования меди армо железо существенно увеличивает себестоимость сплава. В работе не рассматривается возможность применения для легирования, например, низкоуглеродистой стали, используемой для изготовления крепежных изделий.

3. В работе не изучены перспективы применения других легирующих элементов (олова, кремния) для создания специальных низколегированных медных сплавов.

4. Не рассмотрена возможность легирования меди железом в более существенных количествах, например, до 4 %, для разработки спецсплавов под пластическую деформацию.

5. Вызывают вопросы использование устаревших и неточных методик при исследовании литейных свойств, в частности исследование линейной и объёмной усадки и жидкотекучести, что снижает достоверность полученных результатов.

6. В работе рассматривается только система Cu-Fe. Считаю необходимым рассмотреть и сопоставить системы Cu-Ni, Cu-Cr, Cu-Fe-Ni (возможно и другие).

7. В работе не рассмотрены известные способы улучшения технологических свойств, путем введения микродобавок в расплав.

Заключение

Не смотря на высказанные замечания считаем, что диссертационная работа Семенова Константина Геннадьевича имеет научную и высокую практическую значимость.

Диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научно-техническая задача, имеющая важное хозяйственное значение для разных отраслей экономики (например, электротехники, специальные области машиностроения и др.), связанное с производством фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом.

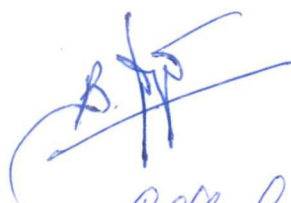
Представленная диссертация отвечает критериям, изложенным в п.9-14 «Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 N 335, а ее автор, Семенов Константин Геннадьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.3 – «Литейное производство».

Отзыв составлен канд. техн. наук, заведующим лабораторией литейных процессов Нуралиевым Фейзуллой Алибала оглы и ведущим научным сотрудником Кафтанниковым Александром Сергеевичем.

Диссертационная работа рассмотрена на заседании Научно-технического совета Института Metallургии и Машиностроения АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Протокол НТС № 10 от 31.08.2023 г. Присутствовало 23 человека из 33. Итоги голосования: за – 23, против – 0, воздержалось – 0.

Результаты работы рекомендуются к широкому промышленному внедрению на литейных производствах машиностроительных предприятий.

Председатель НТС ИМиМ
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»,
докт.техн.наук, проф. лауреат ГП СССР,
премии Правительства РФ



В.С. Дуб

Ученый секретарь НТС ИМиМ



М.С. Соловьева

Акционерное общество «Научно производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)
115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4.
Тел. +7 (495) 675-83-02, факс: +7 (495) 674-21-96
e-mail: cniitmash@cniitmash.com