

## О Т З Ы В

**официального оппонента на диссертацию Семенова Константина Геннадьевича «Развитие научных основ производства фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.3 – Литейное производство**

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

В настоящее время медь широко используется во многих отраслях промышленности для изготовления деталей в электротехнике, электронике, теплообменных устройствах и др. благодаря высокой электро- и теплопроводности. Однако чистая медь обладает невысокими механическими свойствами и износостойкостью, что не позволяет использовать ее в качестве материала нагруженных деталей, том числе работающих в условиях износа и повышенных температур. Для повышения механических и эксплуатационных свойств медь легируют различными химическими элементами: Cr, Zr, Cd, Mg, Sn, Ag и др. При этом большинство низколегированных медных сплавов являются деформируемыми и используются для изготовления полуфабрикатов, заготовок и деталей методами обработки металлов давлением. Это накладывает ограничения на размеры, конструкцию и конфигурацию деталей и для получения сложных и габаритных изделий требует применения сварки или сборочных операций. Низколегированные деформируемые медные сплавы, как правило, обладают низкими литейными свойствами и их использование для изготовления фасонных отливок крайне затруднительно. Кроме того, эти сплавы содержат в своем составе дорогостоящие и дефицитные компоненты, которые часто затруднительно вводить в расплав меди при выплавке сплавов ввиду их высокого сродства к кислороду и низкой температуры кипения. В связи с этим возникает необходимость разработки новых литейных сплавов на основе меди для перспективных образцов техники, в том числе специального назначения, обладающих высокими технологическими, механическими и эксплуатационными свойствами и не содержащих дорогостоящих и дефицитных компонентов. Поэтому диссертационная работа Семенова К.Г., направленная на разработку новых литейных низколегированных медных сплавов с высоким уровнем механических и эксплуатационных свойств, а также технологии их выплавки и литья на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований, является актуальной. Кроме того, актуальность темы диссертационной работы подтверждается ее выполнением в рамках ряда научных грантов Минобрнауки РФ.

**Анализ содержания диссертации.** Диссертационная работа Семенова К.Г. состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 221 цитируемого



источника. Работа изложена на 337 страницах, включая 127 рисунков, 31 таблицу и 8 приложений.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель, задачи исследования и методы их решения, показана научная новизна и практическая ценность, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены апробация работы на научных конференциях, публикации и личный вклад соискателя, описано содержание и объем диссертации.

**Первая глава** посвящена анализу экспериментальных и теоретических работ, касающихся принципов выбора легирующих элементов для меди и разработки перспективных низколегированных медных сплавов различного назначения. Приводятся сведения о влиянии примесей и легирующих элементов на механические, эксплуатационные и технологические свойства меди. Дается классификация малолегированных медных сплавов в зависимости от их свойств, механизма упрочнения и назначения. Показано, что большинство низколегированных медных сплавов относится к группе деформируемых, поэтому остро стоит проблема разработки перспективных экономнолегированных литейных медных сплавов для изготовления литых деталей ответственного назначения, а также технологии их выплавки и получения отливок различными способами литья. Автором проанализированы особенности поведения расплава меди при плавке в присутствии различных химических элементов и растворенных газов. Кроме того, проведен анализ технологических особенностей получения отливок из низколегированных медных сплавов различными способами литья. В качестве научной основы для обоснования выбора химического состава низколегированных литейных медных сплавов автором были выбраны положения теории критериальной оценки начальных областей диаграмм состояния системы «основа сплава – легирующий компонент» Гуляева Б.Б. На основании литературного обзора сформулирована цель диссертационного исследования, для ее достижения автором поставлены конкретные научные и практические задачи.

**Вторая глава** посвящена разработке составов литейных низколегированных медных сплавов. Для определения оптимального состава сплавов систем Cu-Sn-Zn-Pb и Cu-Cr-V был использован метод планируемого эксперимента. В качестве функций отклика были приняты литейные свойства сплавов (жидкотекучесть, объемная и линейная усадка), электропроводность, удельное электрическое сопротивление, временное сопротивление разрушению при растяжении, относительное удлинение и твердость. Однако наиболее перспективными, по мнению автора, являются литейные низколегированные медные сплавы на основе системы Cu-Fe с добавками дополнительных легирующих компонентов. Эти сплавы могут использоваться в качестве электротехнических взамен меди, так как обладают достаточным уровнем электропроводности и высоким уровнем механических и антифрикционных свойств. Разработка составов сплавов на основе системы медь-железо проводилась с использованием критериальной оценки



диаграммы состояния Cu-Fe согласно теории Б.Б. Гуляева, которая позволяет прогнозировать свойства сплавов. В результате автором рекомендовано использовать сплавы с содержанием железа в диапазоне от 0,1 до 2,6 мас. %.

В **третьей главе** рассмотрены физико-химические процессы, происходящие при плавке низколегированных сплавов системы медь-железо. Показано, что при введении в расплав меди легирующих элементов необходимо учитывать присутствие растворенного кислорода, который может взаимодействовать с вводимым компонентом и приводить к образованию нежелательных неметаллических включений в форме оксидов, а также снижению степени усвоения легирующего элемента. Выполнен анализ термодинамики растворения кислорода в жидкой меди. Установлено, что во всем диапазоне содержаний кислорода его растворы в жидкой меди подчиняются закону Генри. Определено допустимое значение содержания кислорода перед введением в расплав легирующих элементов при выплавке низколегированных медных сплавов открытым способом, которое должно составлять 0,001...0,01 мас. %. Однако для низколегированных сплавов Cu-Fe достаточно обеспечить в расплаве меди содержание кислорода 0,008...0,01 мас. %. Этого можно добиться использованием растворимых раскислителей (например, фосфора) или поверхностных (углеродсодержащих материалов). На основании расчетов кинетики диффузионного раскисления автором рекомендовано поверхностное раскисление расплава меди перед введением железа при помощи мелкодисперсной графитовой крошки или коксика в течение 10...15 минут.

В **четвертой главе** приводятся результаты комплексного исследования влияния легирующих элементов (Fe, Sn, Si, Ni) в малолегированных сплавах на основе меди на литейные и эксплуатационные свойства. Установлено, что легирование меди железом в количестве до 0,3 мас. % повышает ее жидкотекучесть примерно на 80 мм. Дальнейшее увеличение содержания железа до 1 мас. % приводит к снижению жидкотекучести до уровня нелегированной меди. Добавление других рассмотренных элементов в количестве до 1 мас. % приводит к существенному снижению жидкотекучести меди. Все перечисленные элементы приводят к некоторому снижению линейной усадки меди. При этом железо не влияет на образование рассеянной усадочной пористости и концентрированную усадку, а Sn, Si и Ni повышают долю рассеянной усадочной пористости в отливках. Результаты исследования гидропрочности модельных отливок из низколегированных медных сплавов свидетельствуют о том, что легирование меди железом и никелем позволяет обеспечить стабильно высокую гидропрочность отливок, которые могут выдерживать давление до 3 МПа. Это связано с формированием в сечении отливки зон с мелкозернистой структурой и уменьшением размеров столбчатых зерен при введении железа и никеля в медь. Установлено, что введение в медь железа и никеля повышает температуру пленообразования, в то время как олово и кремний практически не оказывают



влияние на этот показатель. Показано, что наибольшее влияние на электропроводность меди оказывает кремний. Так при содержании кремния 0,6 мас. % электропроводность сплава составляет 35% от электропроводности меди. Введение никеля, железа и олова в медь в количестве до 1 мас. % позволяет обеспечить электропроводность сплава на уровне 70...80% от электропроводности меди. Таким образом, низколегированные сплавы меди с железом и никелем могут быть рекомендованы для изготовления отливок электротехнического назначения с высокими показателями герметичности.

**Пятая глава** посвящена разработке составов литейных низколегированных сплавов на основе системы медь-железо, а также технологии их выплавки и термической обработки. В результате проведенных экспериментов предложены составы сплавов Cu-Fe, Cu-Fe-P и Cu-Fe-P-Zn. Перед введением в расплав легирующих элементов с целью снижения содержания кислорода в расплаве меди и повышения степени усвоения легирующих элементов автором предложено проведение поверхностного раскисления с использованием мелкодисперсных углеродсодержащих материалов. При этом разработанная технология выплавки низколегированных сплавов позволяет использовать в качестве шихты отходов и лома меди с повышенным содержанием железа. При этом для разжижения шлака и окончательного раскисления меди рекомендовано вводить в сплав фосфор в количестве до 0,1 мас. %. Установлено, что для обеспечения стабильности механических свойств и повышения их уровня для сплава с содержанием железа 2,6...2,8 мас. % необходимо проведение термической обработки. По результатам проведенного исследования автором рекомендован режим термической обработки сплава, включающий закалку с температуры 1030°C и последующее старение при температуре 500°C в течение 1...2 часов. При этом существенно повышаются прочностные характеристики сплава на фоне незначительного снижения пластичности и обеспечивается электропроводность на уровне 60% от электропроводности меди. Исследование износостойкости низколегированного сплава меди и 2,65 мас. % железа показало, что данный сплав в паре трения со сталью демонстрирует более высокую износостойкость по сравнению с бронзами марок БрО5Ц5С5, БрО10Ф1 и БрА9Ж4 и может использоваться как замена этих сплавов.

**В шестой главе** разработана технология изготовления фасонных отливок из низколегированных сплавов на основе системы медь-железо. Анализ процесса формирования отливок электротехнического назначения при литье в кокиль и по выплавляемым моделям с помощью системы компьютерного моделирования ProCast показал, что применение низколегированных литейных сплавов системы медь-железо позволяет снизить долю рассеянной усадочной пористости в отливках по сравнению с отливками из меди. Предложенная технология была апробирована и рекомендована к внедрению на промышленных предприятиях. Так, на ГУП ЛНР «Лутугинский научно-производственный валковый комбинат» литьем в кокиль



изготовлена опытная партия литых деталей высоковольтной арматуры. На НПЦ «Трансмаш» (г. Луганск) литьем по выплавляемым моделям изготовлена опытная партия литых токосъемных элементов. Кроме того, на основе результатов исследования влияния технологических параметров литья с кристаллизацией под давлением разработана технология изготовления токопроводящих элементов и антифрикционных деталей методом пуансонно-поршневого прессования. Установлено, что температура прессформы должна быть не ниже 200°C, температура заливки сплава 1220...1240°C, давление прессования не ниже 180...200 МПа. Такие параметры обеспечивают высокие прочностные свойства, электропроводность и антифрикционные характеристики деталей. Промышленная апробация технологии изготовления компенсаторов торцевого уплотнения высоконагруженных насосов из сплава Cu-2,65 мас. % Fe проводилась на НПО «Гидравлика» (п. Новый Быт Московской обл.). Испытания собранных насосов показали, что предлагаемый сплав может быть использован в качестве замены бронзы БрА9Ж4 и обеспечивает увеличение срока службы насосов на 25...30%.

Завершается работа **заключением**, содержащим основные выводы по результатам диссертационного исследования.

**Степень достоверности** результатов исследования, обоснованность сформулированных в работе выводов и положений, выносимых на защиту, обеспечена использованием современных методик исследования, в том числе аттестованного научного и испытательного оборудования и методов исследования, статистических методов обработки и анализа результатов экспериментов, воспроизводимостью и согласованностью данных. Научные положения, выводы и рекомендации соответствуют цели и задачам диссертационного исследования.

По теме диссертации опубликовано 68 печатных работ, из них 3 монографии, 42 публикации в научных журналах из перечня ВАК, 8 статей в изданиях, входящих в международные библиографические базы данных цитирования Web of Science и Scopus, 5 патентов на изобретения, полезные модели, свидетельства на базы данных и программы для ЭВМ. Уровень апробации результатов работы соответствует требованиям ВАК РФ.

Результаты работы, выполненной автором, позволили ему сформулировать **положения, обладающие научной новизной**.

В частности, уточнен механизм влияния легирующих элементов на свойства низколегированных сплавов на основе меди при неравновесной кристаллизации, который определяется критериями растворимости, распределения, термообработки, пористости и жидкотекучести. Определены критерии неравновесной кристаллизации низколегированных сплавов системы Cu-Fe в интервале перитектического превращения, которые позволили обосновать составы литейных низколегированных медных сплавов. Установлены и обоснованы допустимые значения содержания кислорода в расплаве меди перед введением легирующих элементов. Установлено, что в сплавах системы Cu-Fe кислород



находится в связанном виде в составе инертного оксида железа  $Fe_3O_4$  и при раскислении расплава фосфором образуется соединение  $Fe_3P$ , включения которого инертны и практически не оказывают влияния на удельное электросопротивление меди. Предложены критерии диффузионного раскисления расплава меди перед вводом железа углеродсодержащими материалами, применение которых обеспечивает снижение содержания кислорода до 0,008...0,01 мас. %. Установлено, что при пуансонно-поршневом прессовании при литье с кристаллизацией под давлением изменяется характер процесса затвердевания отливки, происходит смещение образования усадочной пористости в нижнюю часть отливки и при увеличении давления прессования до 250 МПа происходит полное устранение пористости в отливках из сплавов Cu-Fe.

**Практическая значимость** диссертации обусловлена тем, что на основе полученных результатов исследования предложена технология изготовления фасонных отливок из низколегированных литейных медных сплавов. Предложенные технологические решения приняты к внедрению: способ выплавки низколегированных сплавов системы Cu-Fe, технология изготовления фасонных отливок методом литья в песчаные формы, в кокиль, по выплавляемым моделям и литьем с кристаллизацией под давлением. Предлагаемые технологические решения были апробированы и внедрены на ряде промышленных предприятий: НПЦ «Трансмаш» (ЛНР), ГУП ЛНР «Лутугинский научно-производственный валковый комбинат», ООО «Лугасталь» (ЛНР), НПО «Гидравлика» (п. Новый Быт Московской обл.), что подтверждается соответствующими актами.

### **Замечания и вопросы по работе:**

1. На с. 79 автор пишет, что «все образцы имели чистую и ровную поверхность красно-желтого цвета, что указывает на глубокое раскисление металла». Не ясно, каким образом по цвету поверхности образца можно судить о содержании кислорода в металле?

2. Не ясно, почему для получения фасонных отливок из сплавов системы Cu-Cr-B рекомендуются смеси именно на лигносульфонатном связующем? Возможно ли применение других формовочных смесей?

3. Из диссертации не ясно, каким образом темп кристаллизации сплава влияет на возможность его дисперсионного упрочнения при термической обработке?

4. Не ясно, на основании чего автор установил, что для диффузионного раскисления расплава меди углеродсодержащими материалами при выплавке сплавов системы Cu-Fe необходимо время 10...15 мин? Результаты исследования влияния времени обработки расплава меди углеродсодержащими материалами на содержание кислорода в работе не приведены.



5. Не ясно, почему присутствие кислорода в меди приводит к снижению ее жидкотекучести (с. 131)?

6. На с. 135 автор утверждает, что при легировании меди кремнием и оловом замедляется темп изменения усадки в начальный период охлаждения. Однако результатов исследования зависимости усадки сплавов от температуры не приводится.

7. Автор предлагает исключить образование плен на поверхности расплава при помощи флюсов (с. 153). Не ясно, какие флюсы необходимо для этого использовать?

8. На рис. 5.2. (с. 157) приведена зависимость жидкотекучести меди от содержания железа. С чем связан рост жидкотекучести меди до содержания железа в ней 0,3 мас. % и последующее снижение жидкотекучести при содержании железа более 0,3 мас. %?

9. Из диссертации не ясно, как влияет содержание железа в сплаве и параметры термической обработки на износостойкость сплава?

10. Не ясно, каким образом назначались технологические и теплофизические параметры при моделировании процесса затвердевания отливок в компьютерной системе ProCast?

11. Не ясно, о каком эвтектическом превращении в меди говорит автор (с. 224 и 232)? Появление горизонтальной площадки на кривых охлаждения, скорее всего, связано с выделением скрытой теплоты кристаллизации.

12. К сожалению, в тексте диссертации встречаются ошибки и неудачные выражения. Например, на с. 74 «деформированной группой сплавов»; на с. 84 «оптимальные составы этих систем производилось методом»; на с. 96 «вместе с там»; на с. 105 «жидкую катодную медь»; на с. 163 «фасонных отливки»; на с. 212 «двигателей на электрическом приводе» и др. Встречаются повторы в тексте диссертации.

**Заключение.** Указанные замечания не снижают теоретическую и практическую значимость диссертационной работы Семенова К.Г., выполненной на актуальную тему. Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение важной в области литейного производства проблемы разработки составов новых литейных малолегированных медных сплавов и технологии изготовления фасонных отливок из этих сплавов, что вносит значительный вклад в развитие высокотехнологичных отраслей промышленности и повышение обороноспособности страны. Результаты, представленные автором, обладают научной новизной и практической значимостью, их достоверность не вызывает сомнений. Эффективность результатов теоретических и экспериментальных исследований подтверждается опытными испытаниями и внедрением предлагаемых технологических решений на ряде промышленных предприятий, а также патентами РФ.



Диссертационная работа и автореферат находятся в полном соответствии и по содержанию отвечают паспорту специальности 2.6.3 – Литейное производство. Опубликованные работы автора, в том числе в рецензируемых изданиях, определенных ВАК, и автореферат достаточно полно отражают содержание работы.

В целом представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 21.04.2016 г. №335, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Семенов Константин Геннадьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.3 – Литейное производство.

Я, Сулицин Андрей Владимирович, даю свое согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Семенова Константина Геннадьевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
доцент, заведующий кафедрой  
«Литейное производство и  
упрочняющие технологии»

Сулицин  
Андрей Владимирович

08.09.2023 г.

Подпись  
заверяю

ДОКУМЕНТОВЕД УДИОВ  
ГАФУРОВА А. А.



620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
Имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Тел. (343) 375-44-76. E-mail: a.v.sulitsin@urfu.ru