

На правах рукописи



СЕМЕНОВ Константин Геннадьевич

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ПРОИЗВОДСТВА
ФАСОННЫХ ОТЛИВОК ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ
СПЛАВОВ МЕДИ С ЖЕЛЕЗОМ**

2.6.3 – Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Нижний Новгород – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный консультант: доктор технических наук, доцент **Батышев Константин Александрович**

Официальные оппоненты:

Ри Эрнст Хосенович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», заведующий кафедрой «Литейное производство и технология металлов», г. Хабаровск;

Белов Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор кафедры «Обработка металлов давлением», г. Москва;

Сулицин Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой «Литейное производство и упрочняющие технологии», г. Екатеринбург.

Ведущая организация:

Государственный научный центр РФ Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения», г. Москва.

Защита состоится «29» сентября 2023 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета Д 24.2.345.03 на базе ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет» им. Р.Е. Алексеева, по адресу: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, корп. 1, ауд. 1313.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», <https://www.nntu.ru/structure/view/podrazdeleniya/fpsvk/obyavleniya-o-zashhitah>

Автореферат разослан

« ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Нуждина Татьяна Валентиновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Медь часто называют «новым золотом», «новой нефтью» или даже «металлом будущего» из-за ее незаменимой роли в низкоуглеродной экономике и высокотехнологичных отраслях. По данным Международного энергетического агентства к 2040 г. среди металлов, используемых в экологически чистых энергетических технологиях, будет доминировать медь. К 2040 г. спрос на медь вырастет в 2,7 раза по сравнению с 2020 г. Этот металл будет иметь решающее значение для возобновляемой энергетики и современных технологий машиностроения.

Технически чистая медь остается основным токопроводящим материалом в электротехнике и новых технологиях. При этом до 70% чистой меди потребляется для изготовления токопроводящих элементов. Основные недостатки конструкций из технической чистой меди (провода, кабели, токопроводящие детали и др.) – низкие механические и эксплуатационные свойства, а также интенсивное окисление (образование оксидов меди), что приводит к заметным потерям металла.

Низколегированные сплавы меди – это сплавы с содержанием легирующих компонентов в сумме от 2,5 до 5% (по разным источникам). Микролегирование позволяет сохранить главные технологические свойства основы сплава меди: тепло- и электропроводность при значительном увеличении механических и эксплуатационных характеристик сплава, что открывает возможности его использования для разработки новых решений в технологиях машиностроения.

Разработка низколегированных сплавов, которая ведется достаточно давно, расширяет технические возможности использования меди для изготовления высокотехнологичных отливок и заготовок. В настоящее время известно более 1000 низколегированных медных сплавов. Однако в отечественной промышленности используются лишь десятки низколегированных сплавов на основе меди, как правило, деформируемых.

Для современного машиностроения требуется разработка литейных сплавов на основе меди; с высокой электрической проводимостью в сочетании с повышенными механическими свойствами. Традиционные литейные сплавы на основе меди остаются востребованными до настоящего времени там, где требуются специальные эксплуатационные параметры (антимагнитность, коррозионная стойкость и др.). Эти сплавы для ряда современных технологий не всегда могут обеспечить высокие электро- и теплопроводность. В этой связи у нас в стране и за рубежом постоянно проводятся работы по созданию низколегированных сплавов меди с определенным сочетанием легирующих компонентов, удовлетворяющих требованиям конструкторов и технологов.

В связи с этим, для совершенствования технологии производства фасонных отливок из низколегированных медных сплавов, в качестве замены отливок из технической чистой меди, необходимо проведение комплексного исследования, направленного на синтез литейных низколегированных сплавов, разработку технологии плавки, получения отливок различными способами литейных технологий. Такие исследования, в отличие от работ, направленных на литье слитков и реализацию технологий пластической деформации, в нашей стране проводились впервые.

Работа выполнена в рамках исследований, включенных в следующие отраслевые, научно-исследовательские программы и по Грантам Минобрнауки РФ:

- НИР Минобрнауки РФ по теме АЛ-Г1-92 «Разработка, исследование и создание технологии получения легированных медных сплавов на базе лома, отходов и комплексных лигатур»;
- НИР Минобрнауки РФ по теме АЛ-Г1-97 «Теоретическое обоснование технологии использования загрязненных отходов меди, образующихся в черной металлургии»;
- НИР по Гранту АП-Гр3-98 Минобрнауки РФ по теме «Теоретические основы синтеза низколегированных медных сплавов стойких против окисления»;

- НИР по Гранту ТОО-6.2-603 Минобрнауки РФ «Теория и технология синтеза низколегированных сплавов на основе меди для машиностроения и новых технологий».

Объект исследования. Процессы производства фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом.

Предметы исследования. Теоретическое обоснование технологических процессов подготовки расплава, исследования литейных свойств, разработка алгоритмов и моделирования процессов изготовления фасонных отливок различными способами литейных технологий; разработка режимов термообработки из низколегированных сплавов меди с железом.

Степень разработанности темы исследования.

За последние годы основными объектами создания 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 одновременно высокие электро-, теплопроводность и повышенная жаропрочность. Эти сплавы, как правило, используют для изготовления заготовок под пластическую деформацию, и в меньшей степени – отливок. Такие сплавы имеют ряд недостатков, в частности, невысокие литейные свойства, склонны к пленообразованию, а наиболее высокие свойства у них реализуются при термопластической деформации.

Изучением особенностей низколегированных сплавов на основе меди и технологий их производства в нашей стране с 1970-х гг. занимались многие отечественные ученые: А.К. Николаев, В.М. Розенберг, А.И. Новиков, В.Я. Берент, В.М. Чурсин, С.А. Гнездилов, Г.И. Тимофеев, В.В. Марков, О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров, Л.А. Ватрушин, В.Г. Осинцев и др. За рубежом разработано несколько стандартов (DIN, ASTM) по производству полуфабрикатов из низколегированных медных сплавов. Однако в России практически отсутствуют разработки литейных низколегированных сплавов меди, а также не освоено промышленное производство этих сплавов, которые обладают более высокими прочностными и эксплуатационными свойствами по сравнению с деталями из технической чистой меди марки М0/1. Между тем дисперсионно-твердеющие сплавы меди с железом имеют также ряд технологических и экономических преимуществ по сравнению с хромовыми и хромциркониевыми бронзами. Для их изготовления возможно использование меди промышленной чистоты, т.е. допускается более высокое исходное содержание кислорода, что открывает возможность получения фасонных отливок.

Сплавы медь–железо характеризуются как материалы с высокими показателями электропроводности, а низколегированные сплавы с железом (дисперсионно-твердеющие сплавы), могут быть рекомендованы для производства фасонных отливок, в том числе как конкуренты хромциркониевых бронз, так как стоимость железа значительно ниже стоимости других известных легирующих компонентов. При этом, можно отметить недостаточную сформированность научных положений для реализации промышленного производства фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом, что ограничивает их применение на практике в литейных цехах.

Цель работы. Создание условий для реализации процессов промышленного производства отливок из низколегированных сплавов меди с железом.

Задачи исследования.

1. Выполнить системный анализ влияния легирующих элементов на свойства меди в целях разработки литейных низколегированных медных сплавов.
2. Провести физико-химические и термодинамические исследования металлургических процессов плавки низколегированных сплавов меди, легированной железом.
3. Провести комплексные исследования литейных свойств меди, легированной перспективными легирующими элементами, в целях получения фасонных отливок для технологий современного машиностроения.
4. Разработать составы литейных низколегированных сплавов меди с железом и технологию плавки и литья.

5. Разработать режимы термообработки низколегированных сплавов меди с железом для повышения механических, электротехнических и эксплуатационных свойств фасонных отливок.

6. Разработать технологию повторного технологического переплава низколегированных сплавов меди с железом на основе образующегося технологического возврата.

7. Исследовать антифрикционные свойства низколегированных сплавов меди с железом для расширения технологических возможностей применения.

8. Выполнить математическое моделирование процессов изготовления фасонных отливок из низколегированных сплавов меди с железом для реализации технологии литья различными способами: по выплавляемым моделям (ЛВМ), литья в кокиль, литья с кристаллизацией под давлением (ЛКД).

9. На основании результатов выполненных исследований разработать технологические режимы изготовления отливок способом ЛКД из низколегированных сплавов меди с железом.

10. Оценить экономическую эффективность и экологическую безопасность применения предлагаемых разработок в действующем производстве.

Научная новизна.

1. Разработана теоретическая модель структурной матрицы литейных низколегированных медных сплавов. Уточнен механизм влияния физико-химических воздействий легирующих элементов, определяемый критериями растворимости, распределения, термообработки, пористости и жидкотекучести, характерными для неравновесной кристаллизации в низколегированных сплавах на основе меди.

2. Разработана теоретическая модель неравновесной кристаллизации системы медь–железо в интервале перитектического превращения, на основе которой установлены параметры кристаллизации сплава (температурный интервал, концентрационный интервал кристаллизации, коэффициент распределения). Критериальная оценка указывает на релевантность синтеза литейных сплавов меди с железом.

3. Впервые установлены предельно допустимые значения содержания кислорода в меди перед введением в расплав легирующих элементов, так как система Cu–O при температуре плавления относится к системам с отрицательным отклонением от закона Генри, а кислород более активен к соединению с любым легирующим элементом в расплаве.

4. Показано, что при совместном присутствии железа (до 0,1 %) и фосфора в расплаве меди, содержание кислорода может быть ограничена значениями 0,001...0,01% (по массе). При более высоких содержаниях железа (выше 0,01 %) необходимо проводить раскисление расплава элементами с более высоким сродством к кислороду.

5. Установлено, что в двухкомпонентных сплавах меди с железом кислород находится в виде инертного химического соединения Fe_3O_4 . При раскислении расплава фосфором образуется фосфид железа Fe_3P , включения которого инертны и не оказывают существенного влияния на электропроводность меди.

6. Предложены критерии диффузионного раскисления меди графитосодержащими материалами перед введением в расплав железа, использование которых показало, что степень раскисления расплава может быть достигнута за 12...15 мин и ограничена содержанием кислорода 0,008...0,01 % (по массе).

7. Установлены аналитические зависимости процесса ЛКД из низколегированных сплавов меди с железом. Поршневое ЛКД прессование в сравнении с гравитационным кокильным литьем изменяет характер процесса затвердевания отливки и направление теплоотода в пуансон, что приводит к смещению зоны образования усадочной пористости в нижнюю часть отливки, которое с увеличением прилагаемого давления до 250 МПа приводит к устранению пористости.

Теоретическая значимость. Уточнен механизм влияния физико-химических воздействий легирующих элементов, определяемый критериями растворимости, распределения, термообработки, пористости и 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. Установлены 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. Установлено, что в сплавах меди с железом кислород находится в виде инертного химического соединения Fe_3O_4 , 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). При содержаниях железа более 0,1 % необходимо проведение операции раскисления расплава. Предложены критерии диффузионного раскисления расплава меди графитосодержащими материалами перед введением в расплав железа.

Практическая значимость. Решена научно-техническая задача по производству фасонных отливок из низколегированных сплавов на основе меди с железом. 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. Разработаны и внедрены: технологический регламент изготовления компенсаторов из низколегированного сплава медь–железо способом литья с кристаллизацией под давлением в «НПО Гидравлика» (п. Новый Быт), производство корпусных отливок из низколегированного сплава медь–железо в песчаные формы на лигносульфонатном связующем в ООО «Лугасталь» (ЛНР).

Предложены составы низколегированных сплавов меди с железом путем реализации различными способами литейных технологий, в том числе двухкомпонентного с содержанием железа 2,6...2,85%, которые предложены для замены фасонных отливок из технически чистой меди. Получены патент РФ на изобретение «Низколегированный сплав на основе меди и способ его плавки» и полезную модель «Шестеренный насос», разработаны три программы для ЭВМ.

Методология и методы исследования.

В основу методологии положены труды отечественных и зарубежных авторов в области металлургических процессов плавки, машиностроительных технологий, литейных процессов, металловедения, термической обработки меди и медных сплавов, триботехнического износа. При проведении работы использовали экспериментальные, аналитические, металлографические методы исследований, анализ и планирование экспериментов. Объектами экспериментальных исследований были технологические режимы плавки, опытные отливки и заготовки низколегированных сплавов на основе меди.

Для достижения поставленной цели и решения задач в рамках проведения диссертационной работы использовали следующие методы исследования: физико-механических свойств, металлографические, электронную микроскопию, рентгеноспектральный анализ химического состава, испытания по определению электропроводности, триботехнические испытания, испытания по определению механических свойств, моделирование процессов литья на основе системы компьютерного моделирования (СКМ) ProCAST.

На защиту выносятся:

1. Теоретическая модель структурной матрицы литейных низколегированных медных сплавов с уточнением механизма влияния физических воздействий легирующих элементов в низколегированных сплавах на основе меди.

2. Критериальная оценка сплавов системы меди с железом в интервале перитектического превращения с определением параметров кристаллизации сплава (температурного интервала,

концентрационного интервал кристаллизации, коэффициента распределения), определяющее их технологичность для синтеза литейных сплавов.

3. Результаты физико-химического анализа предельных значений растворимости кислорода в интервале температур плавления в системе медь–кислород при открытой плавке меди перед введением в расплав легирующих элементов.

4. Термодинамический анализ совместного влияния железа и фосфора на показатели растворимости кислорода в расплаве меди в целях определения необходимости проведения операции раскисления расплава.

5. Результаты исследования остаточного содержания кислорода и времени диффузионного раскисления расплава меди графитосодержащими материалами перед введением железа.

6. Анализ влияния микролегирования меди добавками железа, никеля, кремния и олова на литейно-технологические свойства меди для определения перспективных легирующих элементов при разработке литейных низколегированных сплавов.

7. Результаты исследований режимов термообработки сплавов меди с железом с учетом теории растворного упрочнения и реализации оптимального режима термообработки на основе термического отжига или закалки со старением.

8. Результаты исследований триботехнических свойств сплавов меди с железом для изготовления деталей трения, которые позволяют снизить показатели износа и приводят к увеличению работоспособности деталей пары трения сплава со сталью.

9. Результаты отработки термовременных режимов ЛКД под поршневым и пуансонном прессовании отливок из низколегированных сплавов меди с железом, по сравнению с гравитационным кокильным литьем, в целях устранения усадочной пористости отливок.

10. Технологические решения изготовления фасонных отливок на основе моделирования процессов литья СКМ ProCAST из низколегированных сплавов меди с железом различными способами литейных технологий.

Работа соответствует Паспорту научной специальности 2.6.3 – Литейное производство по следующим направлениям исследований по пунктам: **1, 2, 3, 5, 7, 17.**

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность экспериментальных данных, выводов и рекомендаций подтверждается использованием современных методик и методов исследования металлургических и литейных процессов. Для обработки и получения опытных данных использовались математические модели планирования экспериментов. Получены три свидетельства программ для ЭВМ, патенты на полезную модель, патент на изобретение. Предложенные технологические решения прошли апробацию «НПО Гидравлика» (п. Новый Быт) и ООО «ТД ВИПОМ» (г. Орел), ООО «Лугасталь» (ЛНР), ГУП ЛНР «Лутугинский научно-производственный валковый комбинат», НПЦ «Трансмаш» (ЛНР). Разработаны и внедрены технологический регламент изготовления компенсаторов из низколегированного сплава медь–железо способом литья с кристаллизацией под давлением в «НПО Гидравлика» (г. Чехов), производство корпусных отливок из низколегированного сплава медь–железо в песчаные формы на лигносульфонатном связующем в ООО «Лугасталь» (ЛНР).

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 30 конференциях, основные из которых: Международная научно-техническая конференция «Теория и практика литых композиционных материалов», посвященная 55-летию кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов», г. Владимир: ВлГТУ, 2018 г.; Международная научно-техническая конференция, посвященная 150-летию со дня рождения академика А.А. Байкова «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов», г. Курск, 2020 г.; Международная научно-техническая конференция МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, 2022 г. «Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении».

Личный вклад соискателя заключается в непосредственном участии в постановке цели и задач исследования, обработке и трактовке полученных результатов, апробировании и внедрении их в промышленных условиях, участии и руководстве при проведении всего комплекса исследований, формулировании выводов, подготовке научных публикаций.

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы представлены в 68 публикациях, в т.ч. трех монографиях; 42 публикаций в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ; восьми публикаций, индексируемых в Международных базах, перечень которых определен в соответствии с рекомендациями ВАК Минобрнауки РФ (Web of Science, Scopus); пяти патентах на изобретения, полезные модели; свидетельствах на базы данных и программы для ЭВМ.

Структура и объем 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

Введение

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

Глава 1. Состояние вопроса

В данной главе представлен обзор 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. Легирование меди некоторыми элементами позволяет повышать ее электропроводность до 110% проводимости технической чистой меди (сплавы Cu–Ag). Примеси, входящие в твердый раствор (P, As, Sn), снижают электропроводность меди. Вредными примесями, снижающими механические и технологические свойства меди и ее сплавов, являются Bi, Pb, S и O. Свинец и висмут мало растворимы в меди и образуют по границам зерен легкоплавкие эвтектики, что приводит к краснотекучести. Сера и кислород также нерастворимы в меди и образуют эвтектики.

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. Медь имеет низкие литейные свойства: большую линейную (2,1 %) и объемную (около 6,5 %) усадку, высокую склонность к газопоглощению и образованию трещин при затрудненной усадке, низкую жидкотекучесть.

Применение низколегированных медных сплавов обусловлено особенностями формирования химического состава: плавки, литья слитков и фасонных отливок, горячей и холодной деформации, термической обработки, технологии изготовления заготовок из этих сплавов (сварки, пайки, формообразования, гальваники и т.д.). В некоторых случаях низколегированные медные сплавы являются единственными материалами, обеспечивающими работоспособность изделий, что является необходимым условием создания продуктов новой техники.

Применение термомеханической обработки (для дисперсионно-твердеющих сплавов) – наиболее современный и перспективный путь синтеза новых эффективных сплавов. Для современных машиностроительных технологий стоит задача снизить металлоемкость,

повысить их надежность и долговечность. Развитие современных технологий машиностроения предполагает создание новых и оптимизацию известных сплавов на основе меди с высокими электро- и теплопроводностью, хорошими механическими и литейными свойствами. Представляются перспективными поиски новых литейных сплавов на основе систем медь–железо и медь–никель. В ряде конструкций они 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, основанные на окислении медного расплава при плавке, подборе оптимального раскислителя, как правило, диффузионного, который не снижает проводимость медного сплава, а также способа удаления кислорода из расплава.

За основу технологичности применения литейных низколегированных сплавов меди использованы положения теории Б.Б. Гуляева, физико-химического анализа начальных областей диаграмм состояния сплава с легирующими компонентами.

На базе проведенного материаловедческого и физико-химического анализа сформирован следующий ряд эффективности влияния легирующих элементов на механические и технологические свойства медных низколегированных сплавов при содержании компонентов 0,1...1,0% (в порядке снижения легирующего влияния на прочность): Zr, Cr, Be, Fe, P, Cd, Mg, O₂, Mn, As, Al, S, Te, Se, Sn, Sb, Zn, Ag, Si, Pb.

На основе проведенного анализа сформирована программа экспериментальных исследований.

Глава 2. Разработка составов литейных низколегированных сплавов меди

При выборе легирующих компонентов или их комбинаций для разработки составов литейных низколегированных сплавов следует учитывать ряд факторов, важных для организации их промышленного производства с учетом современных достижений в технологиях плавки и литья, ориентированных на создание надежных технологических процессов, агрегатов, других новинок производства продукции различного назначения заготовок и фасонных отливок.

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.

При этом перспективными следует признать сплавы на основе системы медь–железо с легирующими добавками, которые обеспечивают возможность получения достаточно высокой электропроводности, хотя самостоятельно железо, вводимое в сплав, повышает электросопротивление меди, при этом достигаются более высокие показатели прочностных характеристик. В стандарты США ASTM включены четыре сплава (C19600...C19200) с содержанием железа 0,8...2,6 % (по массе), из которых выпускается продукция в виде полуфабрикатов для различных отраслей энергомашиностроения. Эти сплавы принято называть железистыми бронзами, в зависимости от термообработки они способны обеспечить $\sigma_B = 275 \dots 550$ МПа и δ_5 до 18%. Сплавы системы медь–железо характеризуются как материалы с высокими показателями тепло- и электропроводности, а железистые бронзы, дисперсионно-твердеющие сплавы, могут являться конкурентами хромовых бронз.

Разработку сплавов на основе системы медь–железо проводили в нашей стране очень давно, однако выпуск изделий, даже в виде полуфабрикатов, из них не проводится. В настоящее время от прямой задачи построения диаграмм состояния по результатам физико-химического анализа и исследования физических свойств сплавов исследователи постепенно переходят к обратной задаче – прогнозированию свойств сплавов и их компонентов на основе диаграмм состояния (которые постоянно дополняются и уточняются). 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 предполагают

их применение для заготовок с хорошими антифрикционными свойствами при сохранении высокой электропроводности.

На рис.1 представлен медный угол неравновесной диаграммы состояния Cu–Fe. На диаграмме обозначены точки *a*, *b*, *c*, *d*, по которым представлены основные критерии теории Б.Б. Гуляева: распределения – отношение растворимости Fe в твердой и жидкой фазе и критерий термообработки.

Система Cu–Fe относится к сплавам с восходящей перитектикой в медном угле диаграммы состояния. Характерно, что восходящие перитектики, аналогичные системе Cu–Fe, присущи тугоплавким металлам V, Co, Mo, W и отдельным РЗМ, иридию и прочим металлам, которые труднорастворимы в меди. Другие, более простые диаграммы состояния, как Cu–W, не построены из-за трудности растворения W в Cu. Можно отметить, что для получения сплавов системы Cu–Fe, на практике не требуется особый подход (введение тугоплавких элементов) к металлургической подготовке расплава. Кроме того, для всех систем с восходящей перитектикой характерно наличие областей не смешиваемости.

Результаты расчета критериев по неравновесной диаграмме состояния представлены в таблице 1.

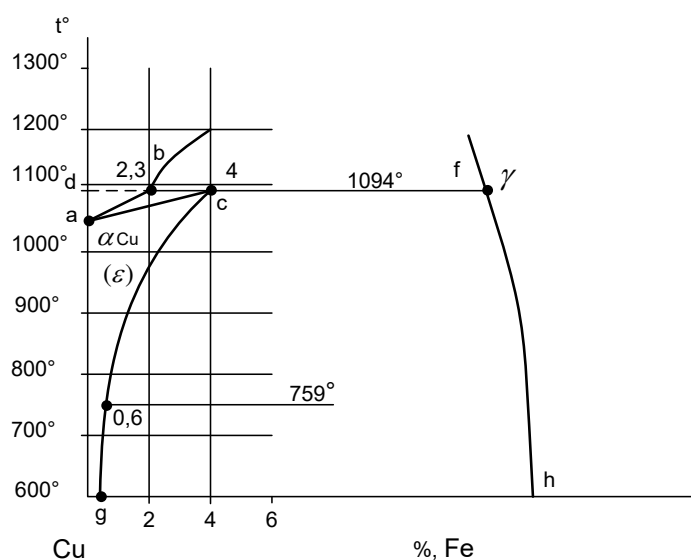


Рисунок 1 – Медный угол неравновесной диаграммы состояния медь–железо

Оценка критерия растворимости α . Сравнение критериев растворимости α приведенных у Б.Б. Гуляева показывает, что наиболее высокие их значения у Zn (31,9), Be (16,4), Al (16,0), Si (11,5), а наименьшие – у Zr (0,8), Cr (0,8), Ni (1,0), Mn (1,0). Показатель $\alpha = 4$ у Fe, близок к показателям α у Sn (7,6), Cd (2,4), Sb (6,0), но почти в два раза меньше, чем значение растворимости у олова. Показатели α даны для твердого состояния сплавов и не учитывают температуру плавления легирующего элемента.

Оценка критерия распределения ω . Сравнение значений ω у Cu–Fe с другими системами Cu–X, входящими в состав низколегированных сплавов, показывает, что у Fe $\omega = 1,7$ значительно меньше, чем у других легирующих элементов: Ni (0,75); Zn (0,86); Al (0,89); Si (0,66); Sn (0,7); Cr (0,5); Zr (0,11), т.е. для системы Cu–Fe концентрация железа в центре литого зерна выше, чем по периферии, что подтверждается практикой.

Оценка критерия пористости δ . Для Fe критерий $\delta = 1$ и аналогичен для систем с узким интервалом кристаллизации, где $\Delta T = T_{\text{л}} - T_{\text{с}}$ с концентрациями 0,1...3% легирующих элементов, характерными для применения в низколегированных сплавах, т.е. сравнение систем Cu–Sn, Cu–Zn должно проводиться именно при таких условиях, так как эти системы по критериям пористости δ Б.Б. Гуляевым отнесены к системам с интенсивным развитием рассредоточенной пористости.

Таблица 1 – Критериальная оценка неравновесной диаграммы состояние системы медь – железо

| №п/п | Критерий | Выражение | Значение | Пояснение |
|------|---------------------------|-------------------|-----------------|---|
| 1. | Критерий растворимости | $\alpha = bd$ | 4 ат.%. | предельная растворимость Fe в твердой фазе основы Cu |
| 2. | Критерий сочетания | $\beta = bc$ | 2,3 ат.%. | соответствует предельной растворимости Fe в жидкой фазе основы Cu |
| 3. | Критерий распределения | $\omega = bc/bd$ | $4/2.3 = 1.7$ | отношение растворимости Fe в твердой и жидкой фазах основы сплава меди |
| 4. | Критерий термообработки | $\gamma = cf/hg$ | $840/995 = 0,8$ | показывает возможность термоупрочнения сплава в результате закалки и старения |
| 5. | Критерий температуры | od/oa | $1094-1083=11$ | Разность температуры первого превращения к температуре плавления |
| 6. | Критерий пористости | $\delta = ad/cd$ | $\delta = 1$ | Косвенно является показателем интервала кристаллизации сплава |
| 7. | Критерий жидкотекучести | $\lambda = ad/bd$ | $11/2.3 = 4,8$ | Равен котангенсу угла между линией ликвидус с перетектической платформой |
| 8. | Критерий пленообразования | ΔH | 196 | За основу критерия принято показателем для $Al_2O_3 = 400$ на расплаве меди |

Оценка критерия жидкотекучести α . Показатели жидкотекучести сплавов системы Cu–Fe до 1% Fe, полученные по стандартным технологическим (спиральным) пробам свидетельствуют, что они примерно находятся на уровне или немного выше значений жидкотекучести чистой меди (такие же показатели характерны для сплавов, содержащих Zn, Al). Интервалы кристаллизации ΔT у сплавов меди с железом незначительные.

Механические свойства всех сплавов, т.е. содержащих 0,08...0,15% Fe и 0,03...0,05% P характеризуются следующими показателями $\sigma_b = 280...300$ МПа и $\delta = 30...35\%$, т.е. достаточно высокими значениями. Литейные свойства (жидкотекучесть и горячеломкость) удовлетворительные. Такой сплав может быть рекомендован для изготовления пресс-форм ЛПД и ЛКД сплавов со средними температурами плавления (алюминиевые, магниевые и цинковые сплавы).

Проведены расчеты темпа кристаллизации низколегированного сплава медь–железо с содержанием Fe 1...2,6% (по массе). Установлено, что темп кристаллизации сплава Cu–1%Fe в интервале кристаллизации 1087...1085 °С при приближении к температуре солидус непрерывно увеличивается, что определяет динамику неравновесной кристаллизации сплавов и образование пересыщенного твердого раствора железа в меди.

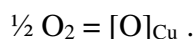
Глава 3. Металлургические процессы подготовки расплава из низколегированных сплавов меди

При решении задачи по легированию меди, в первую очередь, стоит вопрос взаимодействия медного расплава с кислородом. Если при пирометаллургическом процессе главным считается задача как можно более глубокого и быстрого удаления примесей окислительной обработкой, то в металлургическом производстве медных низколегированных сплавов главным следует признать мероприятия, обеспечивающие минимальное окисление легирующих элементов при их введении в медный расплав. Как правило, практически все современные низколегированные сплавы на медной основе ориентированы и производятся в условиях открытой металлургической плавки. Даже бескислородная медь на некоторых предприятиях изготавливают открытой плавкой. Это весьма существенно, так как ряд новых

сплавов, содержащих в качестве основных легирующих добавок элементы с высокой химической активностью, разрабатывались в условиях опытных плавов в защитной атмосфере или в вакууме (сплавы, содержащие Cr, Zr, Ti, Mg и др.). Поэтому металлургические и технико-экономические показатели сплавов, приготовленных в условиях вакуума и в открытой атмосферной плавки, существенно отличаются и недостаточно изучены и исследованы.

Термодинамический анализ системы проводили на основе различных моделей строения жидких расплавов.

Растворение кислорода в меди в первом приближении можно описать следующими выражениями:



Константа равновесия реакции окисления равна:

$$K = \frac{a_{[\text{O}]}}{P_{\text{O}_2}^{1/2}} = \frac{f_{\text{O}} \cdot c_{\text{O}}}{P_{\text{O}_2}^{1/2}} ,$$

где $a[\text{O}]$, $f[\text{O}]$ – активность и коэффициент активности кислорода соответственно;

$c_{[\text{O}]}$ – концентрация кислорода, %;

$P_{\text{O}_2}^{1/2}$ – парциальное давление кислорода.

Процесс растворения кислорода в меди сопровождается изменением свободной энергии и энтальпии по реакции, которая может быть определена из выражения:

$$\Delta G_o^0 = -RT \lg \left(f_o \frac{c_o}{P_{\text{O}_2}^{1/2}} \right) .$$

Величина ΔG^0 неоднократно определялась по экспериментальным и теоретическим данным для разбавленных растворов с содержанием кислорода в меди 0,2 % (по массе) в зависимости от температуры.

Считают, что растворы кислорода в меди подчиняются закону Генри во всем диапазоне его содержания в меди, вплоть до насыщения. При этом, диапазон ограничен содержанием кислорода до 0,4 % (по массе). Этот фактор необходим при рассмотрении металлургических особенностей плавки низколегированных сплавов на основе меди, когда в условиях плавки меди на воздухе содержание кислорода не превышает 0,2 %. В реальной работе, прежде всего, необходимо установить стабильное или часто наблюдаемое содержание кислорода в меди после ее расплавления в зависимости от применяемой марки меди, печного оборудования, технологии плавки и др. факторов, непосредственно перед раскислением, чтобы в меди оставалось минимальное содержание кислорода.

Наиболее вероятно, что кислород в меди присутствует в виде комплексов из связанных ионов Cu^+ и O^{2-} , которые, в свою очередь, связаны с окружающими их ионами меди. Медь относится к металлам, у которых изменение структуры происходит при температуре плавления, причем дальнейшее структурное превращение в жидком состоянии происходит с уменьшением координационного числа на основе коллективного взаимодействия. Анализ приведенных данных, позволяет сделать вывод, что при разработке новых марок низколегированных сплавов на основе меди, содержащих в сумме 2,5 % (по массе) и более легирующих элементов, с высоким уровнем эксплуатационных свойств, особое внимание необходимо уделить изучению поведения кислорода при плавке сплавов, а также подбору оптимального раскислителя, который не оказывает вредного воздействия на свойства сплава, а также метода, при котором кислород будет наиболее полно удаляться из объема жидкой ванны. Влияние легирующих элементов на свойства низколегированной меди, как по отдельности, так и в комплексе, также нуждается в дополнительном изучении.

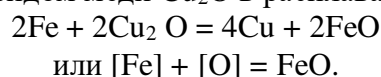
Одни из наиболее перспективных низколегированных сплавов на основе меди для получения фасонных отливок, обладающих достаточно высокими литейно-технологическими

и механическими свойствами, окалинотойкостью в сочетании с хорошими значениями теплопроводности – хромовые бронзы (0,1...1,0 % хрома) с добавками Zr, Ti, Ca, Cd и др. легирующими элементами. К другой группе относятся растворно-упрочняющие сплавы систем Cu-Ni, Cu-Al, Cu-Fe, у которых высокий уровень эксплуатационных свойств: жаропрочность, жаростойкость, износостойкость, определяется прочностью межатомных связей твердого раствора.

Низколегированные сплавы системы Cu-Fe с добавками P, Sn, Zn, считаются весьма перспективными для получения фасонных отливок. Исследования технологических режимов плавки сплавов системы Cu-Fe проводили в индукционных высокочастотных печах марки ИСТ 006, которые обеспечивают однородность расплава, в графитошамотных тиглях.

Технологические режимы плавки низколегированных сплавов меди с железом обрабатывали на основе теории физико-химических процессов. Различные физико-химические свойства продуктов окисления затрудняют процессы последующего рафинирования меди и медных сплавов. Перед введением в расплав легирующих элементов необходимо проведение операции раскисления медного расплава. Для раскисления расплава традиционно применяют элементы, оксиды которых обладают более низкой упругостью диссоциации. К ним относятся поверхностно активные (углерод) и растворимые (фосфор) раскислители.

Реакция окисления железа оксидом меди Cu_2O в расплавах меди описывается реакцией:



Термодинамический потенциал реакции по разным данным составляет $\Delta G^\circ_{\text{FeO}} = -217,3...255,5$ кДж/моль при 1200 °С. Более предпочтительны для расчета меньшие значения $\Delta G^\circ_{\text{FeO}}$. Термодинамический потенциал реакции зависит и от температуры и может быть записан уравнением:

$$\Delta G^\circ_{\text{FeO}} = -50875 + 19,99T \text{ кДж/моль.}$$

Сравнивая значений $\Delta G^\circ_{\text{FeO}}$ с потенциалами других компонентов в меди, необходимо отметить, что его значение выше, чем у Sn, Ni, Pb и примерно равно показателю для фосфора, который часто применяют раскислителем при плавке меди промышленной чистоты ($\Delta G^\circ_{\text{FeO}} = -288,15$ кДж/моль при 1200 °С).

На рис.2 представлены полученные практические данные по влиянию железа на концентрацию кислорода в меди при 1423 К (1150 °С). Для сравнения, там же приведены данные о влиянии фосфора на содержание кислорода в системе медь-фосфор-кислород. 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. Например, фосфором, который может входить в состав низколегированных сплавов меди (до 0,3%).

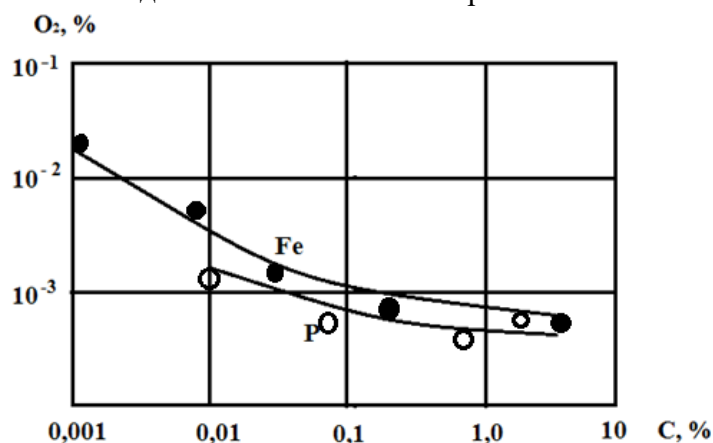


Рисунок 2 - Совместное влияние железа (●) и фосфора (○) на содержание кислорода в меди при 1150 °С (C – концентрация железа и фосфора)

В случае выплавки сплавов, не содержащих в составе фосфор, рекомендуется перед введением железа в расплав проводить процесс диффузионного раскисления.

Время глубокого раскисления меди до регламентируемых значений содержания кислорода (менее 30 ppm) может составлять до 0,7...0,9 ч. В этой связи целесообразно применение более эффективных углеродсодержащих диффузионных раскислителей, таких как графитовая крошка или графитовый мелкий кокс. Например, графитовый кокс крупностью 5...10 мм сокращает время диффузионного раскисления на 20...30 % по сравнению с древесным углем.

При повторном переплаве железосодержащего лома меди, железо окисляется в первую очередь с образованием оксидов железа (главным образом Fe_3O_4), которые, не снижают существенно физико-механические свойства меди. В присутствии незначительного количества фосфора сплавы этой системы имеют относительно высокие литейные свойства, и их можно рекомендовать для получения фасонных отливок.

Основная часть железа окисляется кислородом, растворенным в меди с образованием тугоплавкого шлака $nFeO \cdot mCuO$, который при плавке в графитошамотных тиглях взаимодействует частично с SiO_2 с образованием шпинели. Они образуют трудноудаляемые наросты на стенках тигля. Поэтому при плавке меди, загрязненной железом, рекомендуется обязательно использовать перед разливкой добавки фосфора (0,01...0,05 %) для окончательного раскисления расплава и разжижения шлака. Существенное влияние на качество расплава при плавке сплавов системы меди с железом оказывает характер пленообразования, который в основном зависит от содержания железа. При содержании железа до 0,6 % пленообразование на поверхности медных расплавов происходит следующим образом. При температуре расплава выше определенных значений плена не фиксируется и зеркало металла чистое. С понижением температуры появляется плена, устойчивая практически до температуры ликвидуса. При увеличении содержания железа в меди свыше 0,5 % пленообразование на поверхности практически не зависит от температуры, плена устойчива независимо от температуры перегрева в большом интервале.

Пленообразование на расплавах меди обычно происходит при съеме слоя защитно-восстановительного шлака перед разливкой металла в формы. Однако время до разливки сплава не приводит к каким-либо существенным процессам окисления расплава и его насыщения кислородом.

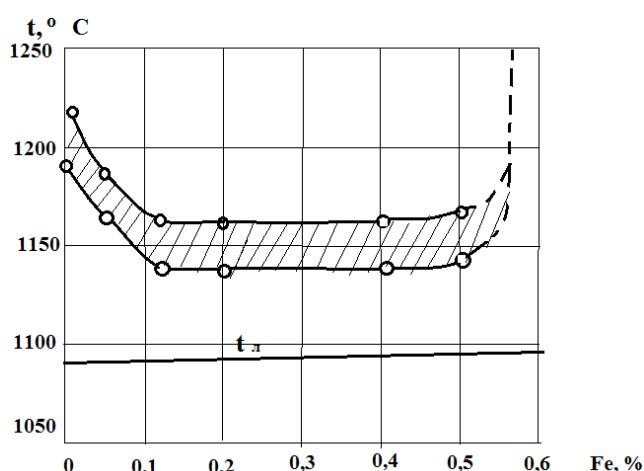


Рисунок 3 – Температурный интервал пленообразования на расплавах медь–железо

Для получения меди с возможно более низким содержанием кислорода ее раскисляют углеродом. В работах В.М. Чурсина оценивается количество растворенного углерода в меди при различных температурах.

Характер кинетики показывает, что кислород удаляется из меди с относительно большими скоростями в начале процесса, которые снижаются в конце процесса, приближаясь

к какому-то достижимому для данных условий опыта равновесному состоянию в системе газ–металл. Степень раскисления характеризуется остаточным содержанием кислорода 0,01...0,005 % (по массе). Эти величины достигаются при длительности диффузионного раскисления в течение 30...35 мин. Математическое моделирование кинетики раскисления черновой меди углеродом, показали, что длительность глубокого (0,01...0,005 % по массе) раскисления меди составляет 35...40 мин. Однако, как отмечалось выше, такая степень раскисления меди перед введением легирующих элементов не оправдана. Степень раскисления меди может быть ограничена 0,008...0,01 % для плавки низколегированных сплавов. Опытным путем установлено, что длительность диффузионного раскисления меди (коквик, графитовая крошка) до искомых значений может быть достигнута за 10...15 мин, в частности, для выплавки сплавов медь–железо.

Глава 4. Исследование литейно-технологических свойств низколегированных сплавов на основе меди

Перспективными легирующими элементами для разработки литейных низколегированных сплавов меди, как было установлено, является добавки олова, кремния, никеля и железа. В этой связи провели комплексные исследования влияния малых добавок Sn, Si, Ni и Fe (до 1%) на литейно-технологические свойства меди.

Зависимость жидкотекучести меди от содержания легирующих компонентов представлена на рис. 4. При легировании меди оловом, кремнием и никелем до 0,1% жидкотекучесть незначительно увеличивается. Это, по-видимому, связано с изменением теплофизических свойств расплава, о чем может свидетельствовать небольшое снижение электро- и теплопроводности. Одновременно на увеличение жидкотекучести оказывает влияние раскисление расплава. Железо до 1% практически не снижает жидкотекучесть меди. Легирование меди железом до 0,3% увеличивает жидкотекучесть на 80 мм. Повышение содержания железа до 1% приводит к некоторому снижению жидкотекучести до уровня значения для чистой меди.

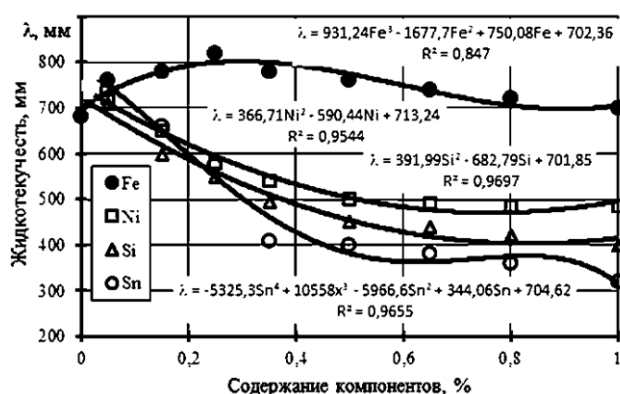


Рисунок 4 - Жидкотекучесть низколегированных медных сплавов при легировании железом (●), оловом (○), кремнием (Δ) и никелем (□)

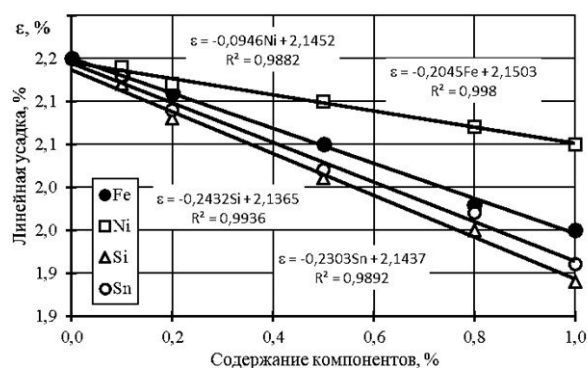


Рисунок 5 – Линейная усадка низколегированных медных сплавов при легировании железом (●), оловом (○), кремнием (Δ) и никелем (□)

Наибольшее влияние на свободную линейную усадку меди оказывают олово и кремний (рис.5), что связано с резким снижением температуры солидуса на 40...50 °С и наличием заметного интервала кристаллизации. Коэффициент термического сжатия кремния значительно ниже, чем меди, что также оказывает определенное влияние на снижение свободной линейной усадки. В меньшей степени снижают линейную усадку меди никель и железо. Сопоставляя результаты с диаграммами состояния, замечено, что небольшое снижение свободной линейной усадки меди легированной никелем и железом связано с наличием небольшого интервала кристаллизации этих сплавов (2...3 °С) и

незначительным изменением температуры солидуса. Кроме того, небольшое влияние на величину линейной усадки меди, легированной никелем или железом, оказывают близкие значения коэффициентов термического сжатия к меди этих элементов.

Легирование железом практически не изменяет величину объемную усадку. 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.

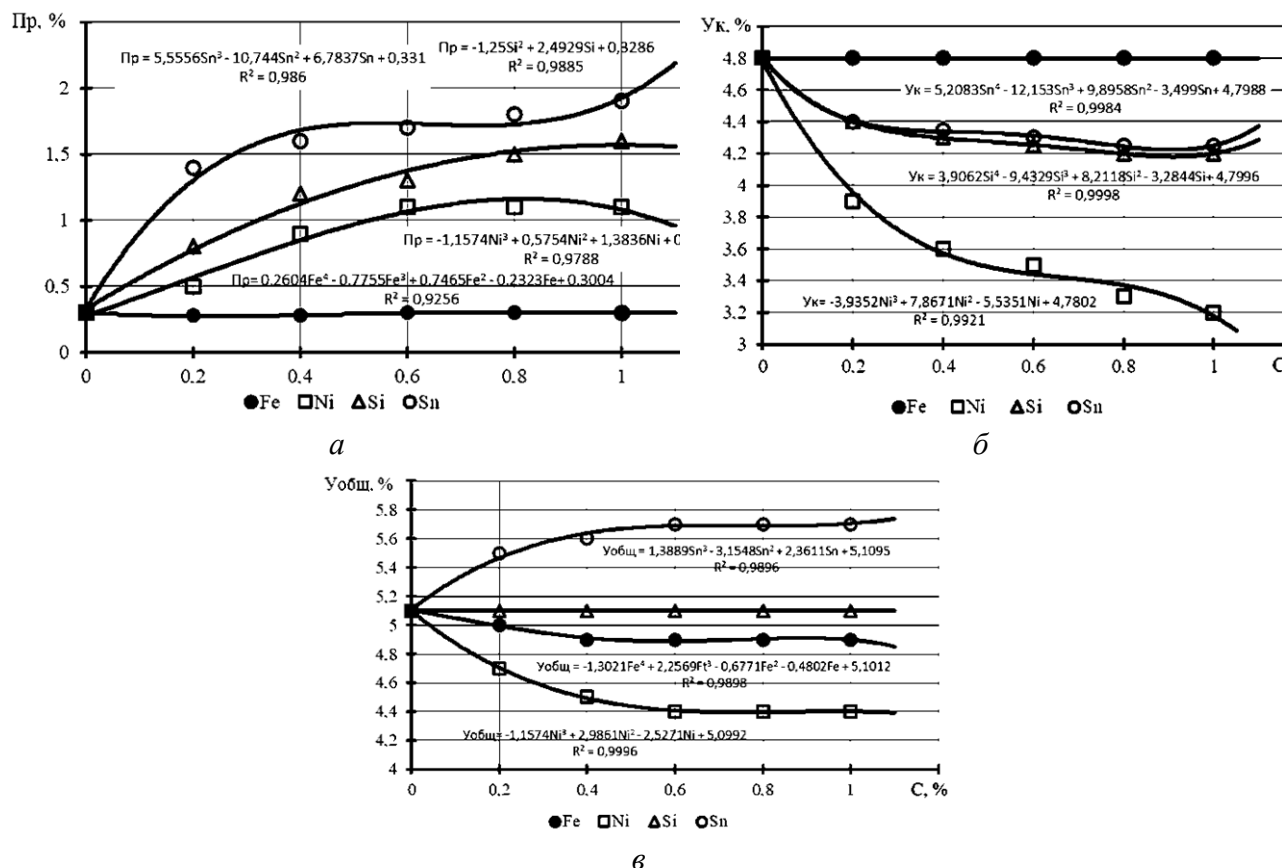


Рисунок 6 - Влияние содержания легирующих элементов C на объемную усадку меди (P_p – рассеянная пористость; $У_k$ – концентрированная усадка; $У_{общ}$ – общая усадка) при легировании железом (●), оловом (○), кремнием (Δ) и никелем (□)

Увеличение рассеянной пористости, как правило, обусловлено появлением заметного интервала кристаллизации при увеличении концентрации олова и с изменением характера кристаллизации, связанной с образованием разветвленных дендритов, которые затрудняют питание отливки. Кроме традиционных литейно-технологических свойств сплавов большое значение имеют и другие свойства, которые определяют качество готовых отливок, и в частности гидропрочность.

Гидропрочность – одно из важнейших свойств отливок, работающих под высоким давлением жидкостей или газов. Гидропрочность низколегированных сплавов оценивали на специальных отливках, идентичных по конфигурации наконечникам продувочных фурм кислородно-конвертерного и доменного производства. Отливки испытывали при максимальном жидкостном давлении до 3,0 МПа до появления течи или выпотов. Толщина стенки испытуемых отливок соответствовала реальным значениям и составляла 5 и 7 мм. Отливки подвергали гидравлическим испытаниям при давлении до 3,0 МПа с пошаговым интервалом в 0,5 МПа.

Гидропрочность отливок во многом определяется характером объемной усадки, а именно наличием рассредоточенной пористости. Пористость в отливках часто напрямую зависит от интервала кристаллизации сплава.

Легирование меди оловом и железом оказывает неоднозначное влияние на характер объемной усадки (рис. 7). Легирование небольшими добавками в большей степени влияет на характер распределения между видами объемной усадки меди.

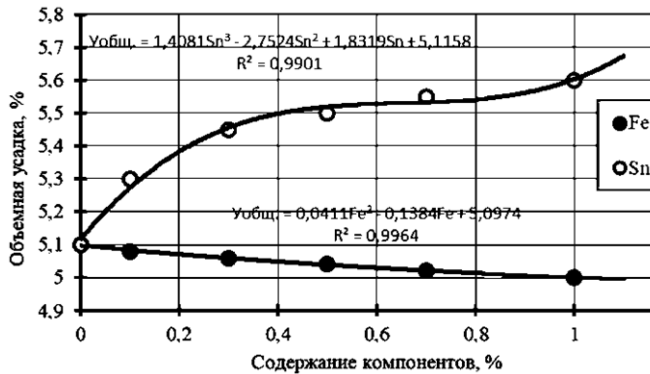


Рисунок 7 - Зависимость объемной усадки меди от количества легирующих компонентов

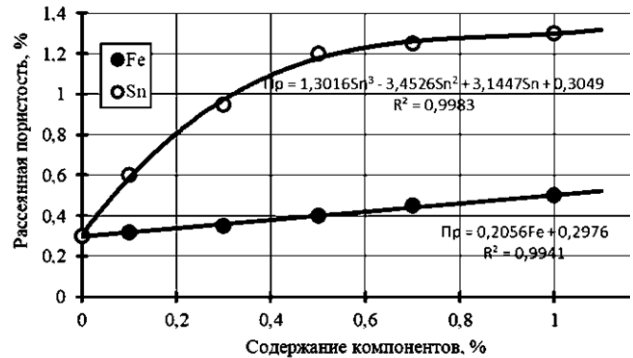
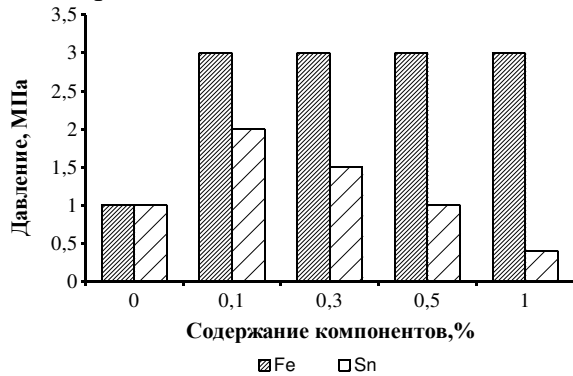


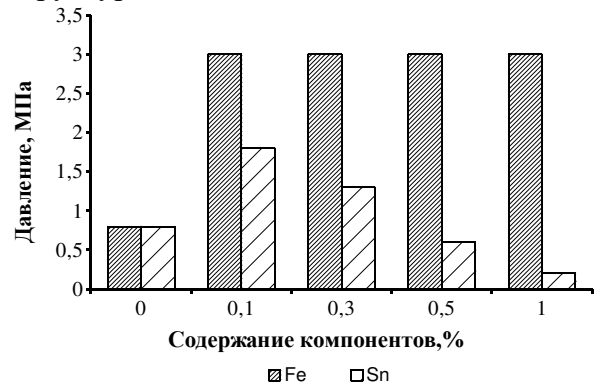
Рисунок 8 - Зависимость пористости отливок от содержания легирующих компонентов олова и железа

Полученные данные по объемной усадке показали, что технически чистая медь обладает общей объемной усадкой 5,1% при характере распределения в отливке: в виде концентрированной раковины 4,8% и рассеянной пористости 0,3%. При увеличении содержания железа до 1% общая объемная усадка незначительно уменьшается, при этом объем рассеянных пор несколько увеличивается с 0,3 до 0,58% (рис.8). Олово оказывает более существенное влияние на объемную усадку меди и особенно на формирование рассредоточенной пористости. При этом перераспределение характера усадки в основном проявляются при легировании меди оловом до 0,3%.

Сопоставляя результаты исследования объемной усадки, ее характера и структуры с герметичностью низколегированной меди с Sn и Fe можно отметить прямую зависимость герметичности от величины рассредоточенной пористости. С увеличением содержания железа в меди происходит заметное измельчение литой структуры.



а



б

Рисунок 9 - Гидрочность отливок с толщиной стенки: а – 5 мм; б – 7 мм

При достижении в сплаве 1% Fe макроструктура сплава становится мелкозернистой, исчезает зона столбчатых кристаллов, а в микроструктуре существенно уменьшают размеры дендритов. Этот фактор способствует получению гидрочных отливок не зависимо от толщины их стенки (рис. 9).

Отливки из чистой меди имеют невысокую герметичность при 0,3 и 0,5 МПа при соответствующей толщине стенки 5 и 7 мм (рис.10.). На рис.10 представлена отливка из чистой меди и указано место, где наблюдается течь. Структура отливки характеризуется

достаточно крупными в основном равноосными кристаллами, которые в наибольшей степени подвержены пористости.

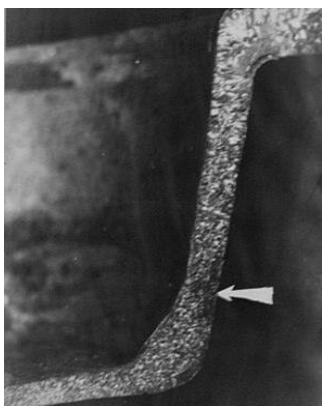
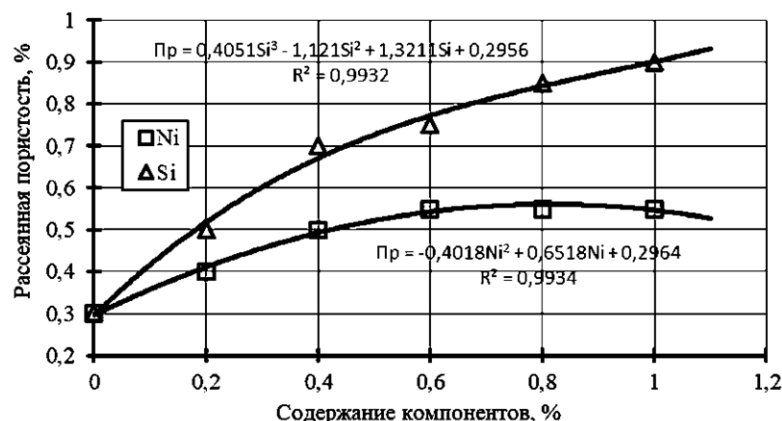
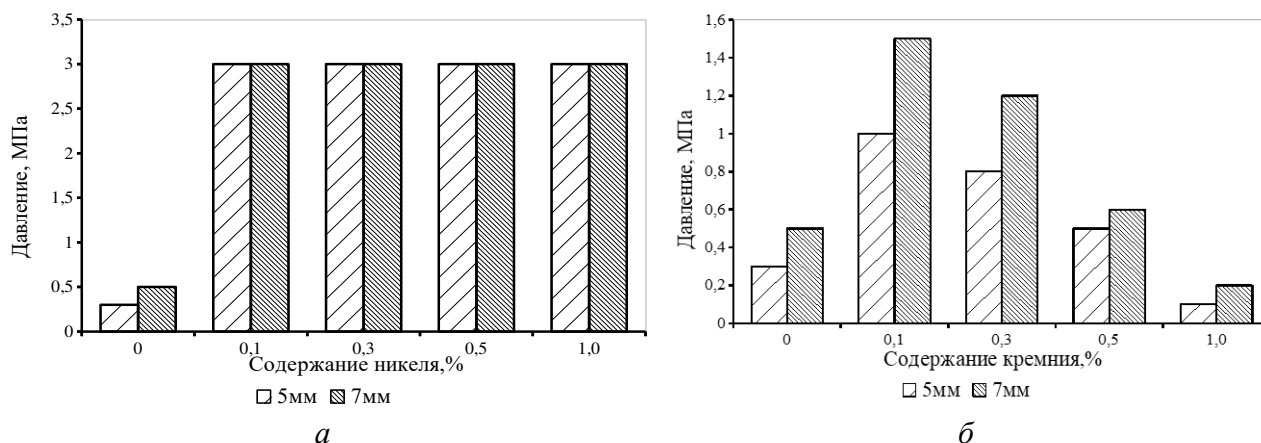


Рисунок 10 - Отливка из чистой меди



На рис.11 представлено влияние легирования меди кремнием и никелем на рассеянную пористость. Следует отметить, что легирование массовой долей никеля до 1 % увеличивает пористость в отливке в два раза, при этом пористость в 0,6% не является критичным для отливок. При легировании меди кремнием пористость отливок увеличивает до значений в 1 %, такие значение пористости уже более существенно влияют на гидропрочность, что подтверждают дальнейшие результаты исследований.

Легирование меди никелем и кремнием до 0,1% существенно увеличивает герметичность отливок до 3,0 и 1,5 МПа соответственно (рис.12). Отливки, легированные никелем, показали высокую герметичность при вариативном изменении до 1 %. Это обусловлено небольшой рассеянной пористостью в отливках и плотной структурой литого металла.



В макроструктуре меди, легированной никелем до 0,5%, преобладает плотная столбчатая структура, у которой отсутствует пористость (рис. 13). При введении 1% никеля образуется мелкозернистый достаточно широкий наружный слой и зона со столбчатой структурой в центре отливки. Такое кристаллическое строение литого металла, как правило, не подвержено поражению усадочной пористостью.

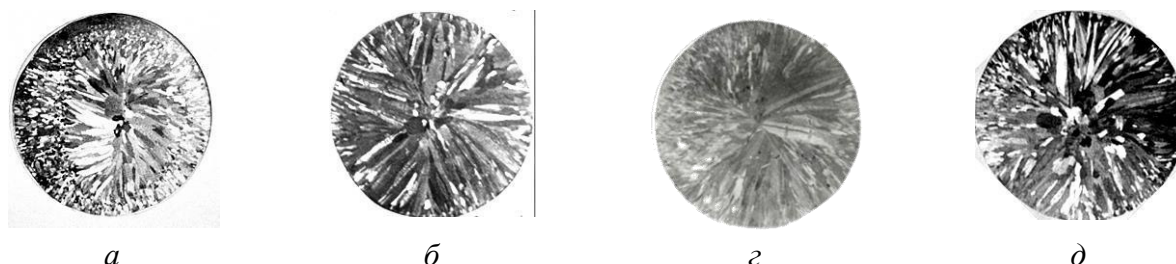


Рисунок 13 - Макроструктура меди, легированной Ni, %: а – 0,1; б – 0,3; в – 0,5; г – 1,0

В результате проведенных исследований установлено, что для изготовления герметичных отливок с высокой гидропрочностью возможно применение в низколегированных сплавах, содержащих до 1 % железа и никеля. Микролегирование меди кремнием, и особенно, оловом не может обеспечить высокую гидропрочность в отливках, содержащих более 0,5 % этих компонентов.

В последнее время проблема трещинообразования в отливках приобретает особое значение в связи расширенным применением неподатливых многоразовых форм (кокили, пресс-формы для литья под давлением и литья с кристаллизацией под давлением). При изготовлении отливок происходят разнообразные усадочные процессы, которые влияют на качество литья. Трещины, усадочная пористость и рыхлота оказывают наиболее существенное влияние на дефекты в литейном производстве. Усадка литейных сплавов происходит в несколько этапов: усадка в жидком состоянии при охлаждении сплава, усадка при затвердевании отливки и усадка в твердом состоянии.

Термином "трещиностойчивость" определяется способность противостоять образованию трещин в литых образцах сплава. Изменение трещиностойчивости (рис. 14) сплавов главным образом связано с характером кристаллизации, образованием линейной усадки, прочностью и пластичностью сплава в эффективном интервале кристаллизации сплава.

Горячеломкость низколегированных медных сплавов, легированных оловом, железом, кремнием и никелем, определяли по кокильной кольцевой пробе диаметром 54 мм и высотой 60 мм. Зависимость горячеломкости меди от содержания легирующих элементов представлена на рис.15. Критерием оценки показателя горячеломкости служила суммарная площадь образовавшихся трещин.

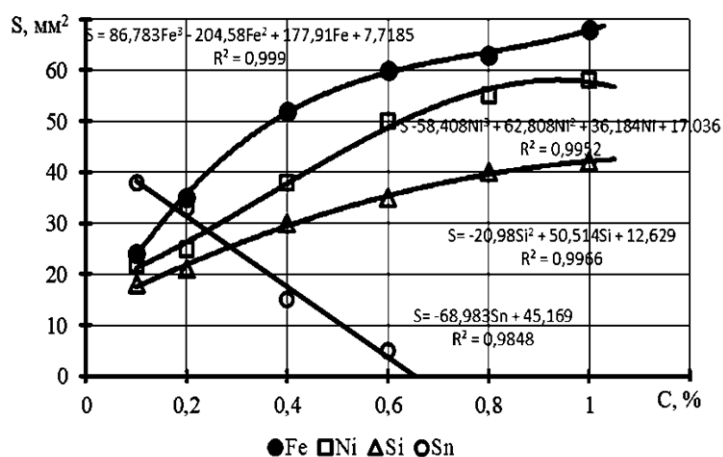


Рисунок 14 - Влияние содержания легирующих элементов C на трещиностойчивость меди (S – площадь трещин)

Чистые металлы и сплавы со значительным количеством жидкости к концу затвердевания не склонны к горячеломкости при кристаллизации. Сплавы с широким интервалом кристаллизации склонны к образованию горячих трещин, так как линейная усадка начинает проявляться в жидко-твердом состоянии. При легировании меди до 1 % кремнием,

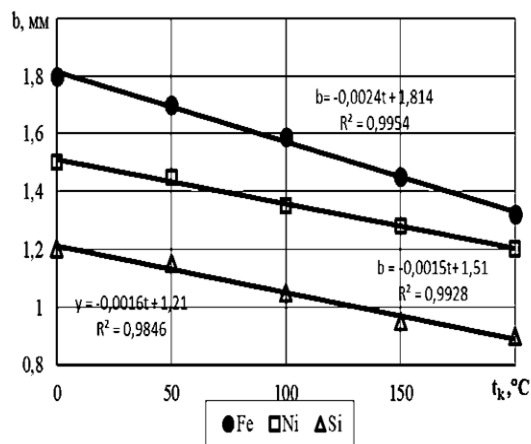


Рисунок 15 - Влияние температуры кокиля t_k на горячеломкость сплавов (b – ширина трещины)

никелем и железом горячеломкость меди увеличивается за счет расширения интервала кристаллизации и изменением ее характера. Эти данные свидетельствуют, что незначительные интервалы кристаллизации меди этими элементами незначительны, что не приводит к превышению порога пластичности при усадке сплава в эффективном интервале кристаллизации. Сплавы меди, легированные кремнием, никелем и железом могут быть рекомендованы для изготовления отливок в металлические формы многоразового использования. Сплавы меди, легированные оловом, целесообразно применять при литье в формы, обладающие податливостью.

Одним из существенных факторов, определяющих литейную технологичность сплавов, является пленообразование. Считается, что плена, образующаяся на открытой поверхности расплава, уменьшает их жидкотекучесть и служит причиной многих дефектов в отливках. Процесс образования оксидов плены тесно связан с температурой жидкого расплава. При легировании меди железом до 0,5% температура пленообразования снижается практически на 50 °С (рис.16). Наличием эвтектики в области малых содержаний Fe_2O_3 (по диаграмме состояния $Cu_2O-Fe_2O_3$) можно объяснить незначительное снижение температуры пленообразования меди.

При содержании железа в меди свыше 0,5% температура пленообразования резко возрастает. По-видимому, причиной такого роста является образующийся шпинелевидный твердый раствор. Полученные данные хорошо согласуются с результатами влияния этих элементов на жидкотекучесть низколегированной меди. Легирование меди массовой долей 1 % железом и никелем несколько повышает температуру пленообразования на расплаве меди.

Важное свойство фасонных отливок из меди и низколегированных медных сплавов – электропроводность. Легирование меди никелем до 1% (по массе) несколько снижает электропроводность и соответствует значению 80% от электропроводности чистой меди (рис. 17).

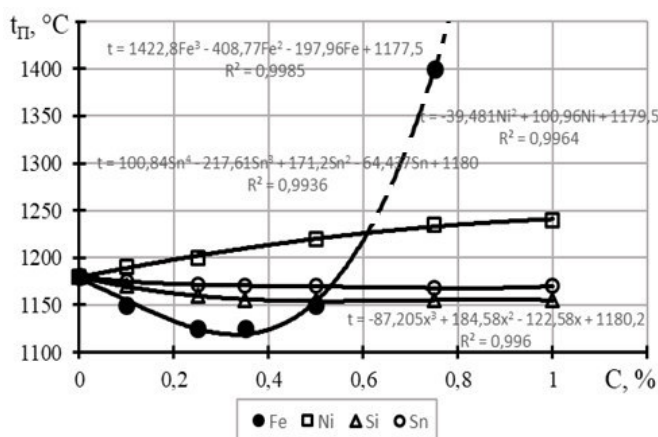


Рисунок 16–Влияние содержания легирующих элементов C на пленообразование (t_p – температура)

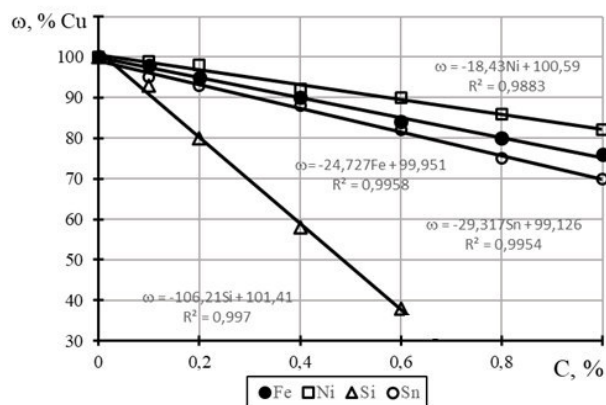


Рисунок 17 - Зависимость электропроводности ω -низколегированных медных сплавов от содержания легирующих элементов C

Электропроводность меди при легировании железом и оловом до 0,5% соответствует 80% от электропроводности чистой меди. Дальнейшее увеличение содержания этих компонентов до 1% снижает электропроводность низколегированной меди до 60...70% от электропроводности чистой меди. Наиболее существенное влияние на электрическую проводимость меди оказывает кремний. При содержании 0,5% Si в меди ее электропроводность составляет всего 35% электропроводности чистой меди.

Глава 5. Разработка низколегированных сплавов меди с железом для получения фасонных отливок

Долгое время существовало убеждение, что загрязненная всевозможными примесями медь не может обеспечить стабильно высокие тепло- и электропроводность. Такие выводы были основаны на справочной и специальной литературе, где показано, что примесь железа снижает теплопроводность меди на 30...60 % (каждые 0,001 % железа снижают электропроводность на 0,8 %). Однако эти данные применимы к исследованиям, в которых в качестве основы использовалась бескислородная медь.

На рис. 18 представлены для сравнения значения теплопроводности меди легированной железом для бескислородной меди 2 и меди промышленной чистоты 1. Специальными рентгеноструктурными исследованиями установлено, что в присутствии кислорода железо находится в меди в виде твердых включений инертного оксида Fe_3O_4 . При этом выделение железа из раствора с медью в виде оксидов происходит в присутствии очень небольшого количества кислорода.

На рис. 19 приведены значения жидкотекучести и линейной усадки меди в зависимости от концентрации железа. Следует отметить благоприятное влияние железа на жидкотекучесть, т.е. свойство, которое в значительной мере определяет технологические возможности сплавов для получения фасонных отливок.

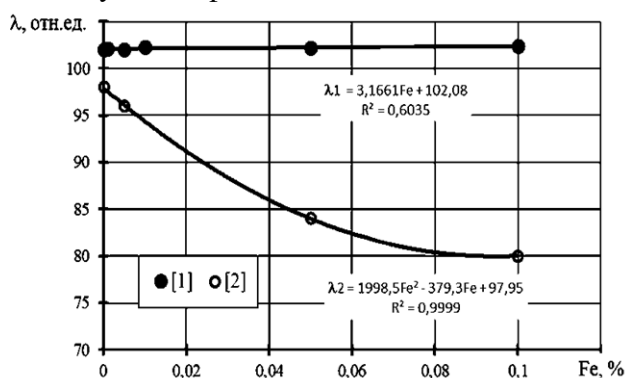


Рисунок 18- Влияние железа на теплопроводность меди:
1 – промышленной чистоты;
2 –бескислородной меди

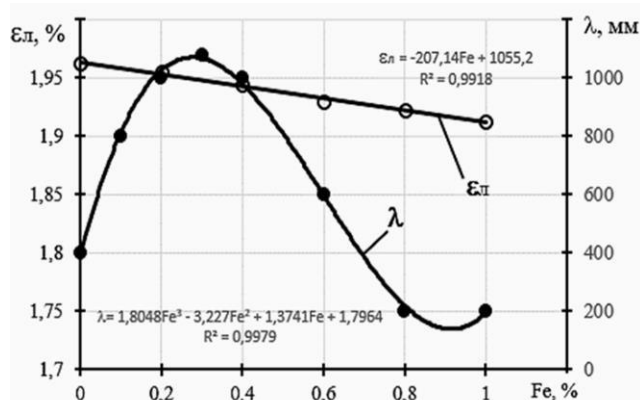


Рисунок 19- Зависимость жидкотекучести λ и линейной усадки ϵ_L медных расплавов от содержания железа

В результате проведенных исследований предложено три сплава меди с различным содержанием легирующих компонентов (табл. 2,3). Оптимизацию составов сплавов проводили с помощью программ для ЭВМ.

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.

Таблица 2- Составы сплавов на основе системы медь–железо

| № п/п | Содержание компонентов, % (по массе) | | | |
|-------|--------------------------------------|------|------------|-----------|
| | Fe | P | Zn | Cu |
| 1 | 0,25 | 0,06 | - | Остальное |
| 2 | 1,0 | 0,3 | 0,35 | |
| 3 | 2,0 | 0,15 | 0,05...0,2 | |
| 4 | 2,65 | - | - | - |

Диффузионное раскисление довольно длительный процесс, что заметно удлиняет технологический процесс плавки. Эмпирическим путем установлено время диффузионного раскисления – 10...15 мин.

Таблица 3-Свойства низколегированных сплавов меди с железом

| Сплав | $\sigma_{в}$, МПа, ЛС | δ , % | НВ | ω , %, после ТО | Γ , мм |
|-------|---------------------------|--------------|----------|------------------------|---------------|
| 1 | 280...300 | 33...35 | 60...70 | 80 | 0...15 |
| 2 | 300...320 | 30...32 | 70...80 | 70 | 0...10 |
| 3 | 320...340 | 25...27 | 80...90 | 60 | 0...5 |
| 4 | 360...380 | 23...25 | 90...100 | 50 | 0...5 |

Разработанные составы низколегированных сплавов предопределили создание двухкомпонентного сплава медь–железо с содержанием последнего в пределах 2,6...2,85 % (сплав 4). Для выплавки двухкомпонентного сплава медь–2,6...2,85 % железа использовали мелкодисперсный кокс (коксовая мелочь — каменноугольный кокс крупностью 0...10 мм) или графит измельченный крупностью 0,1...5 мм. Плавка в индукционных печах позволяет интенсифицировать процессы диффузионного раскисления расплава, которое составляет 12...15 мин и обеспечивает увеличение скорости растворения железа в медном расплаве. Железо вводили в расплав в виде заготовок сечением 6x6 мм и длиной до 100 мм, предварительно подогретых до 200 °С. Перед растворением железа температура расплава поднималась до 1280...1300 °С. Перед разливкой расплава зеркало очищалось от шлакового покрова графитовой ложкой. Температура заливки сплава составляла 1220...1240 °С. Заливку проводили в металлические формы (кокили). В результате плавки получены кокильные отливки из сплава медь–железо (содержание железа 2,65 %). **Сплав и способ защищены патентом на изобретение.** На рис. 20 четко видны включения темного цвета, которые являются нерастворенными включениями железа, остальное железо находится в α -твердом растворе меди. Провели рентгеноспектральный анализ химического состава в нескольких местах образца (точки черного цвета). На рис. 21 представлено спектральное изображение включений в сплаве в точке 3, а в табл. 4 – анализ химического состава включений, который указывает, что включения являются нерастворенным железом в медной матрице.

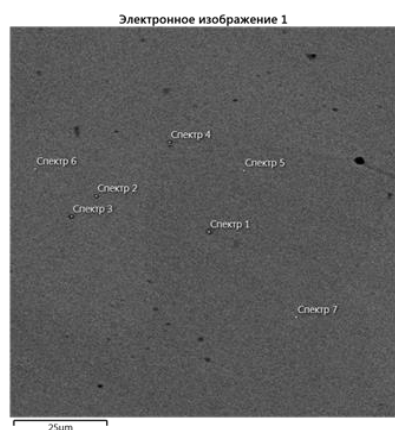


Рисунок 20 - Электронное изображение литой структуры медь–железо

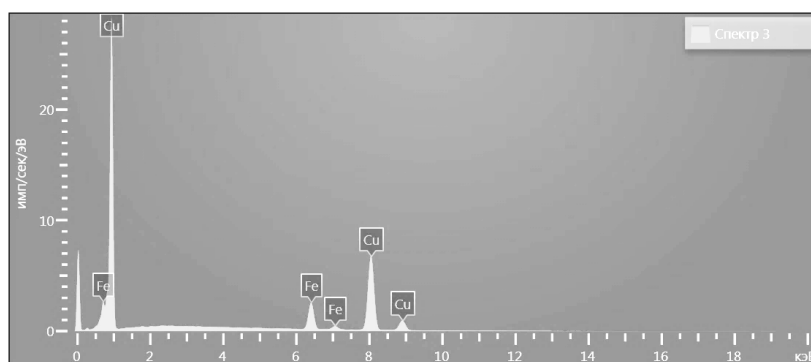


Рисунок 21 – Спектральное изображение включений (спектр 3)

Таблица 4 - Анализ химического состава включений (спектр 3)

| Элемент | Тип линии | Мас, % | $\sigma_{вес}$, % | Ат., % |
|---------|-----------|--------|--------------------|--------|
| Fe | K-серия | 14,05 | 0,21 | 15,68 |
| Cu | | 85,95 | | 84,32 |
| Сумма | | 100 | | 100 |

На это указывает значительные, неравномерные распределения железа в меди, которое присутствует в α -твердом растворе. Для получения более стабильных данных по прочностным

и эксплуатационным свойствам необходима разработка режимов термической обработки сплава.

Проведена разработка режимов термической обработки сплава по двум режимам $\Phi\Theta$: термическому отжигу и закалке (при фиксированной температуре) со старением при различных температурах, которые позволят измельчить распределение железа в растворе и стабилизировать уровень прочностных и эксплуатационных свойств сплава. Исследовали влияние режимов термообработки на свойства сплава медь–2,6...2,85 % железо. Термический отжиг проводили в течение 1 ч в варьируемом интервале температур 300 ... 1000 °С и с шагом испытаний в 50 °С.

Прочностные свойства сплава после термического старения медленно возрастают до 500...550 °С при незначительном снижении пластичности (рис. 22), а потом резко снижаются, что по-видимому, связано распадом α -твердого раствора при повышении температуры до 500 °С, затем с увеличением содержания железа происходит резкое снижение прочностных свойств. Вторичное повышение прочностных свойств, по всей вероятности, связано со значительным измельчением нерастворенного железа в медной матрице. При этом пластичность сплава изменяется незначительно (рис.23).

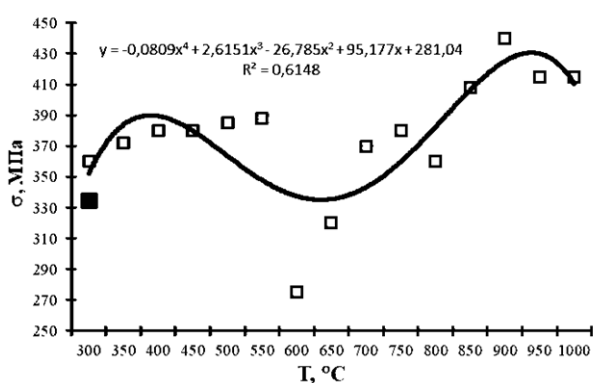


Рисунок 22- Влияние температуры отжига на σ сплава Cu–2,65%Fe (■ – ЛС)

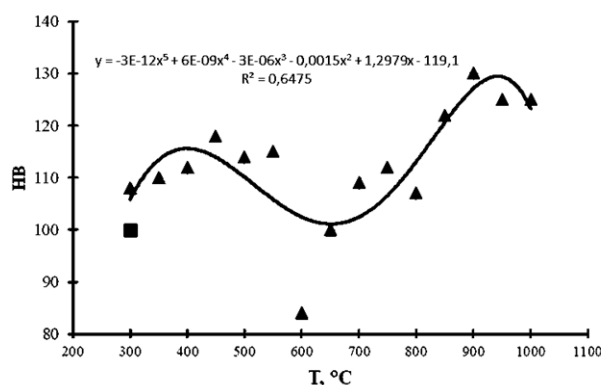


Рисунок 23- Влияние температуры отжига на твердость НВ сплава Cu–2,65%Fe (■ – ЛС)

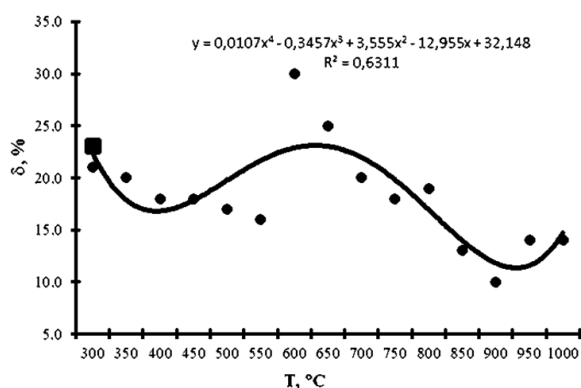


Рисунок 24 - Влияние температуры отжига на пластические свойства сплава Cu–2,65%Fe (■ – ЛС)

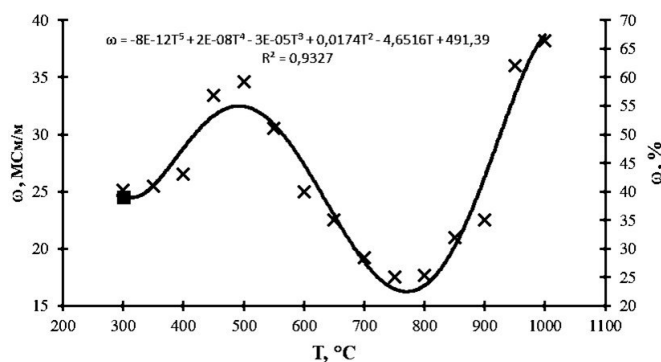


Рисунок 25 - Влияние температуры отжига на электропроводность сплава Cu–2,65%Fe (■ – проводимость в ЛС)

Наиболее точно характер изменения свойств сплава отражает направление кривой электропроводности, представленной на рис. 25, которому соответствуют определенные изменения в структуре сплава. На рисунке виден рост проводимости сплава с экстремумом при температуре 500 °С. Это связано распадом α -твердого раствора при повышении температуры до 500 °С, затем с увеличением содержания железа происходит снижение проводимости.

Однако термический отжиг не всегда применим для дисперсионно-твердеющих сплавов. Такие сплавы, как правило, вначале подвергаются закалке, чтобы зафиксировать α -твердый раствор железа в меди. Закалку сплава проводили при фиксированной температуре – 1030 °С. Интервал температур отжига приняли от 300 до 700 °С с шагом 100 °С.

На рис.26–28 представлены зависимости изменения прочностных (σ_b , НВ) и пластических (δ) свойств сплава соответственно.

Прочностные свойства сплава сначала несколько возрастают с ростом температуры старения до 400 °С после закалки, а затем начинают заметно снижаться. При этом пластичность сплава значительно увеличивается.

На рис. 29 представлено электронное изображение сплава меди с железом (2,65%) с оптимальным режимом термообработки. Карты структуры легирующих компонентов указывают на то, что после термообработки включения нерастворенного железа в α -твердом растворе меди в значительной степени измельчаются до 0,1...1 мкм, при этом крупные включения нерастворенного железа 2...5 мкм присутствуют совместно с кислородом, что может указывать на их наличие в виде оксида Fe_3O_4 . (рис. 30).

Разработан режим термообработки низколегированного сплава медь–2,6...2,85 % железа на основе закалки при температуре 1030 °С со старением 1...2 ч (в зависимости от массы отливки) при температуре 500 °С, который позволил повысить прочностные свойства в 1,5 раза до $\sigma = 430...450$ МПа, а твердость до 120 НВ по сравнению с литым состоянием, при небольшом снижении пластичности.

Разработанная технология плавки низколегированного сплава медь–2,6...2,85 % железа, предполагает использование в качестве шихтовых материалов технически чистых меди и железа. В этой связи возникает технологическая необходимость использования образующихся отходов меди, содержащих до 2,6 % железа. При этом не требуется глубокого раскисления расплава до значений бескислородной меди – 0,001 %, так как показано, что железо находится в расплаве в виде оксида Fe_3O_4 .

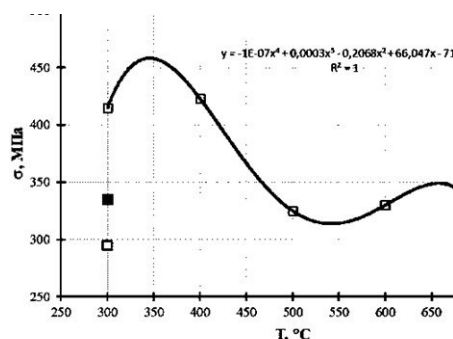


Рисунок 26 - Влияние температуры старения после закалки 1030 °С на σ сплава Cu–2,65%Fe (□ – литое состояние; ■ – после закалки 1030 °С)

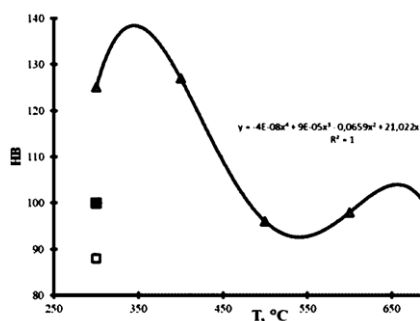


Рисунок 27 - Влияние температуры старения после закалки 1030 °С на твердость НВ сплава Cu–2,65%Fe (□ – литое состояние; ■ – после закалки 1030 °С)

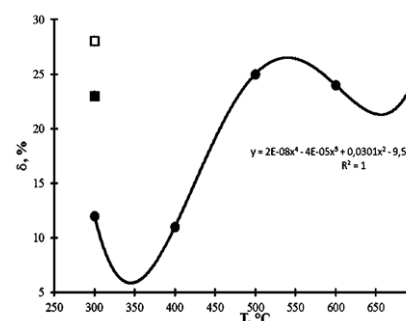


Рисунок 28 - Влияние температуры старения после закалки 1030 °С на пластичность сплава Cu–2,65%Fe (■ – литое состояние; □ – закалка 1030 °С)

Однако диффузионное раскисление углеродом невозможно в виду значительного отклонения от закона Генри для разбавленных растворов расплава меди с железом. Поэтому при плавке меди, загрязненной железом, рекомендуется использовать перед разливкой добавки фосфора (0,01...0,1%) для окончательного раскисления меди и разжижения шлака. Такое раскисление расплава фосфором приведет фактически к появлению уже не двухкомпонентного сплава Cu–Fe, а трехкомпонентного Cu–Fe–P.

Процесс переплава сплава медь–2,65 % железа проводили в индукционной высокочастотной печи ИСТ 006 в графитошамотном тигле в форсированном режиме под покровом мелкодисперсного коксика крупностью 1...5 мм.

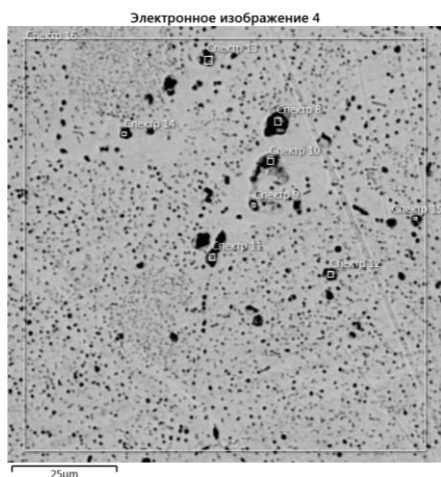


Рисунок 29 - Электронное изображение структуры сплава медь–железо после термообработки: закалка 1030 °С со старением 1 ч при температуре 500 °С

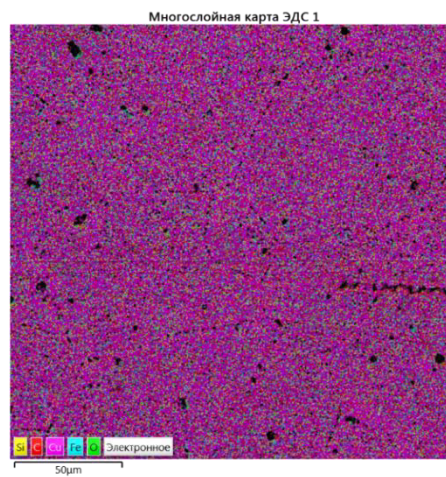


Рисунок 30 – Многослойная карта распределения легирующих компонентов в сплаве медь–железо после ТО

Технологические этапы плавки включали: расплавление сплава в чушках, наведение покровного флюса, раскисление расплава лигатурой МФ10, нагрев до температуры 1220...1240 °С и разлив в изложницы.

Химический состав сплава повторного переплава представлен в табл. 5.

Таблица 5 – Химический состав Cu–Fe сплава вторичного переплава

| Литое состояние | | | После термообработки | | |
|-----------------|---------------|----------------|----------------------|---------------|----------------|
| Элемент | Содержание, % | Погрешность, % | Элемент | Содержание, % | Погрешность, % |
| Cu | 97,63 | 0,25 | Cu | 97,74 | 0,24 |
| Fe | 2,05 | 0,01 | Fe | 1,99 | 0,01 |
| P | 0,072 | 0,011 | P | 0,077 | 0,011 |
| Ni | 0,012 | 0,006 | Zn | 0,167 | 0,013 |
| Zn | 0,226 | 0,013 | Pb | 0,012 | 0,003 |
| Pb | 0,013 | 0,003 | | | |

Можно отметить снижение содержания железа при переплаве на 0,6...0,65 % по сравнению с начальным значением в исходном слитке. Таким образом, при переплаве и раскислении расплава фосфором, происходит окислительное рафинирование расплава от легирующего железа, кроме того, содержание фосфора снижается в три раза который, по-видимому, идет на раскисление расплава.

На рис. 31 представлено электронное изображение, а на рис. 32 многослойная карта распределения легирующих элементов в сплаве вторичного переплава Cu–Fe в литом состоянии.

Анализ распределения элементов позволяет подтвердить наше предположение, что железо находится в растворе вместе с фосфором. Анализ химического состава показал, что выдерживается соотношение содержания Fe к P, которое составляет 12,7, что выше чем предложенные значения в 3 раза, т. е. содержание фосфора ниже, чем необходимо для создания химического соединения в 3 раза. Анализ распределения железа и фосфора после ТО закалка со старением указывает на измельчение включений железа после термообработки с образованием дисперсных включений. Это подтверждается ростом микротвердости в местах выделения твердых включений.

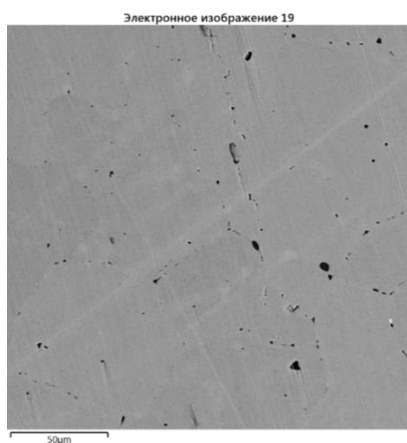


Рисунок 31 - Электронное изображение структуры сплава медь–железо вторичного переплава в ЛС

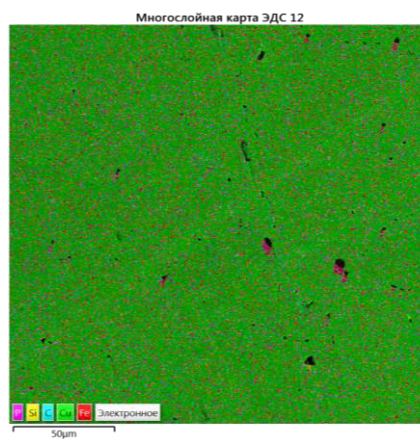


Рисунок 32 – Многослойная карта распределения легирующих элементов в сплаве вторичного переплава Cu–Fe в ЛС

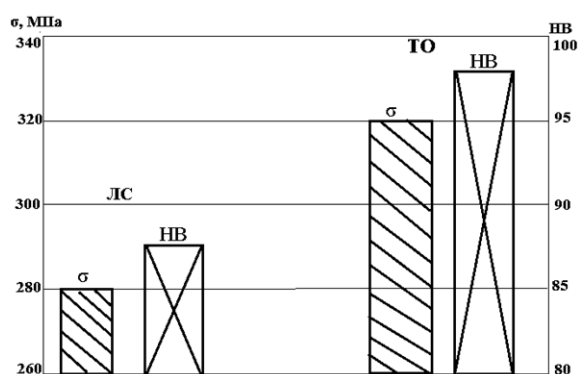


Рисунок 33 – Механические свойства сплава медь–железо вторичного переплава в литом состоянии (ЛС) и после термообработки (ТО):

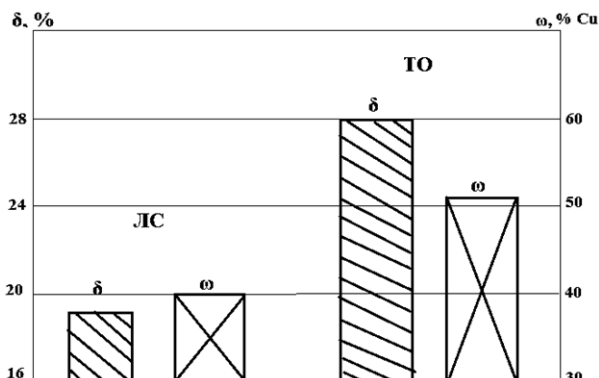


Рисунок 34 – Относительное удлинение и электропроводность сплава медь–железо вторичного переплава в литом состоянии (ЛС) и после термообработки (ТО)

Все это говорит об увеличении механических свойств и электропроводности сплава Cu–Fe после первого переплава. Механические свойства сплава медь–железо вторичного переплава представлены на рис. 33 в виде гистограмм. Наблюдается увеличение прочностных свойств сплава после первого переплава: предел прочности возрастает на 40 МПа, а твердость по Бринеллю на 10 единиц, что связано с образованием твердого раствора железа в меди с выделениями включений железа и фосфора. На рис.34 представлены изменения относительного удлинения и электропроводности сплава после первого переплава. Пластичность возрастает на 40 %, но наиболее характерно проявление структуроизменения с образованием твердого раствора выражено в характере изменения электропроводности, которая увеличивается на 22 % по сравнению с технической чистой медью.

Одним из перспективных направлений применения низколегированных сплавов меди с железом представляется актуализация их использования в деталях трения, в том числе высоконагруженных. Такие детали применяются в узлах трения различных машин и механизмов, в электротехнике в качестве скользящих токосъемных контактов. В этой связи были проведены исследования антифрикционных свойств двухкомпонентного сплава меди с железом. Испытания проводили в целях оценки антифрикционной работоспособности двухкомпонентного сплава медь–2,65% железа. Исследовали влияние длительности испытаний, условного расстояния и количества кругов образцов на износ, коэффициент трения и антифрикционные свойства сплава. Можно отметить, что коэффициент трения и глубина вхождения контртела в сплав образца, претерпевшего термообработку, а также при учёте использования смазочного материала, значительно ниже, чем у других образцов. Из чего

можно сделать вывод о более низком трении между образцом и диском. Применение низколегированного сплава с учётом термообработки значительно снижает фрикционный износ компенсаторов высоконагруженных шестеренных насосов, особенно в условиях трения со смазкой.

В табл. 6 представлены сравнительные триботехнические свойства некоторых бронз и сплава Cu–2,65%Fe

Таблица 6 – Сравнительные антифрикционные свойства бронз и сплава медь–2,65% железа

| Сплав | Сухое трение | | Трение со смазкой | | После ТО, смазка | |
|----------------|--------------|---------------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|
| | $K_{тр}$ | Относительный износ | $K_{тр}$ | Относительный износ | $K_{тр}$ | Относительный износ |
| БрО5Ц5С5 | 0,14 | - | 0,047 | $4,5 \cdot 10^{-5}$ | | |
| БрО10Ф1 | 0,32 | | 0,052 | $3 \cdot 10^{-5}$ | | |
| БрА9Ж4 | 0,19 | | 0,055 | $2,5 \cdot 10^{-5}$ | | |
| Cu– 2,65%Fe | 1,24 | $1,5 \cdot 10^{-7}$ | 0,69 | $1,87 \cdot 10^{-7}$ | 0,047 | $9 \cdot 10^{-10}$ |

Для сплава медь–2,65% железа при более высоком $K_{тр}$ значения относительного износа на два порядка ниже, чем для традиционных бронз, которые применяются для изготовления деталей трения, работающих в парах трения со сталью (компенсаторы и втулки высоконагруженных шестеренных насосов). Особенно высокая безыносность отмечается у опытного сплава Cu–2,65%Fe после термообработки и применения смазки (на четыре порядка).

Глава 6. Разработка технологии получения фасонных отливок из сплавов медь–2,65% железа

Выше было показано, что существенные перспективы применения для развивающихся технологий машиностроения представляют низколегированные сплавы системы меди с железом.

Основные и вновь возникающие области современного машиностроения с применением низколегированных сплавов меди в двигательных системах на электрической тяге – железнодорожный транспорт, судостроение, тяжелое машиностроение и автомобильная промышленность. Перспективные области применения включают использование медных деталей в силовой электронике, в цепях с большой силой тока и в системах терморегуляции, а также в системах зарядки аккумуляторных батарей электромобилей. Обещающие результаты можно ожидать и в двигательных системах на основе использования эффекта сверхпроводимости, включая изготовление сверхкрупных корабельных двигательных установок.

Разработанные сплавы предлагаются к применению:

- в двигательных системах на электрической тяге – железнодорожный транспорт (Fe – 0,25 %; P – 0,06 %; Cu – остальное);
- судостроение (Fe – 1,0 %; Zn – 0,35 %; P – 0,3 %; Cu – остальное);
- тяжелое машиностроение и автомобильная промышленность (Fe – 2,0 %; Zn – 0,05...0.2 %; P – 0,15 %; Cu – остальное);
- антифрикционные сплавы в гидроприводах машин и механизмов (Fe – 2,65 %; Cu – остальное).

Моделирование процесса изготовления отливок из низколегированных медных сплавов проводили с помощью программы ProCAST на примере отливки из сплава медь–железо (высоковольтная арматура). Габаритные размеры отливки: длина 100 мм, ширина 20...30 мм, толщина 3...5 мм. В кокиле с габаритными размерами: ширина 240 мм, высота 220 мм, толщина 20 мм предусмотрено изготовление четырех отливок. На рис. 35 представлено поле распределения температур после полного затвердевания формы. Визуально и при помощи программного обеспечения ProCAST дефектов в отливках не обнаружено. На рис.36

представлены результаты расчета кристаллизации (распределение твердой фазы, усадочная пористость). После полного затвердевания за 18,14 с усадочная пористость не превышает 1%, и в основном, сосредоточена в местах утолщения отливки в отдаленной части формы. Появление пористости связано с небольшим интервалом кристаллизации сплава около 11 °С.

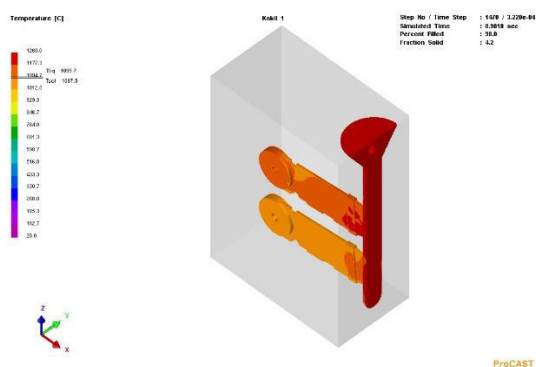


Рисунок 35- Поле распределения температуры при заполнении формы на 98%

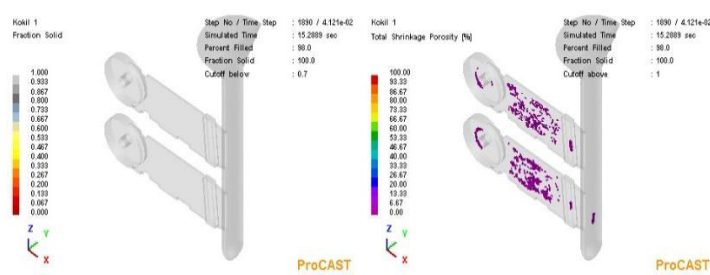


Рисунок 36 - Результаты расчета кристаллизации (распределение твердой фазы, усадочная пористость)

В результате моделирования технологического процесса кокильного литья получены результаты, позволяющие подтвердить возможность получения кокильных отливок из сплава медь–железо. В целях сопоставления полученных результатов моделирования способа кокильного литья на основе сплава медь–железо проведена отработка технологического процесса литья для технической чистой меди марки М1 с аналогичными исходными параметрами. В результате сравнения результатов моделирования процесса кокильного литья сплава медь–железо и технической чистой меди марки М1 установлено, что наблюдается общее снижение температурно-временных параметров заполнения и количество твердой фракции при заполнении формы. Можно отметить более высокие показатели пористости чистой меди марки М1 при заливке по сравнению с инновационным сплавом медь–железо.

Моделирование процесса изготовления отливки способом литья по выплавляемым моделям проводили на примере отливки из сплава медь–железо (токосъемные элементы). Габаритные размеры отливки: высота 60 мм, ширина 40 мм, толщина стенки отливки 5...10 мм. Габаритные размеры форм: высота 200 мм, диаметр 150 мм.

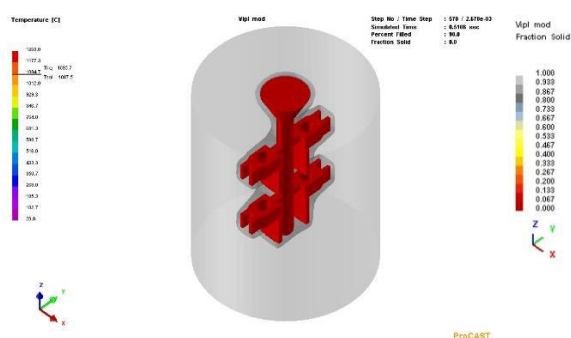


Рисунок 37 - Поле распределения температуры при заполнении формы на 98 %.

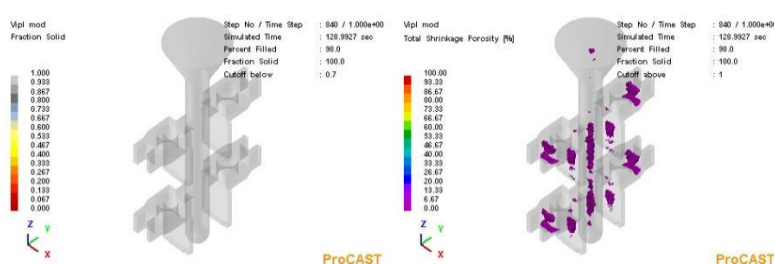


Рисунок 38 - Результаты расчета кристаллизации (распределение твердой фазы, усадочная пористость и изменение температуры) сплава медь–железо способом ЛВМ

На рис. 36 представлены результаты расчета кристаллизации (распределение твердой фазы, усадочная пористость), а на рис. 37 – поле распределения температур после полного затвердевания формы. Время затвердевания составило 129 с. Визуально и при помощи программного обеспечения ProCAST дефектов в отливках не обнаружено. После полного затвердевания за 129 с усадочная пористость не превышает 2%, и в основном сосредоточена в

местах утолщения отливки в отдельные части формы. Появление пористости связано с небольшим интервалом кристаллизации сплава около 9 °С.

В целях сопоставления полученных результатов моделирования способа литья по выплавляемым моделям на основе сплава медь–железо проведена отработка процесса для технически чистой меди марки М1 с аналогичными исходными параметрами.

В результате сравнения результатов моделирования СКМ ProCAST технологического процесса литья по выплавляемым моделям сплава медь–железо и технически чистой меди марки М1 установлено, что наблюдается общее снижение температурно-временных параметров заполнения и количество твердой фракции при заполнении формы, что связано с более низкой температурой плавления технически чистой меди (на 10 °С) и соответственно более высоким перегревом над температурой ликвидус, а также минимальным интервалом кристаллизации 1,5 °С.

Отработку технологических режимов литья ЛКД проводили на технически чистой меди марки М1, которая позволяет упростить технологию подготовки расплава при высокой сопоставимости результатов с низколегированным сплавом меди с железом. Исследовали влияние механического давления на условия затвердевания и охлаждения, кинетику уплотнения при затвердевании отливок типа стакана из меди М1. Отливки с наружным диаметром 60 мм, высотой 60 мм и толщиной стенки 20 мм изготавливали в условиях пуансонного и поршневого прессования.

Общие закономерности формирования структуры слитков из меди, изготавливаемых при поршневом прессовании, справедливы и для отливок типа стакана, получаемых при пуансонном прессовании. Принудительное выдавливание расплава выступающей частью прессующего пуансона во время формообразования (до приложения давления) отливки существенно влияет на структуру. На рис. 39,40 представлены кривые охлаждения при изменении номинального давления и относительном перемещении прессующего пуансона при пуансонном прессовании, а на рис. 41, 42 при поршневом прессовании.

С увеличением давления наряду с уменьшением протяженности зоны столбчатых кристаллов измельчается зерно по высоте стенки отливки, но наименьший средний размер зерна относится к верхним зонам, несколько больший – к средним и наибольший – к нижним, что также связано с перемещением расплава пуансоном во время формообразования отливки. Наибольшее измельчение структуры, а также различие в размере зерен по высоте отливки происходит при повышении давления до 100...150 МПа. При давлении свыше 150 МПа размеры зерен во всех зонах по высоте стенки отливки становятся практически одинаковыми. Для получения качественных слитков желательное повышение давления прессования и начальной температуры пресс-формы, снижение температуры заливки и температуры расплава в момент приложения давления (рис. 43).

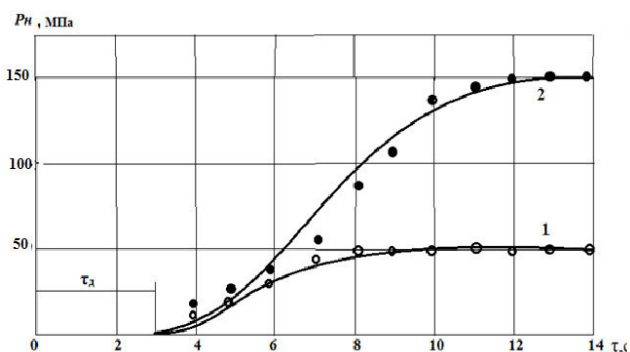


Рисунок 39 – Изменения номинального давления при пуансонном прессовании:
1 – $P_H = 50$ МПа; 2 – $P_H = 150$ МПа

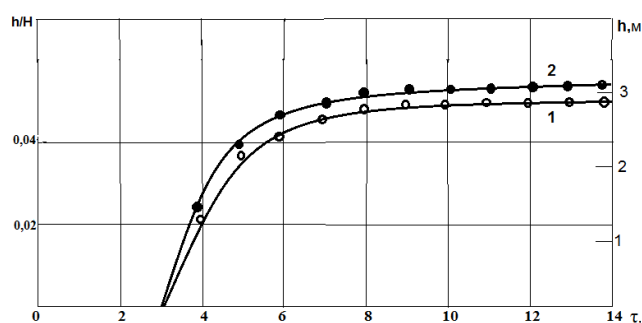


Рисунок 40 - Относительное перемещение прессующего пуансона при пуансонном прессовании:
1 – $P_H = 50$ МПа; 2 – $P_H = 150$ МПа.

Наблюдается увеличение электропроводности низколегированного сплава меди с железом (рис.44), которая увеличивается на 7...8 % с увеличением давления прессования до 200 МПа по сравнению с проводимостью чистой меди, что, по-видимому, связано с уплотнением и измельчением структуры литого металла при ЛКД.

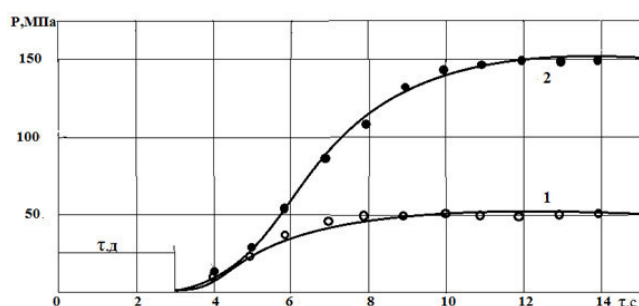


Рисунок 41- Изменения номинального давления при поршневом прессовании:
1 – $P_n = 50$ МПа; 2 – $P_n = 150$ МПа

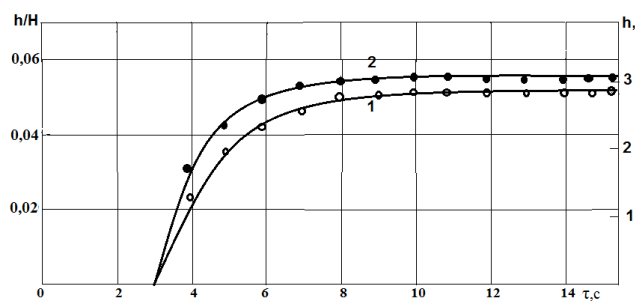


Рисунок 42 - Относительное перемещение прессующего пуансона при поршневом прессовании:
1 – $P_b = 500$ МПа; 2 – $P_b = 1500$ МПа ($T_p = 1140$ °С; $T_{пф} = 150$ °С; $t_d = 3$ с)

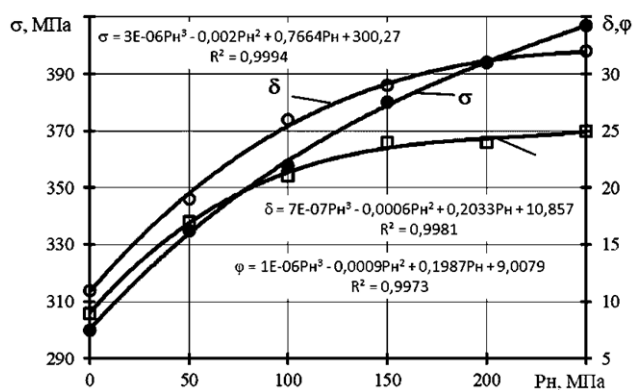


Рисунок 43– Влияние давления при кристаллизации ЛКД на механические свойства низколегированного сплава медь–2,65% железа

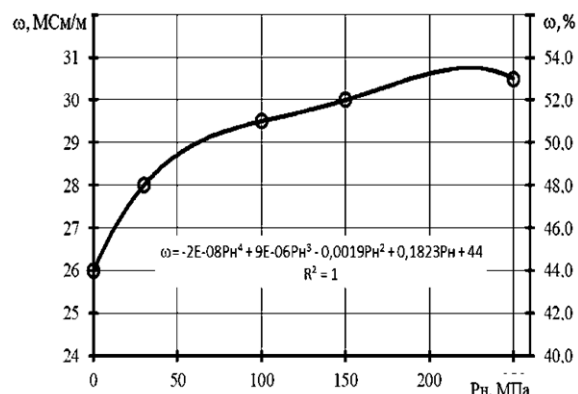


Рисунок 44 - Влияние давления прессования на проводимость низколегированного сплава медь– 2,65% железа

В результате проведенных исследований предложены технологические режимы изготовления отливок из низколегированных сплавов меди с железом. Для этого применяется пуансонно-поршневая технология прессования. Температура пресс-формы должна быть не ниже 200 °С при температуре заливки сплава 1220...1240 °С. Номинальное давление прессование P_n не ниже 180...200 МПа. Такая технология позволяет повысить прочностные свойства сплава при увеличении электропроводности и антифрикционных свойств.

Для изготовления компенсаторов для высоконагруженных насосов представляется перспективным применение низколегированного сплава медь–2,65% железа вместо алюминиевой бронзы. При изготовлении компенсаторов характерно использование модели пуансонно-поршневого прессования. Использование термообработки сплава меди с железом значительно повышает антифрикционные свойства в условиях сухого трения и трения со смазкой, что позволяет повысить работоспособность насоса на 25...30 %. Толщина компенсатора из сплава Cu–2,65 % Fe, изготовленного методом ЛКД, для обеспечения таких же требований по прочности и надежности может быть уменьшена до 9 мм при сохранении антифрикционных свойств. Традиционная технология изготовления компенсаторов толщиной 10,5 мм предполагает их изготовление механической обработкой из проката алюминиевой бронзы.

Результаты промышленных испытаний.

Изготовлены компенсаторы способом ЛКД из двухкомпонентного сплава медь–2,65 % железа на “НПО Гидравлика“ (п. Новый Быт, Мос.обл.). Насосы прошли испытания на “НПО Гидравлика“ и ООО «ГД ВИПОМ» (г. Орел). Продолжительность работы насосов на 25...30 % выше, чем с компенсаторами, изготовленными из сплава БрА9Ж4. Проведены расчеты ожидаемого экономического эффекта за счет замены компенсаторов в высоконагруженных шестеренных насосах, которые составили: снижение себестоимости (Эг) ремонта насосов 34 721 820 руб.; снижение приведенных затрат (Э) 72 746 280 руб.

На ООО «Лугасталь» (ЛНР) разработана технология изготовления корпусных отливок из сплава медь–железо для изготовления отливок электронного корпусного машиностроения методом литья в песчаные формы на лингосульфатном связующем.

На ГУП ЛНР «Лутугинский научно-производственный валковый комбинат» отлита опытная партия отливок из сплава медь–железо: высоковольтная арматура в количестве 100 шт. Внешний вид отливок при визуальной оценке не имел видимых дефектов и соответствовал требованиям ГОСТ 17819–84 к отливкам, изготовленным методом кокильного литья из медных сплавов.

На НПЦ «Трансмаш» (ЛНР) способом ЛВМ отлита опытная партия отливок из сплава медь–железо с высокой теплоотдачей элементов в количестве 100 шт. Внешний вид отливок при визуальной оценке не имел видимых дефектов и соответствовал принятым по ОСТ 1 90046–72 требованиям к отливкам, изготовленным методом точного литья по выплавляемым моделям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа предельных значений растворимости легирующих элементов в меди проведена систематизированная оценка физико-химических критериев прочностного легирования в неравновесном состоянии медных низколегированных сплавов.

2. Впервые разработана теоретическая модель структурной матрицы литейных низколегированных медных сплавов. Уточнен механизм влияния физических воздействий легирующих элементов, их детерминированные количественные значения в низколегированных сплавах на основе меди.

3. Впервые проведена критериальная оценка неравновесной диаграммы состояния низколегированных сплавов меди с железом в интервале перитектического превращения, на основе которой установлены параметры кристаллизации сплава (температурный интервал, концентрационный интервал кристаллизации, коэффициент распределения), определяющие технологичность сплавов системы меди с железом для синтеза литейных сплавов.

4. Установлено, что систему медь–кислород при температуре плавления можно отнести к системам с отрицательным отклонением от закона Генри, т.е. кислород будет более активен к соединению с любым легирующим компонентом. Содержание кислорода в расплаве при открытой плавке меди не должна превышать 0,001...0,01 % (по массе) перед введением легирующих элементов.

5. Термодинамический анализ взаимодействия железа и кислорода в расплаве меди показал, что при совместном присутствии железа до 0,1 % и фосфора, содержание кислорода должно быть ограничено 0,01...0,1 % (по массе). При более высоких содержаниях железа, которое необходимо растворить в медном расплаве (выше 0,1 %), необходимо проведение операции раскисления расплава.

6. Установлено, что в меди с железом в литом и термообработанном состоянии, кислород в сплаве находится в виде инертного химического соединения Fe_3O_4 . После раскисления расплава фосфором, железо образует с фосфором фосфид железа Fe_3P , который после термообработки распадается с образованием твердого раствора железа в меди и дисперсных выделений железа.

7. Впервые проведены расчеты диффузионного раскисления меди графитосодержащими элементами перед введением в расплав железа, которые установили, что степень раскисления

меди может быть ограничена содержаниями кислорода 0,008...0,01 % (по массе). Установлено, что длительность диффузионного раскисления меди (коксик, графитовая крошка) до искомых значений может быть достигнута за 10...15 мин.

8. Установлено, что легирование меди небольшими добавками железа оказывает существенное влияние на ее литейно-технологические свойства. 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.

9. Впервые разработана технология плавки низколегированных сплавов меди с железом на основе применения диффузионного раскисления меди углеродом перед введением в расплав железа, которое вводится в расплав в виде технически чистого электротехнического железа АРМКО. На указанные регламенты получен Патент на изобретения.

10. На основе теории растворного упрочнения разработан режим термообработки: закалка 1030 °С плюс старение 1...2 ч (в зависимости от массы отливки) при температуре 500 °С сплава медь–2,6...2,8%железа, который позволил повысить прочностные свойства (σ , НВ) в 1,5 раза: σ до 430...450 МПа, твердость до 120 НВ по сравнению с литым состоянием при небольшом снижении пластичности. Электропроводность при этом составляет 60 % по сравнению с технически чистой медью марки М0.

11. Установлено, что применение сплава меди с железом для изготовления деталей трения позволяет снизить показатели износа на четыре порядка, что приводит к увеличению работоспособности пары трения сплава Cu–2,65%Fe со сталью в 1,5...2 раза. Антифрикционные сплавы имеют износостойкость в 2...4 раза выше, чем у оловянных бронз Бр05Ц5С5, Бр010Ф1 и алюминиевой бронзы БрА9Ж4.

12. Впервые проведено компьютерное моделирование зависимости прикладываемого давления (увеличения до 250 МПа) на процесс затвердевания цилиндрической отливки из низколегированного сплава медь–железа с использованием программного комплекса ProCAST которая до настоящего времени не применялась для способа литья с кристаллизацией под давлением (ЛКД).

13. Установлено, что при кристаллизации способом ЛКД под поршневым давлением прессования отливок из низколегированных сплавов меди с железом, в сравнении с гравитационным кокильным литьем (при атмосферном давлении), изменяется как картина процесса затвердевания отливки, так и направление теплоотода в пуансон, что приводит к смещению зоны образования усадочной пористости в нижнюю часть отливки и в зависимости от величины прикладываемого давления (увеличения до 250 МПа) ее устранению.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. Дальнейшую работу по тематике диссертации возможно продолжить в следующих направлениях:

1. Разработка низколегированных литейных сплавов меди с никелем (до 2,5 % по массе);
2. Разработка низколегированных литейных сплавов меди с никелем, которые могут быть рекомендованы для изготовления жаростойких и окалиностойких отливок.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Монографии:

1. Семенов К.Г. Низколегированные сплавы на основе меди для инновационных технологий машиностроения: монография / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, С.Н. Панкратов. - Курск: Университетская книга, - 2018. - 153 с. (6 п.л.)
2. Батышев К.А. Современные технологии производства отливок из сплавов цветных металлов / К.А. Батышев, К.Г. Семенов, Ю.А. Свинороев. - Москва: Первый том, 2020. -150 с. (2,8 п.л.)
3. Семенов К.Г. Технология плавки низколегированных никелевых сплавов для современного машиностроения / К.Г. Семенов. – Москва: Первый том, -2021. – 76 с. (4,75 п.л.)

Публикации в научных изданиях, индексируемых в Международных базах данных, перечень которых определен в соответствии с рекомендациями ВАК Минобрнауки РФ (Web of Science, Scopus, PubMed, MathSciNet, zbMATH, Chemical Abstracts, Springer, GeoRef)

1. Semenov, K.G. Effective cover-and-protective flux in melting copper, nickel and their alloys / K.G. Semenov, B.A. Fochenkov // Litejnoe Proizvodstvo. 2003. (7). P. 12–14. Scopus (0,1 п.л.)
2. Fochenkov B.A. Melting of beryllium bronzes in the atmosphere of shielding gas / B.A. Fochenkov, K.G. Semenov, A.D. Likharev, D.P., Lovtsov // Tsvetnye Metally. 2003. (12). P. 78–81. Scopus (0,1 п.л.)
3. Mochalov N.A. Open melting of oxygenfree copper / N.A. Mochalov, K.G. Semenov, B.A. Fochenkov // Litejnoe Proizvodstvo. 1998. (2-3). P. 25-26. Scopus (0,1 п.л.)
4. Fochenkov B.A. Does the metal melting in electric induction furnaces with one-directional bronze BrAZh9-4 melt motion improve metal quality (Article) / B.A. Fochenkov, K.G. Semenov // Avtomobil'naya Promyshlennost. 2001. Issue 5. P. 27-28. Scopus (0,1 п.л.)
5. Svinoroev Y. Application of Liquid Glass Mixtures with Improved Knocking-Out Ability in Castings Production for Railway Transport / Y. Svinoroev, K. Batyshev, V. Deev, K. Semenov, V. Bykadorov, E. Prusov // Archives of foundry engineering. – 2019. Vol. 19. Issue 3. P. 27 – 32. Scopus (0,1 п.л.)
6. Svinoroev Y.A. The evaluation of possibilities of modern level casting bindings on the technological lignin basis practical appliance / Y.A. Svinoroev, V.V. Dyadichev, K.A. Batyshev, K.G. Semenov, A.V. Dyadichev, S.Y. Chornobay, S.G. Menyuk // International scientific practical conference materials science, shape-generating technologies and equipment .2020 . Vol. 315.- Art. 03004. Web of Science (0,1 п.л.)
7. Semenov K.G. Study of the heat treatment modes of a two-component innovative copper-iron alloy/ K.G. Semenov, K.A. Batyshev, V.B. Deev, Y.A. Svinoroev // Tsvetnye Metally. 2022. (5). P.73–78. Scopus (0,2 п.л.)
8. Semenov K.G. Examining the properties of low-alloy copper-iron alloy made of secondary materials / K.G. Semenov, K.A. Batyshev, V.B. Deev, Y.A. Svinoroev // Tsvetnye Metally. 2022. (11). PP.81–86. Scopus (0,2 п.л.)

Публикации в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Колосков В.Ф. Покровно-рафинирующий флюс для плавки медно-никелевых сплавов / В.Ф. Колосков, К.Г. Семенов, Н.А. Степанов, В.М. Чурсин // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1996. - № 4. - С.22-24. (0,1 п.л.)
2. Молчанов В.А. Открытая плавка бескислородной меди / В.А. Молчанов, К.Г. Семенов, Б.А. Фоченков // Литейное производство. -1998. - № 2-3. С. 25-26,39. (0,1 п.л.)
3. Чурсин В.М. Рациональное использование отходов меди, загрязненных железом на металлургических предприятиях / В.М. Чурсин, К.Г. Семенов // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2000. - № 2. - С.37–40. (0,1 п.л.)
4. Семенов К.Г. Совершенствование технологии подготовки расплава меди для литья слитков / К.Г. Семенов, Б.А. Фоченков, Д.П. Ловцов // Литейщик России. – 2002. - № 2. - С. 30-32. (0,1 п.л.)
5. Семенов К.Г. Эффективный покровно-защитный флюс при плавке меди, никеля и их сплавов / К.Г. Семенов, Б.А. Фоченков // Литейное производство. – 2003. - №7. - С.12-14. (0,1 п.л.)
6. Семенов К.Г. Опыт производства меди марки М1р на основе вторичных шихтовых материалов / К.Г. Семенов, С.Ф. Филиппов // Литейщик России. – 2003. - № 6. - С. 13-14. (0,1 п.л.)
7. Семенов К.Г. Анализ качества чушковой меди, выплавленной из вторичных шихтовых материалов / К.Г. Семенов, С.Ф. Филиппов // Металлургия машиностроения. – 2007. - №2. - с. 2. (0,1 п.л.)
8. Семенов К.Г. Особенности кристаллизации низколегированных сплавов в системе медь–железо / К.Г. Семенов, М.Е. Шаршуев // Технология металлов. – 2011. - № 5. - с. 22–25. (0,1 п.л.)
9. Семенов К.Г. Критерии оценки диаграмм состояния системы медь–железо / К.Г. Семенов, М.Е. Шаршуев // Технология металлов. – 2011. - №6. - С. 22–25. (0,1 п.л.)
10. Панкратов С.Н. Герметичность отливок из меди при легировании оловом и железом / С.Н. Панкратов, К.А. Батышев, К.Г. Семенов // Международный научный журнал. – 2014. - № 4. - С.90-93. (0,1 п.л.)

11. Панкратов С.Н. Влияние малых добавок легирующих элементов на плотность отливок из Cu- сплавов / С.Н. Панкратов, К.А. Батышев, К.Г. Семенов // Литейное производство. – 2014. - №5. - С. 5-7. (0,1 п.л.)
12. Панкратов С.Н. Влияние микролегирувания на литейные свойства меди / С.Н. Панкратов, К.А. Батышев, К.Г. Семенов // Заготовительные производства в машиностроении. - 2014. - № 9. - С. 18-20. (0,1 п.л.)
13. Панкратов С.Н. Влияние малых легирующих элементов на литейные свойства меди / С.Н. Панкратов, К.А. Батышев, К.Г. Семенов // Литейщик России. – 2014. - №. 10. -С. 37-39. (0,1 п.л.)
14. Панкратов С.Н. Разработка современных низколегированных медных сплавов для машиностроения / С.Н. Панкратов, К.Г. Семенов, С.В. Колосков // Металлургия машиностроения. - 2015. - № 4. – С.19-21. (0,1 п.л.)
15. Семенов К.Г. Низколегированные сплавы меди для новых технологий / К.Г. Семенов, С.Н. Панкратов, С.В. Колосков // Металлургия машиностроения. - 2015. - № 5. - С. 22-24. (0,1 п.л.)
16. Панкратов С.Н. Исследование трещиностойкости низколегированных медных сплавов / С.Н. Панкратов, К.Г. Семенов, К.А. Батышев // Литейщик России. – 2016. - №. 4. - С. 35-36. (0,1 п.л.)
17. Семенов К.Г. Особенности плавки бескислородной меди в индукционных канальных печах / К.Г. Семенов, В.В. Чернов // Электрометаллургия. – 2016. - №12. - С. 2-6. (0,1 п.л.)
18. Семенов К.Г. Металлургические особенности выплавки бескислородной меди в индукционных печах / К.Г. Семенов, В.В. Чернов, С.В. Колосков // Современные материалы, техника и технологии. Научно-практический журнал. – 2016. - №5(8). - С.170-177. (0,2 п.л.)
19. Семенов К.Г. Разработка составов низколегированных медных сплавов для машиностроительных технологий / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, В.В. Чернов, С.Н. Панкратов // Современные материалы, техника и технологии. Научно-практический журнал. 2017. №1(9). С. 190 – 195. (0,1 п.л.)
20. Семенов К.Г. Технологические особенности производства отливок из медных сплавов для машиностроения. Ч I. Современные медные сплавы / К.Г. Семенов // Металлургия машиностроения. - 2017. -№ 3. -С. 27 – 30. (0,2 п.л.)
21. Семенов К.Г. Технологические особенности производства отливок из медных сплавов для машиностроения. Ч II. Технология медных сплавов / К.Г. Семенов // Металлургия машиностроения. - 2017. - № 4. - С. 34- 39. (0,3 п.л.)
22. Семенов К.Г. Получение новых низколегированных сплавов систем Cu—Fe для отливок в машиностроении / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, С.Н. Панкратов // Технология металлов. – 2017. - №8. - С. 2-6. (0,1 п.л.)
23. Семенов К.Г. Особенности плавки низколегированных сплавов на основе меди в индукционных печах / К.Г. Семенов, К.А. Батышев // Электрометаллургия. - 2017. - № 9. - С. 2-6. (0,1 п.л.)
24. Семенов К.Г. Об особенностях плавки и литья низколегированных сплавов Cu-Fe / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, С.Н. Панкратов, В.В. Чернов // Литейное производство. – 2018. - № 4. - С.13-16. (0,1 п.л.)
25. Семенов К.Г. Особенности выплавки низколегированных никелевых сплавов в индукционных печах для получения фасонного литья / К.Г. Семенов, К.А. Батышев // Электрометаллургия. 2018. № 5. С. 2-6. (0,1 п.л.)
26. Семенов К.Г. Анализ легирующих элементов для синтеза низколегированных сплавов на основе меди / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, В.В. Чернов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. - Т. 16, - № 9. - С. 423-425. (0,1 п.л.)
27. Батышев К.А. Фасонные отливки из низколегированных сплавов меди/ К.А. Батышев, А.П. Попов, К.Г. Семенов // МИР ТРАНСПОРТА. 2018.– Т. 16, -№ 6. -С. 42–47. 0,1 п.л.
28. Семенов К.Г. Проявление наследственности в процессах плавки низколегированных медных сплавов / К.Г. Семенов // Металлургия машиностроения. – 2019. - № 1. - С. 5-7. (0,1 п.л.)
29. Семенов К.Г. Особенности раскисления низколегированных медных и никелевых сплавов при плавке в индукционных печах / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, В.В. Чернов // Электрометаллургия. – 2019. - № 3. - С. 9-13. (0,1 п.л.)
30. Семенов К.Г. Металлургические особенности подготовки расплава низколегированных медных сплавов / К.Г. Семенов //Литейщик России. – 2019. - № 6. С. 19-22. (0,3 п.л.)

31. Семенов К.Г. Особенности технологии получения низколегированных сплавов меди с железом / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, С.Н. Панкратов, В.В. Чернов // *Электromеталлургия*. - 2020. - № 7. - С. 3-8. (0,1 п.л.)
32. Семенов К.Г. Низколегированные сплавы на основе меди / К.Г. Семенов // *Литейщик России*. - 2020. - № 3. - С. 40-44. (0,3 п.л.)
33. Семенов К.Г. Отливки из низколегированных сплавов меди с железом / К.Г. Семенов // *Металлургия машиностроения*. - 2021. - № 2. - С. 38-41. (0,3 п.л.)
34. Семенов К.Г. Литейно-технологические свойства низколегированной меди с железом / К.Г. Семенов // *Литейное производство*. - 2021. - № 4. - С. 2-4. (0,3 п.л.)
35. Батышев А.И. Литье с кристаллизацией под давлением меди / А.И. Батышев, К.А. Батышев, К.Г. Семенов // *Литейное производство*. - 2021. - № 4. - С. 16-18. (0,1 п.л.)
36. Семенов К.Г. Термодинамика диффузионного раскисления углеродом при плавке низколегированных сплавов меди / К.Г. Семенов // *Литейщик России*. - 2021. - № 12. - С. 29-34. (0,1 п.л.)
37. Семенов К.Г. Моделирование технологии кокильного литья низколегированных сплавов меди с железом / Семенов К.Г., В.В. Чернов, К.А. Батышев, С.Н. Панкратов // *Литейщик России*. - 2022. - № 2. - С. 37-43. (0,1 п.л.)
38. Семенов К.Г. Моделирование процесса затвердевания отливок из низколегированного медного сплава / Семенов К.Г., В.В. Чернов, К.А. Батышев, С.Н. Панкратов // *Литейное производство*. - 2022. - № 4. - С. 10-11. (0,1 п.л.)
39. Семенов К.Г. Исследование свойств низколегированного сплава меди с железом из вторичных материалов / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, В.Б. Деев, Ю.А. Свинороев // *Цветные металлы*. - 2022. - № 5. - С.73-78. (0,1 п.л.)
40. Семенов К.Г. Исследование антифрикционных характеристик сплава меди с железом / К.Г. Семенов, А.В. Щедрин, К.А. Батышев // *Литейное производство*. - 2022. - № 10. С. 14-15. (0,1 п.л.)
41. Семенов К.Г. Исследование режимов термообработки двухкомпонентного инновационного сплава меди с железом / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, В.Б. Деев, Ю.А. Свинороев // *Цветные металлы*. - 2022. - №11. - С.81-86. (0,1 п.л.)
42. Семенов К.Г. Влияние переплавных процессов на свойства низколегированного сплава меди с железом / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, В.Б. Деев, Ю.А. Свинороев // *Цветные металлы*. - 2023, - № 3, - с. 61-66. (0,1 п.л.)

Публикации в прочих изданиях.

1. Семенов К.Г. Металлургические особенности плавки низколегированных сплавов на основе меди / К.Г. Семенов, С.Ф. Филиппов, М.Е. Шаршуев, П.И. Казаков // *Цветная металлургия*, -2013, - № 6, - с. 44-51 (0,1 п.л.)
2. Семенов К.Г. Низколегированные сплавы Cu-Fe для современного машиностроения / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, С.Н. Панкратов, В.Б. Деев // «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве», Сб. тр 1-ой Межд. науч.-практ. конф / под ред. д.т.н. И.Е. Илларионова. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-та, - 2015, - с. 38-43. (0,1 п.л.)
3. Семенов К.Г. Особенности выплавки низколегированных медных и никелевых сплавов для получения конструкционных материалов машиностроения / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, В.В. Чернов, С.Н. Панкратов // «Прогрессивные литейные технологии», Сб. тр. 1X межд. Науч.-практ. конф. - Москва, Изд. МИСиС - 2017, - с.132-135. (0,1 п.л.)
4. Semenov K.G. Low alloy "cu-fe" for modern machinery / K.G. Semenov, K.A. Batyshev, S.N. Pankratov, N.A. Taranenko // *Экономика. Менеджмент. Инновации*, - 2017, - № 2 (8), - с. 60-64. (0,1 п.л.)
5. Семенов К.Г. Применение фасонных отливок из низколегированных сплавов меди для реновации деталей транспортного машиностроения / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, В.В. Чернов // «Инновационные технологии реновации в машиностроении», посвященной 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сб труд Межд. науч.-техн. конф - М.: ИИУ МГОУ, - 2019, - с. 211-214. (0,1 п.л.)
6. Семенов К.Г. Инновационные низколегированные сплавы на основе меди для производства фасонного литья / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, В.В. Чернов // *Инновационные технологии в литейном производстве: Сборник трудов Межд. науч.-технич. конф. посвящённой 150-летию ф-та «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана / под общ. ред. К. А. Батышева, К. Г. Семенова*. - М.: ИИУ МГОУ, - 2019. - с. 221-223. (0,1 п.л.)

7. Семенов К.Г. Исследование режимов термообработки двухкомпонентного низколегированного сплава медь-железо (2,6%) / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, В.В. Чернов // Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов: Сб. науч. стат. Межд. Науч.-техн. конф. - Курск: Изд-во Юго-Зап. гос. ун-та, - 2020. - с. 166-168. (0,1 п.л.)

8. Батышев К. А. Разработка технологии литья с кристаллизацией под давлением низколегированных сплавов меди с железом / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, А.Д. Ворончихин, Ю. А. Свинороев, Ю. И. Гутько // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: Сб. тезисов докл. V Междунар. науч.-тех. конф. / Под общ. ред. В. А. Козачишина: – Алчевск: Изд. ГОУ ВО ЛНР Дон ГТИ, - 2020 - с. 81-84. (0,1 п.л.)

9. Семенов К.Г. Исследование антифрикционных характеристик сплава меди с железом / К.Г. Семенов, А.В. Щедрин, К.А. Батышев // Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении: Сб. тр. Межд. науч.-технич. конф МашТех 2022: - М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, - 2022, - с. 263-266. (0,2 п.л.)

10. Семенов К.Г. Исследование антифрикционных свойств сплава меди с железом / К.Г. Семенов, А.В. Щедрин, К.А. Батышев, П.А. Гардин // Прогрессивные литейные технологии»: Труды XI Межд. Науч.-прак. конф. / Под ред. проф. В.Д. Белова — М.: Изд МИСиС, - 2022, - с. 369-374. (0,1 п.л.)

Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства на базы данных и программы для ЭВМ:

1. Свид. о гос. регистр. программ для ЭВМ № 2019665755. Программа расчета оптимального состава низколегированного трехкомпонентного сплава на основе меди / К.Г. Семенов, В.В. Чернов, К.А. Батышев, Ю.А., Свинороев, В.Ю. Виноградов; заявл. № 2019663481 от 21.10.2019; опубл. 28.11.2019. - 1 с. (0,2 п.л.)

2. Свид. о гос. регистр. программ для ЭВМ № 2021612076. Программа расчета оптимального состава низколегированного четырехкомпонентного сплава на основе меди / К.Г. Семенов, В.В. Чернов, К.А. Батышев, Ю.А. Свинороев, М.Г. Георгиевский; заявл № 2021611254 от 03.02.2021; опубл. 11.02.2021. -1 с. (0,2 п.л.)

3. Свид. о гос. регистр. программ для ЭВМ № 2022618081. Программа расчета прочностных свойств дисперсионно-твердеющего сплава меди с железом после термического отжига / К. Г. Семенов, В. В. Чернов, М.Г. Георгиевский, К.А. Батышев, Ю.А. Свинороев; заявл. 2022618081 от 22.04.22; опубл. 19.05.22. -1 с. (0,1 п.л.)

4. Пат. № 2781701 МПК С22С 1/02 (2006.01). Низколегированный сплав на основе меди и способ его плавки / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, М.Г. Георгиевский, С.Н. Панкратов, С.В. Колосков, Ю.А. Свинороев; опубл. 17.10.2022. Бюл. № 29. -1 с. (0,1 п.л.)

5. Пат. № 212314 РФ СПК F04 (2022.05). Шестеренный насос / К.Г. Семенов, К.А. Батышев, М.Г. Георгиевский., Ю.А. Свинороев, Е.О. Решиков, А.Д. Ворончихин; заявл. № 2021131502 от 27.10.21; опубл. 15.07.22. Бюл. № 20. 1 с. (0,1 п.л.)

СЕМЕНОВ Константин Геннадьевич

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ПРОИЗВОДСТВА ФАСОННЫХ
ОТЛИВОК ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ
МЕДИ С ЖЕЛЕЗОМ

2.6.3 – Литейное производство

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Издательский центр Московского государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана

Подписано в печать . 2023. Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 2.0.. Тираж 120 экз. Заказ № .

Отпечатана в типографии Издательского центра МГТУ им. Н.Э. Баумана, по адресу
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.