

На правах рукописи



БУСЫГИН Сергей Леонидович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ
НА ОСНОВЕ МЕДИ И АРМИРУЮЩИМИ НАНОРАЗМЕРНЫМИ
ЧАСТИЦАМИ ХРОМА**

2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Довженко Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **Петржик Михаил Иванович**, доктор технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра порошковой металлургии и функциональных покрытий, профессор.

Сметкин Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра механики композиционных материалов и конструкций, доцент.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Защита состоится «20» декабря 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.404.02, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, УЛК 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на официальном сайте университета <https://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Карпов Игорь Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из основных тенденций обеспечения высокой эффективности процессов контактной сварки при производстве арматуры железобетонных конструкций является повышение технического уровня применяемых специальных машин и эксплуатационной работоспособности их сварочного контура со сменным инструментом – электродом на основе создания и применения новых композиционных материалов и технологий их обработки.

В промышленности широкое распространение получили следующие технологии изготовления электродов специальных контактных машин на основе медных низколегированных сплавов: литьем, холодным прессованием, высокоскоростной штамповкой, токарной обработкой проката. Однако традиционные технологии производства, основанные на применении хромовых бронз, имеют ряд недостатков: большие отходы материала в процессе обработки, что значительно увеличивает стоимость; длительная многоцикловая технология и сложный процесс изготовления; ограниченность по форме и размерам; низкие эксплуатационные показатели. Во многих отраслях промышленности получили развитие металлические матричные композиты, армированные твёрдыми частицами. С развитием нанотехнологий армирующие частицы масштабируются до наноуровня для повышения свойств композитов с металлической матрицей. Из различных способов изготовления композитов с металлической матрицей метод затвердевания показал такие преимущества, как высокие формовочные свойства и экономическая эффективность. Однако, когда размеры армирующих частиц достигают наноуровня, то они имеют тенденцию к агломерации.

Необходимость повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик медных сплавов, высокой тепло- и электропроводности, стойкости к деформации и разрушению в широком интервале температур и давлений, являются причиной совершенствования процесса получения композиционного материала Cu–MMNCr (Cu металл - матричный с армированием наноразмерным Cr) и разработки новой малоцикловой технологии изготовления из него электродов контактной сварки.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Разработка принципов создания и технологий синтеза материалов и изделий с многоуровневой (нано-микро-мезо-макро) структурой на основе нанодисперсных порошков, сплавов и соединений металлов, полуметаллов и полупроводников, математического обеспечения и информатики в области сквозных цифровых технологий» (номер FSRZ–2020–0011).

Степень разработанности. Большой вклад в развитие и реализацию направления получения хромовых бронз, а также исследование физических, механических и эксплуатационных свойств этих сплавов внесли отечественные учёные Бочвар Н.М., Гузей Л.С., Николаев А.К., Новиков А.И., Осинцев О.Е., Розенберг В.М., Федоров В.Н. и зарубежные Williams R.O., Nagata K., Nishikawa S., Hou J.P., Kawakatsu J., Rys. J. Теоретическими и экспериментальными исследованиями технологии получения хромовых бронз на основе механического легирования, исключаяющего из технологического процесса производства лигатур

высокотемпературной плавкой, занимались Ловшенко Г.Ф., Ловшенко Ф.Г., Лозиков И.А. и Хина Б.Б.

Многие авторы при получении электропроводных композиционных материалов столкнулись с противоречием: повышение механических свойств приводит к снижению электропроводности материала. В связи с чем установление компромиссного соотношения между повышением прочности, твёрдости и без снижения, а возможно, и с повышением электропроводности является фундаментальным научным вопросом.

Поэтому тема диссертационной работы, связанная с разработкой технологии производства изделий из композиционного материала Cu–MMNCr, получаемого литьем и совмещенным процессом литье - штамповка с операциями термообработки и установлением влияния наноразмерных частиц хрома на формирование структуры и свойств этого материала, является актуальной.

Цель и задачи исследования. Разработка малооперационной технологии производства электродов контактной сварки из композиционного материала с металлической матрицей на основе меди и армирующими наноразмерными частицами хрома (Cu–MMNCr).

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- рассмотреть и проанализировать современное состояние вопроса повышения механических свойств при обеспечении высокой электропроводности материалов с медной матрицей;
- исследовать фракционный состав наноразмерного порошка хрома после помола и разработать способ его введения в расплав;
- изучить методом компьютерного моделирования теплогидродинамику процесса свободной (гравитационной) заливки расплава в металлическую форму, теплового и напряженно - деформированного состояния совмещённой горячей штамповки - прошивки изделий из хромовой бронзы;
- изучить закономерности формирования структуры композиционного материала с металлической матрицей на основе меди при вводе армирующих наноразмерных частиц хрома;
- исследовать структуру и свойства композиционного материала Cu–MMNCr, полученного совмещенным способом литья - штамповки с последующей термической обработкой;
- проанализировать и выявить взаимосвязи между распределением твёрдости и параметрами теплового и напряженно - деформированного состояния в объёме изделия из композиционного материала Cu–MMNCr при совмещённом способе литья - штамповки с последующей термической обработкой;
- разработать малооперационную технологию изготовления электродов контактной сварки из композиционного материала Cu–MMNCr с возможностью переработки вторичного медного сырья.

Научная новизна полученных результатов.

1. Установлено, что за счет образования дефектов структуры при измельчении Cr, краевой угол смачивания медью наноразмерных частиц Cr при

1250 °С составляет 45°, что приводит к увеличению седиментационной устойчивости наноразмерных частиц Cr в расплаве.

2. Впервые изучен характер термогидродинамики свободной заливки расплава в форму для электрода, установлено образование тороидального вихря замедляющего процесс растворения наноразмерных частиц Cr, препятствующего их всплытию на зеркало расплава и определяющего условия формирования структуры и свойств композиционного материала Cu–MMNCr.

3. Впервые предложена модель дисперсно - дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами Cr построенная на гипотезе нечётких множеств: вводимые в расплав меди частицы Cr до 54,6 нм растворяются полностью $\mu(x)=1$ или частично $0<\mu(x)<1$ и выделяются при закалке и старении, а частицы большего размера $\mu(x)=0$ выступают центрами кристаллизации, формируя структуру композиционного материала Cu–MMNCr.

4. Показано, что малые горячие пластические деформации при высокой скорости деформации повышают механические свойства композиционного материала Cu–MMNCr при старении, причём, наибольшее влияние оказывают в комплексе среднее нормальное сжимающее напряжение и интенсивность касательных напряжений, приводящие к повышению плотности дислокаций.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в создании научных основ технологии изготовления легирующе - армирующей таблетированной лигатуры на основе порошка Cu и наноразмерных частиц Cr, включающих способ введения и равномерного распределения наноразмерных частиц Cr в получаемом композиционном материале Cu–MMNCr и малооперационной технологии совмещённого процесса литья - штамповки электродов контактной сварки из композиционного материала Cu–MMNCr, повышающих физико - механические и электропроводные свойства материала. Предложена модель дисперсно - дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди, построенная на гипотезе нечётких множеств.

На основе установленных закономерностей:

1. Разработана технология изготовления легирующе - армирующего компонента в виде таблетки на основе порошка меди и наноразмерных частиц хрома, позволяющая рекомендовать его для получения изделий из хромовых бронз.

2. Создана конструкция инструмента для реализации совмещённого процесса литья - штамповки электродов контактной сварки из композиционного материала Cu–MMNCr на кривошипном двухстоечном прессе.

3. Созданы компьютерные модели:

– объёмной теплогидродинамики свободной (гравитационной) заливки расплава в металлическую форму для получения электрода контактной сварки;

– теплового и напряженно - деформированного объёмного состояния стадии горячей штамповки электрода контактной сварки.

4. Разработаны технологические режимы изготовления электродов контактной сварки.

5. Разработан способ изготовления электродов для контактной сварки, защищенный патентом РФ № 2412035 от 20.02.2011.

6. На основе полученных результатов исследования разработана и опробована в производственных условиях предприятия ООО «ОКБ Микрон» «Технология изготовления электродов контактной сварки из вторичного медного сырья». Проведены промышленные испытания электродов контактной сварки на предприятии АО «ФИРМА КУЛЬТБЫТСТРОЙ». Результаты исследования внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» для подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 «Машиностроение» в дисциплине «Сварка давлением» и подготовке магистров по направлению 15.04.01 «Машиностроение» в дисциплине «Контактная сварка».

Методология и методы исследования.

При выполнении диссертационной работы использованы современные методы исследования: оптическая и электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, термодинамический анализ, методы определения твердости, микротвердости и удельной электропроводности. Компьютерное моделирование процессов литья и штамповки с помощью программ: ProCAST[©], Kompas 3D[©], Deform 3D[©]. Статистическая обработка результатов экспериментов проводилась с использованием пакетов MathCad[©] и Microsoft Office Excel.

Положения выносимые на защиту:

1. Условия получения наноразмерных частиц Cr, включающих их ввод, равномерное распределение, взаимодействие с Cu матрицей и их влияние на механизм структурообразования и свойства электродов контактной сварки из получаемого композиционного материала Cu–MMNCr, малооперационной технологией совмещённого способа литья - штамповки.

2. Исследование механизмов образования в расплаве тороидального вихря не позволяющего не растворившимся наноразмерным частицам хрома всплывать на зеркало расплава и оказывающим влияние на формирование структуры и свойств композиционного материала Cu–MMNCr.

3. Механизмы обеспечения дисперсного и дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди.

4. Взаимосвязи между распределением твёрдости и параметрами теплового и напряженно - деформированного состояния в объёме изделия из композиционного материала Cu–MMNCr при совмещённом способе литья - штамповки с последующей термической обработкой. Обоснование повышения количества сварных соединений с увеличением твёрдости НВ, микротвёрдости НV и удельной электропроводности.

Степень достоверности результатов работы.

Достоверность полученных экспериментальных результатов основаны на использовании современных методов исследований, согласованностью с известными литературными данными, воспроизводимостью, использованием современного оборудования, а также подтверждены публикациями, выступлениями на конференциях, патентом.

Апробация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих Российских и Международных конференциях, форумах: IV Международная научно - практическая конференция с элементами научной школы для молодых ученых «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», г. Томск, 2013; Международная научно - практическая конференция «Актуальные проблемы современного машиностроения», г. Томск, 2014; VII Международная научно - практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении», г. Томск, 2016; Международный научный форум «Наука и инновации – современные концепции», г. Москва, 2020; V Международная научно - практическая конференция «Инновации в технике и технологиях», г. Великий Новгород, 2022.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 печатных работах, в том числе в 9 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ и 1 патенте на изобретение.

Личный вклад соискателя заключается в изучении литературы по теме исследования, разработке экспериментальной установки и способа изготовления электродов для контактной сварки, планировании, проведении научных экспериментов и обработке полученных результатов, подготовке публикаций по выполненной работе.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы, приложения. Основной материал изложен на 133 страницах, включая 20 таблиц, 72 рисунка, 103 литературных источника и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, основные положения, представленные к защите.

В первой главе выявлено противоречие между повышением механических свойств и снижением электропроводности, в связи с этим, установление компромиссного соотношения между прочностью, твёрдостью и электропроводностью является фундаментальным научным вопросом и играет решающую роль в разработке состава и технологии производства сплавов меди.

Показано, что на повышение прочности и твёрдости без существенного снижения электропроводности оказывают сильное влияние выделившиеся из твёрдого раствора наноразмерные частицы хрома, а также следующие структурные характеристики: границы зёрен, границы двойников, армирующие включения и дислокации.

Данные по электропроводным материалам позволили установить факторы, воздействующие на условия работы электродов контактной сварки:

– электрические, обусловленные величиной и временем пропускания сварочного тока;

– механические и конструкционные, определяющиеся техническими характеристиками машины (давление и темп сварки) и геометрическими размерами электродов;

– физико - химические, определяющиеся химическим составом и структурой сплава.

Анализ литературных данных показал, что существует следующее общее мнение: высокая прочность должным образом состаренного медного сплава достигается за счёт богатых хромом выделений с типичными размерами около 30 нм и меньше. Однако природа этих богатых хромом частиц ещё не совсем установлена, выявлено наличие двух видов остаточных выделений Cr в матрице. Крупные препятствуют движению границ зёрен меди, а мелкие выделения диспергируются в матрице меди, фиксируя дислокации. Этот результат позволяет по - новому взглянуть на сплавы с металлической матрицей, армированные дисперсными выделениями.

Существующие методы получения композиционных материалов и технологии изготовления из них электродов контактной сварки имеют ряд недостатков:

– сложный, дорогостоящий и экологически вредный процесс изготовления лигатур;

– многостадийный и сложный технологический процесс, как получения сплава, так и изготовления электродов контактной сварки;

– необходимость использования методов улучшения структуры: деформацией, закалкой и старением.

Во второй главе представлены исходные материалы, оборудование и методы исследований структуры и свойств композиционного материала Cu–MMNCr. Для получения композиционного материала Cu–MMNCr использовали таблетированную лигатуру гетерогенного состава, состоящую из базовых элементов: матрицы 0,83 мас. % медного порошка марки ПМС–1 и 0,17 мас. % наноразмерных частиц хрома X99, получаемую холодным прессованием, которую вводили в медный расплав индукционной печи. Литье и литье - штамповку электродов контактной сварки, осуществляли в металлической пресс - форме. Для проведения исследований применялись методы: металлографического анализа с использованием инвертированного металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer MAT при различных увеличениях (x50, x100, x200, x500) и сканирующего электронного микроскопа HITACHI TM 1000; микроструктуру образцов и элементный состав исследовали на растровом электронном микроскопе JEOL JSM–7001F с использованием контраста во вторичных электронах и энергодисперсионного микроанализа (EDX); рентгенофазовый анализ образцов проводили на дифрактометре BRUKER D8 ADVANCE; исследования смачивания хрома расплавами меди проводили на универсальной вакуумной установке «Капля»; контроль уровня механических и электропроводных свойств (прибор TP 5014, прибор ПМТ–3, микроомметр Ф4104–М1); испытания электродов проводили на контактной машине МПТУ–300.

Для компьютерного моделирования процессов литья использовали программу ProCAST, а процессов штамповки Deform 3D, реализующие метод конечных элементов.

В третьей главе исследован фракционный состав порошка хрома после помола в планетарно - центробежной мельнице ПЦМ–50–НАНО и разработан способ его введения в расплав с помощью таблетированной лигатуры Cu–Cr.

На рисунке 1 показано, что после обработки исходного порошка Cr в планетарно - центробежной мельнице получаемый наноразмерный порошок имеет размеры от 25 до 90 нм, среднее значение 54,6 нм, стандартное отклонение 16,6 нм, распределение размеров частиц несимметрично с удлинённым правым хвостом, отрицательным эксцессом и описывается логарифмически - нормальным законом распределения. Установлено, что в процессе обработки происходит механохимическая активация хрома, приводящая к повышению активности частиц за счет образования дефектов структуры, краевой угол смачивания медью наноразмерных частиц Cr при 1250 °С составляет 45° и при дальнейшем повышении температуры плавно уменьшается, что приводит к увеличению седиментационной устойчивости наноразмерных частиц Cr в расплаве.

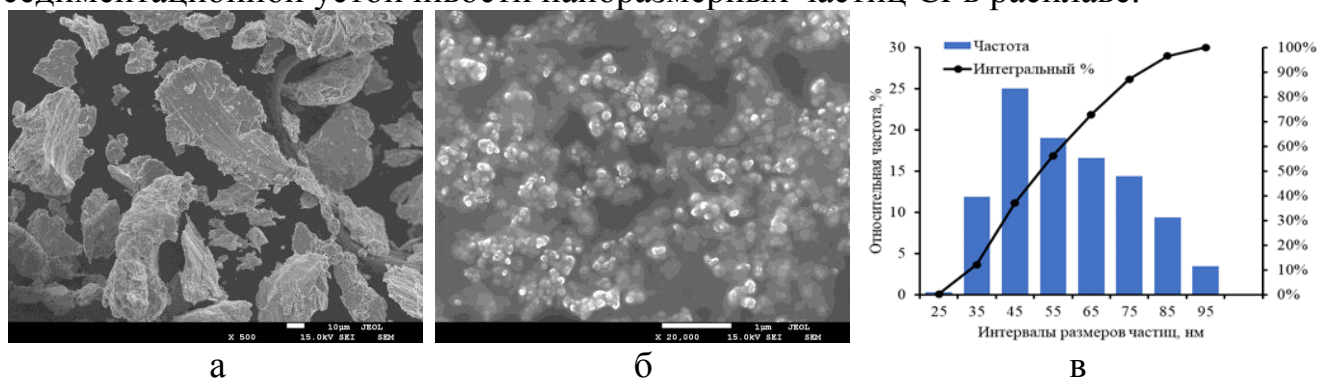


Рисунок 1 – Морфология исходного порошка Cr (а) и после помола (б), гистограмма распределения порошка Cr по размерам после помола (в)

Переходный металл, такой как Cr образует с медью систему с ограниченной растворимостью и основной проблемой при вводе хрома в медный расплав является образование тугоплавкой оксидной пленки на поверхности Cr. Добавление в медный расплав лигатуры фосфористой меди, в количестве 0,05 мас. %, раскисляет оксид меди Cu_2O , в этом случае реакция имеет отрицательную энергию Гиббса. Реакция раскисления оксида хрома Cr_2O_3 фосфористой медью термодинамически невозможна и имеет положительную энергию Гиббса. На основе проведенного термодинамического анализа показано, что фосфористая медь как раскислитель, снижает содержание кислорода в расплаве меди перед введением наноразмерных частиц Cr.

Образование новой твёрдой фазы связано с возникновением границы раздела фаз, обладающей избыточной энергией Гиббса. Избыточная энергия незначительно пересыщенного раствора недостаточна для формирования в нем устойчивых зародышей и в этом случае зародыши могут возникать на уже существующих поверхностях — на имеющихся в растворе частицах (не растворенных наноразмерных частицах Cr), на стенках формы и др. Вероятность, а

следовательно, и скорость образования зародышей возрастает с повышением температуры, при механических и других возмущениях внутри раствора. Установлено, что распределение наноразмерных частиц Cr в расплаве достигается перемешиванием частотной модуляцией тока (в интервале 35–40 Гц от рабочей частоты) в переменном электромагнитном поле, позволяющим также увеличивать седиментационную устойчивость наноразмерных частиц Cr в медном расплаве.

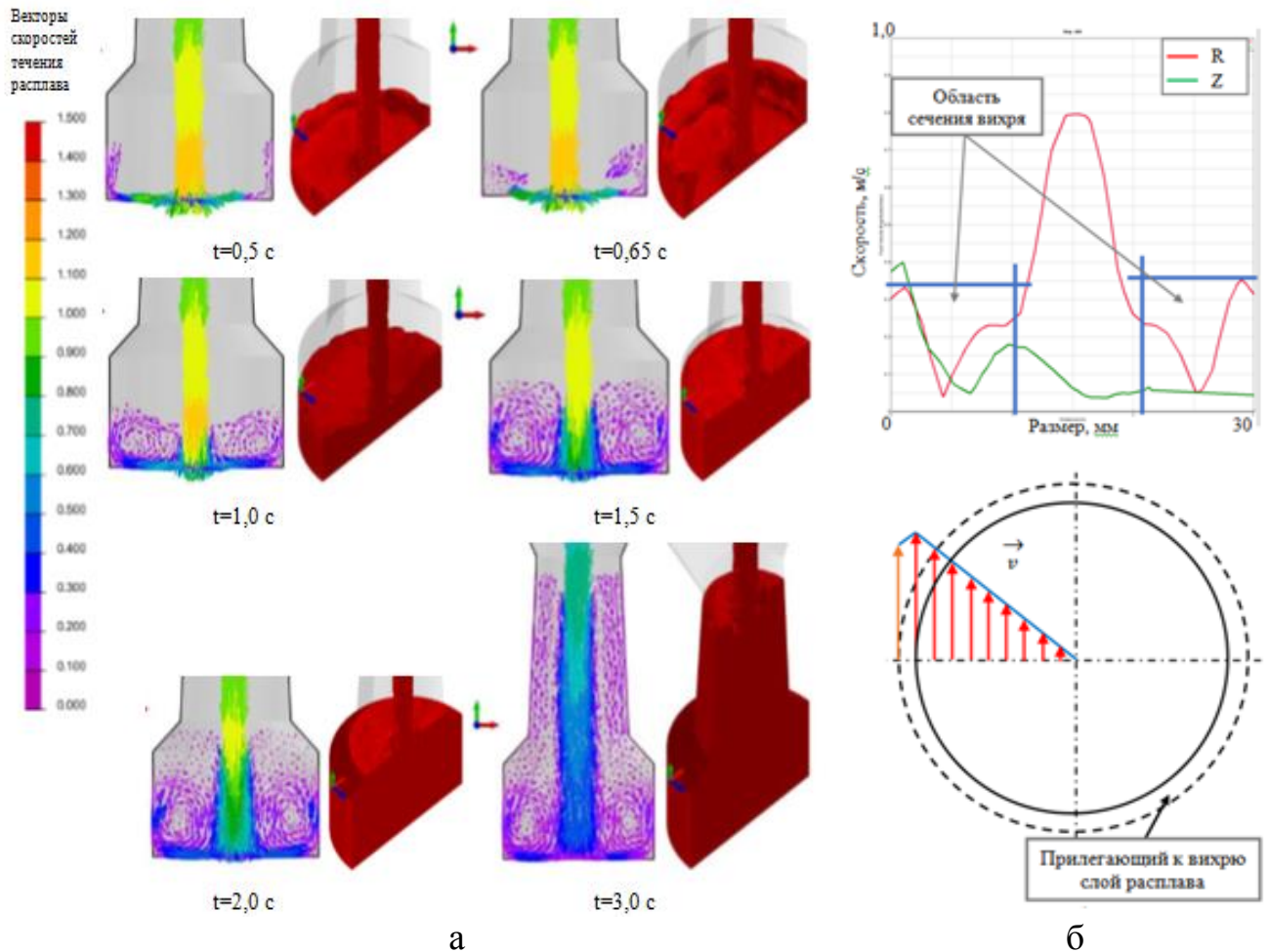


Рисунок 2 – Распределение векторов скоростей свободно заливаемой струи расплава при заполнении металлической формы (а) и рассчитанное распределение скоростей по сечению тороидального вихря вдоль радиуса R и по вертикали Z через центр сечения вихря через 2 сек с моделью (б)

На рисунке 2 а, показано поле векторов при заполнении металлической формы свободной (гравитационной) заливкой под действием сил тяжести. По результатам компьютерного моделирования и расчётов определено, что в расплавленном металле существует тороидальный вихрь с направлением течения вблизи свободной поверхности жидкости от границы формы к центру массивной части электрода с нисходящим потоком в этой области. Рассчитанное распределение скоростей по сечению тороидального вихря и модель показаны на рисунке 2 б. Исходя из расчётов и модели внутри однородного вихря кругового сечения, расплав вращается как «твёрдое» тело с постоянной угловой скоростью. Вне такого вихря невихревое движение расплава по вертикальной оси Z

постепенно затухает. Такой характер гидродинамики расплава приводит к формированию вокруг частицы слоя, пресыщенного концентрацией хрома в расплаве меди, без притока свежих порций меди, что существенно замедляет и фактически останавливает процесс растворения частицы и при охлаждении приводит к выделению хрома в виде дендритов. Кроме того, не позволяет ещё не растворившимся наноразмерным частицам хрома всплывать на зеркало расплава. Этот процесс прослеживается до полного заполнения металлической формы (рисунок 2 а). Такой характер гидродинамики расплава оказывает влияние на формирование структуры и свойств композиционного материала.

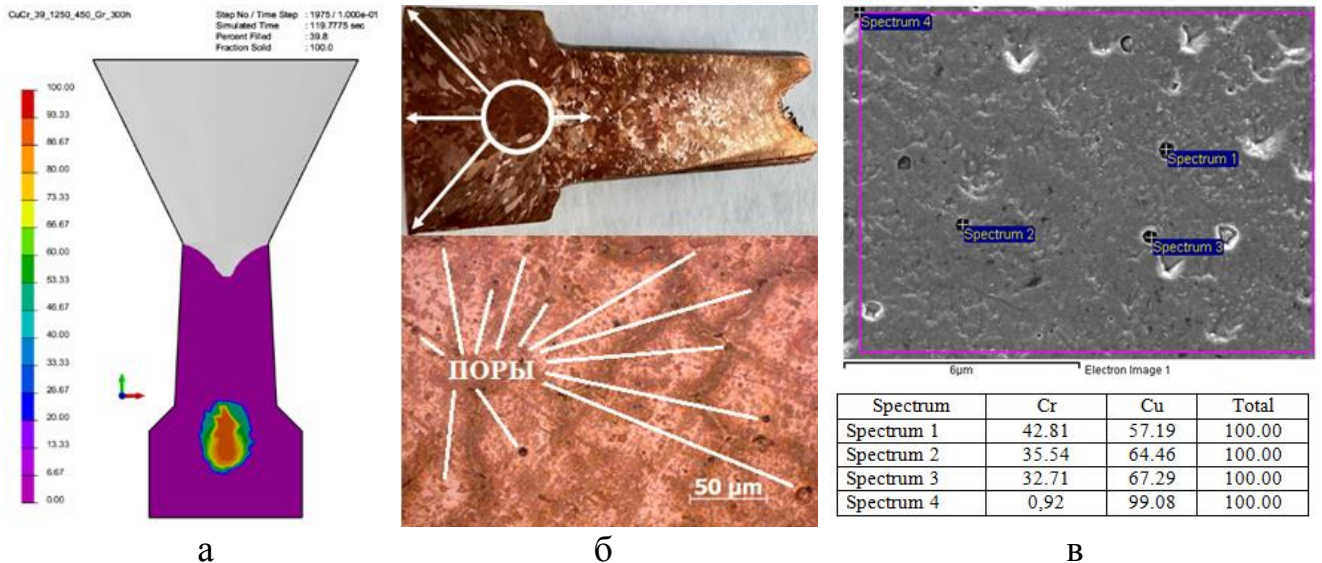


Рисунок 3 – Зона теплового узла (а); макроструктура с градиентами температур и микроструктура с распределённой микропористостью в зоне теплового узла литого электрода (б); СЭМ изображение микроструктуры литого сплава с элементным составом (в)

Установленный характер кристаллизации приводит к образованию «теплового узла» на завершающей стадии, это видно на рисунке 3 а. В этом случае для оценки мест образования микропористости в ProCAST можно использовать параметр Hot Spots. Установленный моделированием в ProCast характер температурных полей и кристаллизации подтверждается макроструктурой литого электрода, представленной на рисунке 3 б, градиенты температур показаны белыми стрелками, а белым кольцом зона «теплового узла» с распределённой микропористостью. После литья композиционного материала без проведения операций термообработки в микроструктуре сплава можно отчетливо наблюдать нерастворившиеся наноразмерные частицы хрома (рисунок 3 в). В нашем случае нерастворившиеся частицы хрома играют фундаментальную роль в определении конечного размера зерен в композиционном материале, поскольку они могут взаимодействовать с границами зерен, действуя как точки закрепления, замедляя или останавливая их рост.

Установленный характер термогидродинамики процесса литья и анализ полученной структуры позволяют нам предложить следующую модель дисперсно - дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами Cr в

структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди, построенную на следующей гипотезе нечётких множеств: вводимые в расплав меди наноразмерные частицы хрома, не превышающие критического размера, соответствующего 50% интегральной частоте (в данной работе до 54,6 нм) растворяются полностью (рисунок 4) и функция принадлежности $\mu(x)=1$ или частично $0 < \mu(x) < 1$ в расплаве медной матрицы и переходят в α твёрдый раствор с последующим выделением второй фазы при закалке и старении, а частицы большего размера $\mu(x)=0$ выступают в качестве центров кристаллизации, способствуя формированию структуры сплава и обеспечивая дисперсное упрочнение.

Подход теории нечётких множеств принят исходя из следующих позиций:

– нечёткое множество представляет собой совокупность элементов произвольной природы, относительно каждого из которых нельзя с полной определённой утверждать – принадлежит этот элемент рассматриваемой совокупности данному множеству или нет;

– отсутствие в литературных данных описания и природы растворения наноразмерных частиц в расплавах металлов.

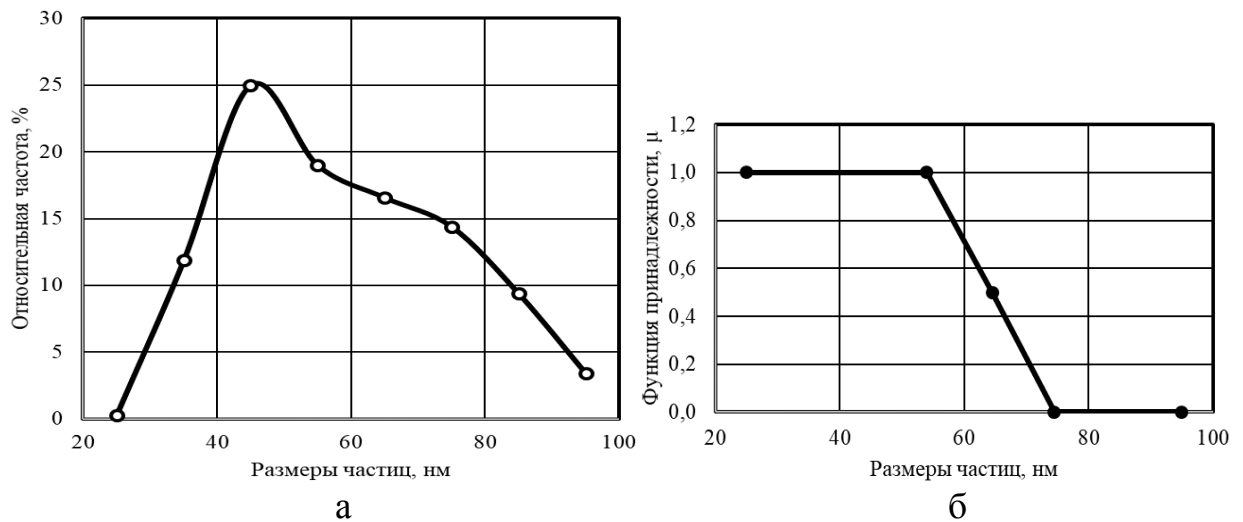


Рисунок 4 – Относительная частота распределения наноразмерных частиц хрома (а) и функция принадлежности к характеру их растворимости в расплаве меди (б)

При этом линейная Z - образная функция в общем случае может быть задана аналитически следующим выражением:
$$\mu(x, a, v) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \leq a, \\ \frac{v-x}{v-a}, & \text{если } a < x \leq v, \\ 0, & \text{если } x > v, \end{cases}$$
 где

a, v – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением: $a < v$.

Для нашего случая (рисунок 4 б): $a=54,6$ нм, $v=74,5$ нм. При различных условиях литья параметры Z - образной функции соответственно будут изменяться и уточняться на основе экспериментальных данных.

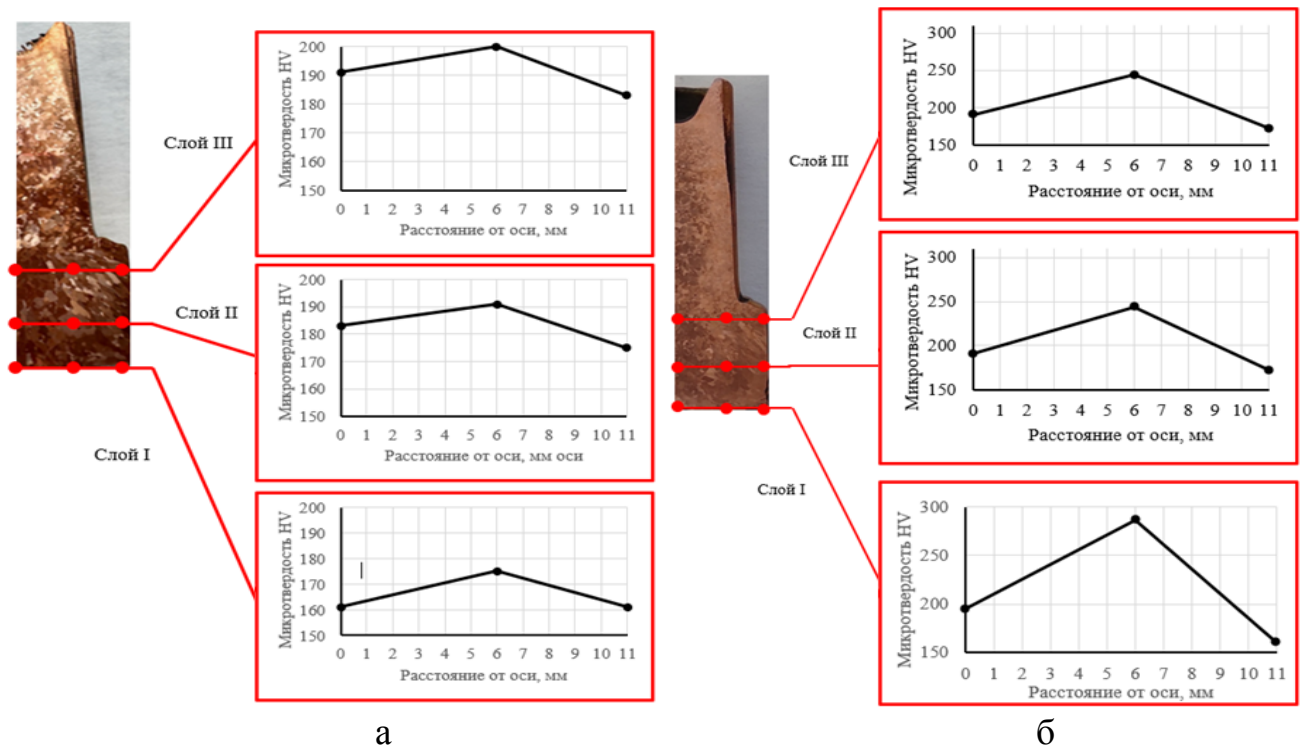


Рисунок 5 – Распределение микротвёрдости HV по сечению рабочей части электрода после литья в форму: (а) с закалкой; (б) с закалкой и старением

После термической обработки, включающей в себя закалку с последующим старением, микротвердость HV по сечению рабочей части электрода с наноразмерным Cr распределяется следующим образом (рисунок 5). Видно, что в центральной зоне (расстояние от оси 6 мм) во всех слоях твёрдость имеет повышенные значения, которые можно объяснить тем, что это центральная область вихревого характера движения расплава при заливке его в металлическую форму (см. рисунок 2 а) и здесь имеется повышенная концентрация наноразмерных частиц хрома.

Технология получения литых электродов, обеспечивает повышенное содержание хрома в твердом растворе, за счет закалки практически сразу после заливки в металлическую форму, что приводит к повышению твердости до 90 HB, микротвердости до 179 HV и электропроводности до 70 % IACS после старения.

В четвертой главе на основании компьютерного моделирования и расчетов, установлены объемы заливаемого металла в металлическую форму перед штамповкой для предотвращения излишнего вытеснения металла.

Компьютерное моделирование стадии горячей штамповки, позволяет установить, что температура в поверхностных слоях в процессе штамповки заготовки (рисунок 6 а) снижается с 950 °С до 725 °С за 0,17 с, что позволяет производить закалку сплава, исключая дополнительную операцию нагрева для закалки. График изменения усилия на пуансоне от времени прошивки показан на рисунке 6 б, максимальное прилагаемое усилие составляет 29 кН.

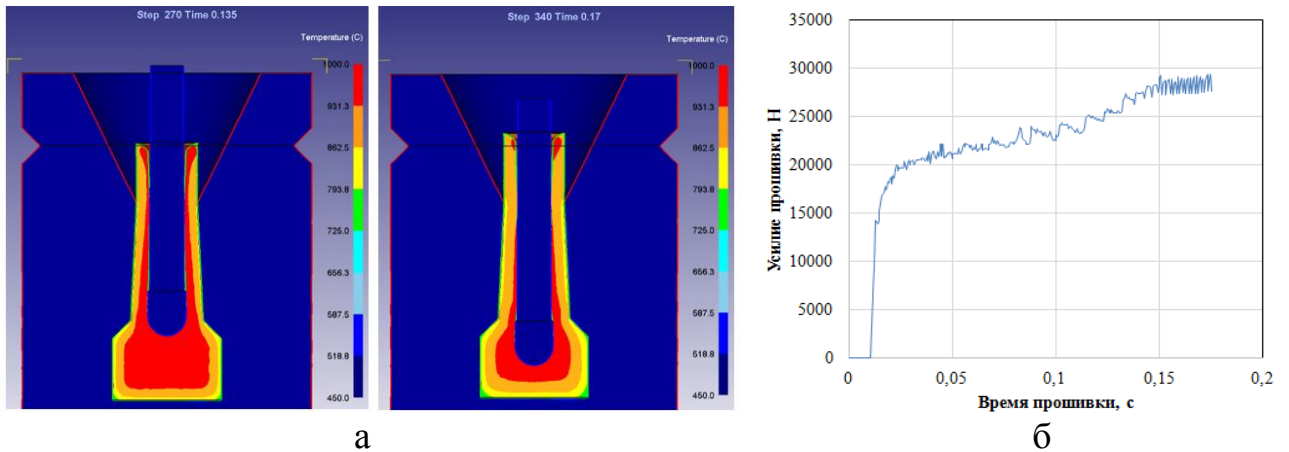


Рисунок 6 – Изменение температурного поля при штамповке во времени

Компьютерное моделирование распределения в объеме заготовки таких параметров как интенсивность деформаций (Λ), интенсивность скоростей деформаций (H), интенсивность касательных напряжений (T) и среднее нормальное напряжение (σ_0) (рисунок 7) позволяет сформировать представление о структурных изменениях, происходящих после деформации и охлаждения электрода. Так как по мере опускания пуансона в рабочую часть, область действия деформаций расширяется, также можно наблюдать места в заготовке, где преобладают совсем малые деформации. При малой деформации и при большом объемном напряжении генерируются дислокации.

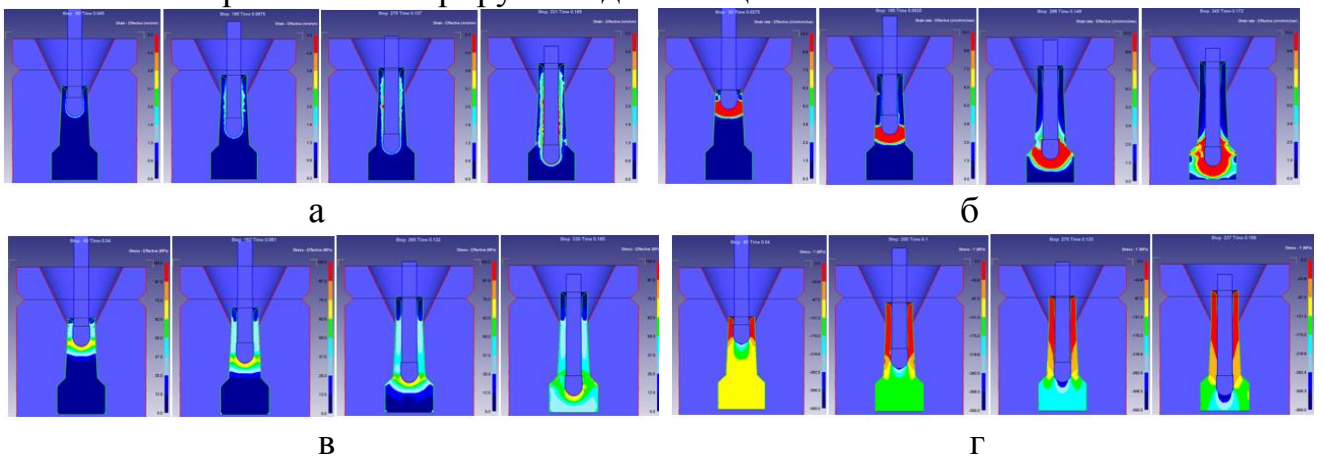


Рисунок 7 – Изменение интенсивности деформаций (а); интенсивности скоростей деформаций (б); интенсивности касательных напряжений (в); среднего нормального напряжения (г)

После горячей штамповки наблюдается изменение макроструктуры (рисунок 8 а) по сравнению с литыми электродами. При горячей штамповке, зерна структуры в месте прошивки пуансоном измельчаются, это хорошо прослеживается на рисунке 8 а, б. Наблюдается равноосное строение как мелких, так и укрупненных зерен по всей площади электрода. Характерная микроструктура после деформации композиционного материала показана на рисунке 8 в. Наличие двойников (рисунок 8 г) в микроструктуре оказывает существенную роль на механические свойства композиционного материала. В нескольких точках

(рисунок 8 д) показан СЭМ анализ композиционного материала, элементный состав указывает на наличие армирующих наноразмерных частиц хрома в спектре.

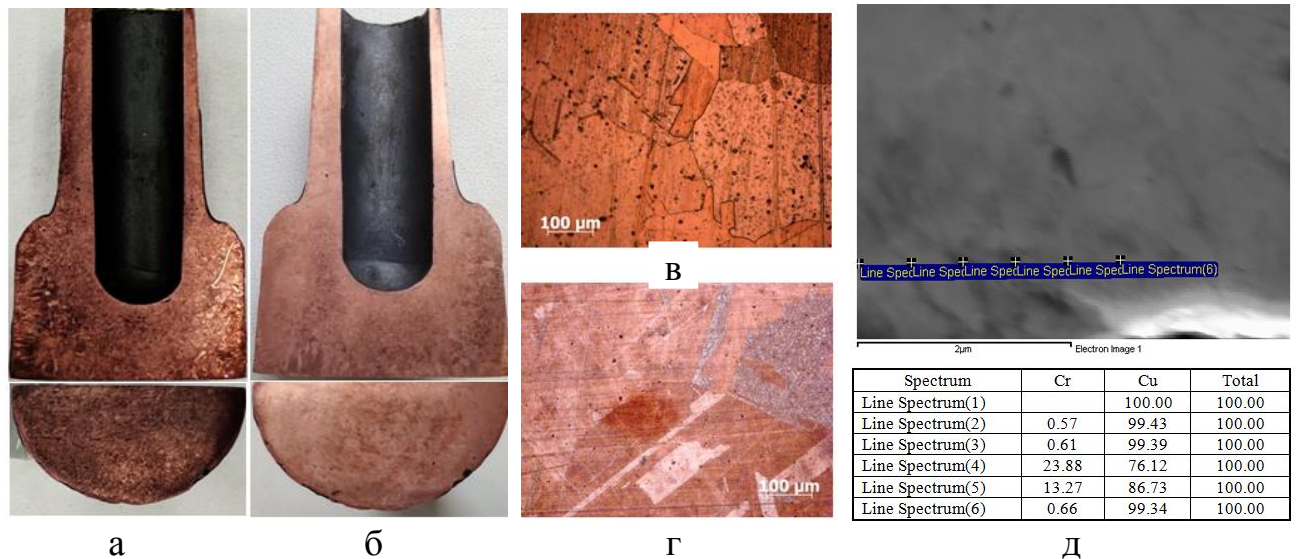


Рисунок 8 – Макроструктура литых - штампованных - закаленных (а) и литых - штампованных - закаленных - состаренных электродов (б); микроструктура литых - штампованных - закаленных (в) и литых - штампованных - закаленных - состаренных электродов (г); СЭМ изображение микроструктуры сплава с элементным составом (д)

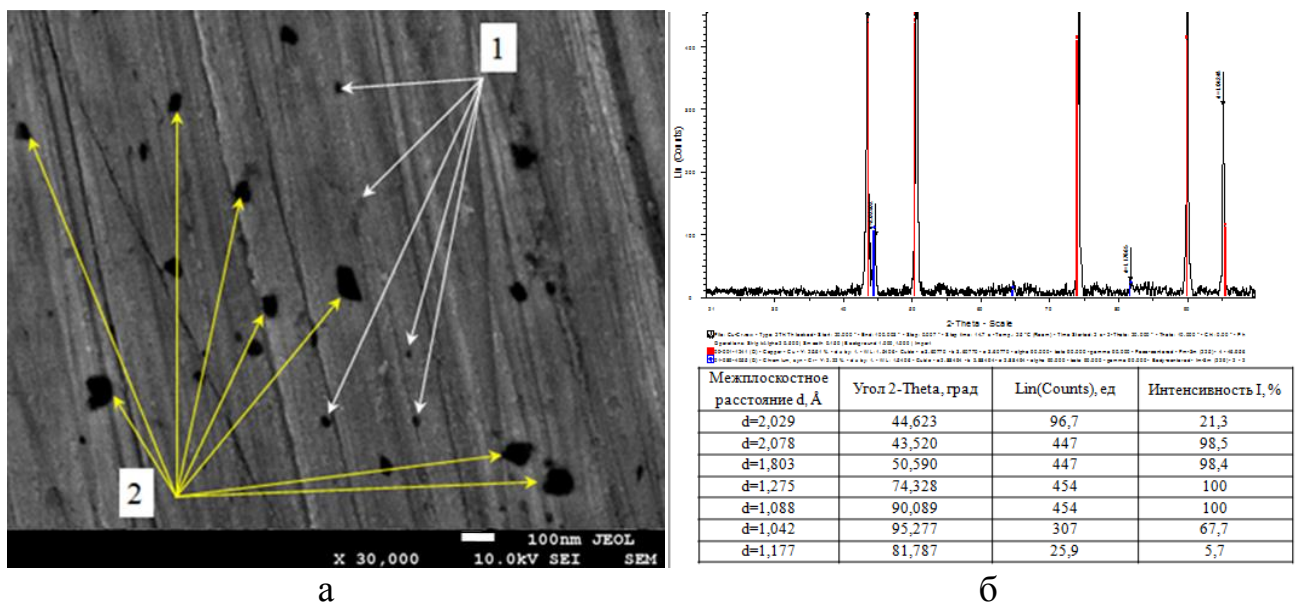


Рисунок 9 – СЭМ изображения микроструктуры композиционного материала с включениями наноразмерных частиц Cr (а): 1 – до 30 нм; 2 – до 100 нм; дифрактограмма с межплоскостными расстояниями (б)

На рисунке 9 а, показано выделение наноразмерных частиц хрома (до 30 нм) из твердого раствора, а также наличие наноразмерных не растворившихся частиц хрома более крупных размеров (30 – 100 нм) в соотношении 60:40 %. Это подтверждает модель дисперсно - дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с

металлической матрицей на основе меди, построенную на гипотезе нечётких множеств, что вводимые в расплав меди наноразмерные частицы хрома, не превышающие критического размера, соответствующего 50 % интегральной частоте (в данной работе до 54,6 нм) растворяются полностью и функция принадлежности $\mu(x)=1$ или частично $0 < \mu(x) < 1$ в расплаве медной матрицы и переходят в α твёрдый раствор с последующим выделением второй фазы при закалке и старении, а частицы большего размера $\mu(x)=0$ выступают в качестве центров кристаллизации, способствуя формированию структуры сплава и обеспечивая дисперсное упрочнение. Дифрактограмма (рисунок 9 б) указывает на наличие частиц хрома в сплаве. Значения межплоскостных расстояний показаны на рисунке 9 б.

Установлены взаимосвязи между распределением твёрдости и параметрами теплового и напряженно - деформированного состояния в объёме изделия из композиционного материала с металлической матрицей на основе меди с армирующими наноразмерными частицами Cr при совмещённом способе литья - штамповки с последующей термической обработкой (рисунок 10).

Распределение значений параметров процесса штамповки (рисунок 10 а) по точкам фиксации деформационных параметров при моделировании штамповки электрода (рисунок 10 б), показывают что (рисунок 10 в) в радиальном направлении наиболее тесная корреляционная связь микротвёрдости HV со всеми параметрами видна во 2–м слое (синяя стрелка) и затем в порядке убывания в 3–м (зеленая стрелка) и 1–м слоях (черная стрелка). Рассмотрение точек по диагонали рабочей части электрода (оранжевая стрелка), показывает очень сильную связь параметров процесса штамповки и микротвёрдости HV, близкой к ней является и взаимосвязь по оси электрода (красная стрелка). Наиболее тесные корреляционные взаимосвязи деформационных параметров выделены (рисунок 10 в) красным цветом.

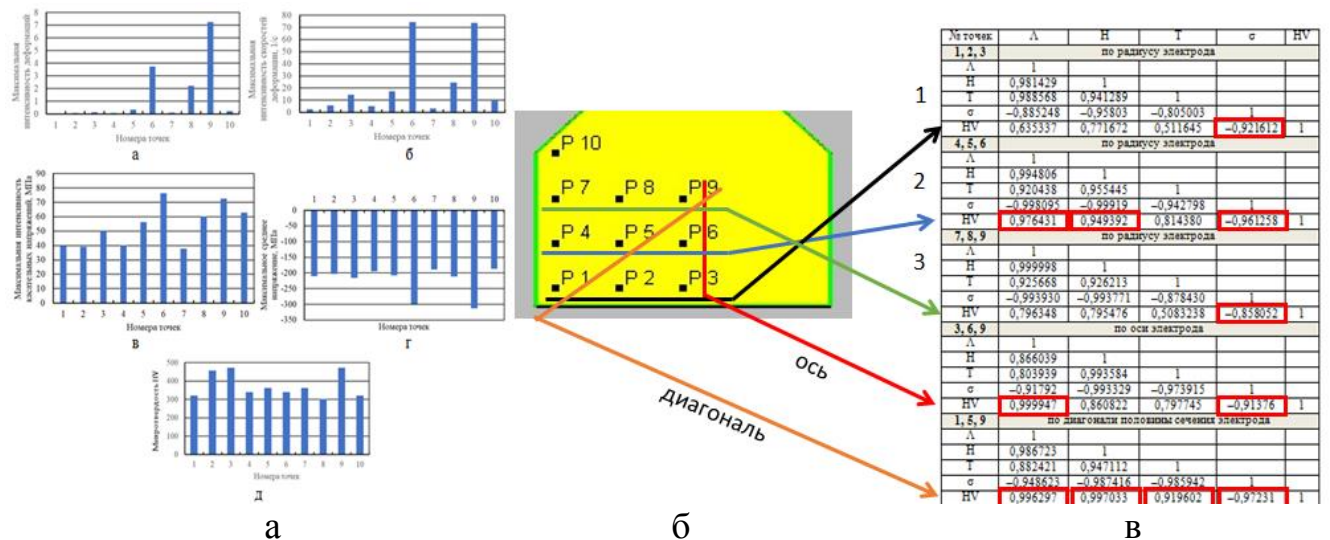


Рисунок 10 – Механические свойства литого - штампованного композиционного материала Cu-MMnCr

Технология получения литых - штампованных электродов с последующей термообработкой, обеспечивает повышение твердости до 142 HB, микротвердости до 378 HV и электропроводности до 86 % IACS.

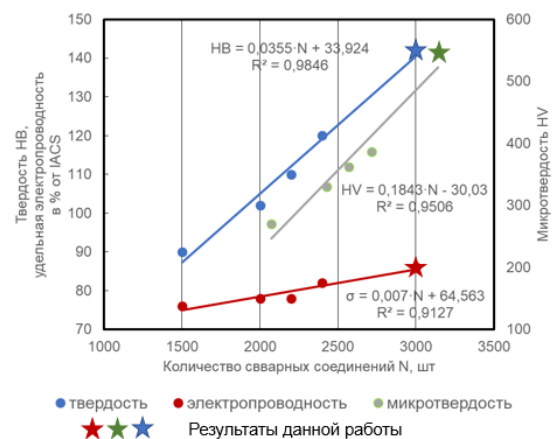
В пятой главе показана сварка арматуры вкрест (рисунок 11 а), поверхность арматуры рифленая, это сильно влияет на изменение высоты и формы электрода в процессе эксплуатации. Линейные зависимости повышения параметров твёрдости, микротвёрдости и удельной электропроводности у электродов от количества сварных соединений, представленные на рисунке 11 б. Значения растут независимо от способа изготовления электродов. Звездочками показаны значения параметров, полученные нами с улучшенными показателями без добавления дополнительных компонентов в материал.

Основываясь на линейном характере взаимосвязи и высокой корреляции параметров, получено следующее уравнение регрессии для оценки количества сварных соединений: $N=1924,944+37,49061 \cdot HB-49,1736 \cdot I$, $R^2=0,990$.

Технологический процесс с применением малоцикловой технологии включает в себя меньше технологических операций, менее энерго- и ресурсозатратен в отличие от производственной технологии.

Испытания экспериментальных образцов электродов контактной сварки типа D из композиционного материала Cu-MMNCr с аналогами, изготовленными по разным технологиям, указывает на хорошую стойкость экспериментальных образцов. Построена зависимость износа рабочей части электродов: $\Delta H=0,0047 \cdot N$, где ΔH – износ рабочей части электродов, мм; N – количество сварных контактов, шт.

На основании испытаний установлено, что композиционный материал Cu-MMNCr полученный по малоцикловой технологии по своим свойствам превосходит аналогичный сплав БрХ1 полученный по производственной технологии.



а

б

Рисунок 11 – Сварка арматуры вкрест (а) и график взаимосвязи количества сварных соединений от свойств электродов (б): твёрдости HB, микротвёрдости HV и удельной электропроводности % IACS

Новая малоцикловая технология изготовления электродов контактной сварки из композиционного материала Cu–MMNCr позволяет перерабатывать вторичное сырьё, что в свою очередь повышает экологичность производства.

Экономический анализ показывает, что при внедрении новой малоцикловой технологии, затраты на изготовление электродов контактной сварки по сравнению с покупкой готовых электродов, можно сократить в несколько раз.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании анализа литературных данных по электропроводным материалам установлено наличие противоречия между повышением механических свойств и снижением электропроводности. В связи с этим, установление компромиссного соотношения между прочностью, твёрдостью и электропроводностью является фундаментальным научным вопросом. Показано, что на повышение прочности и твёрдости без существенного снижения электропроводности оказывают сильное влияние выделившиеся из твёрдого раствора наноразмерные частицы хрома, а также следующие структурные характеристики: границы зёрен, границы двойников, армирующие включения и дислокации.

2. Показано, что после обработки исходного порошка хрома в планетарно - центробежной мельнице полученный наноразмерный порошок имеет размеры от 25 до 90 нм, среднее значение 54,6 нм, стандартное отклонение 16,6 нм, распределение размеров частиц несимметрично и описывается логарифмически - нормальным законом распределения. Установлено, что в процессе обработки происходит механохимическая активация хрома, приводящая к повышению активности частиц за счет образования дефектов структуры, краевой угол смачивания медью наноразмерных частиц хрома при 1250 °С составляет 45° и при дальнейшем повышении температуры плавно уменьшается, что приводит к увеличению седиментационной устойчивости наноразмерных частиц в расплаве.

3. Установлено на основании компьютерного моделирования свободной заливки (гравитационное литье), существование в расплаве тороидального вихря. Показано, что внутри тороидального вихря кругового сечения расплав вращается как «твёрдое» тело с постоянной угловой скоростью. Вне такого вихря невихревое движение расплава по вертикальной оси Z постепенно затухает. Такой характер гидродинамики расплава приводит к формированию вокруг частицы слоя, пресыщенного концентрацией хрома в расплаве меди, без притока свежих порций меди, что существенно замедляет и фактически останавливает процесс растворения частицы и при охлаждении приводит к выделению хрома в виде дендритов. Кроме того, не позволяет ещё не расплавившимся наноразмерным частицам хрома всплывать на зеркало расплава. Этот процесс прослеживается до полного заполнения металлической формы. Такой характер гидродинамики расплава оказывает влияние на формирование структуры и свойств композиционного материала.

4. Впервые предложена и подтверждена модель дисперсно - дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях

композиционного материала с металлической матрицей на основе меди, построенную на следующей гипотезе нечётких множеств: вводимые в расплав меди наноразмерные частицы хрома, не превышающие критического размера, соответствующего 50% интегральной частоте (в данной работе до 54,6 нм) растворяются полностью и функция принадлежности $\mu(x) = 1$ или частично $0 < \mu(x) < 1$ в расплаве медной матрицы и переходят в α твёрдый раствор с последующим выделением второй фазы при закалке и старении, а частицы большего размера $\mu(x) = 0$ выступают в качестве центров кристаллизации, способствуя формированию структуры сплава и обеспечивая дисперсное упрочнение.

5. Установлено, что перемешивание расплава меди и наноразмерных частиц хрома частотной модуляцией тока (в интервале 35–40 Гц от рабочей частоты) в переменном электромагнитном поле позволяет получить равномерное распределение армирующих наноразмерных частиц хрома по всему объёму материала (изделия). Это обеспечивает значительное повышение твёрдости (142 НВ), микротвёрдости (HV 378) и электропроводности композиционного материала (86 % IACS).

6. Установлено на основании компьютерного моделирования стадии горячей штамповки, тепловое и напряженно - деформированное состояние для изделия – электрод контактной сварки. Показано, что наибольшее влияние на твёрдость по сечению изготовленного электрода оказывают в комплексе среднее нормальное (объёмное) сжимающее напряжение (от –180 до –320 МПа), интенсивность касательных напряжений (от 38 до 76 МПа) при малых деформациях, осуществляемых с высокими скоростями деформации, способствующее генерированию большого числа дислокаций.

7. Выведены взаимосвязи между распределением твёрдости и параметрами теплового и напряженно - деформированного состояния в объёме изделия из композиционного материала Cu–MMNCr при совмещённом способе литья - штамповки с последующей термической обработкой. Показано повышение количества сварных соединений с увеличением твёрдости НВ, микротвёрдости HV и удельной электропроводности.

8. Разработана малооперационная технология изготовления электродов контактной сварки из композиционного материала Cu–MMNCr, позволяющая перерабатывать вторичное медное сырьё, тем самым повышая экологичность производства.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бусыгин, С.Л. Применение ресурсосберегающей технологии металлургической переработки меди и медных сплавов для получения электродов контактной сварки / С.Л. Бусыгин, А.П. Рукосуев, С.К. Крушатина, А.И. Демченко, А.С. Рафальский // Вестник СибГАУ. – 2010 (6). – С. 119–121.

2. Бусыгин, С.Л. Получение электродов контактной сварки совмещённым способом литья и штамповки / С.Л. Бусыгин, А.М. Синичкин, А.М. Токмин // Металлургия машиностроения. – 2013 (2). – С. 39–43.

3. **Бусыгин, С.Л.** Способ изготовления электродов контактной сварки совмещенным способом литья и штамповки / С.Л. Бусыгин, А.М. Токмин, В.В. Богданов, С.А. Готовко // Вестник СибГАУ. – 2015. – Т. 16 (3). – С. 714–719.

4. **Бусыгин, С.Л.** О выплавке в индукционной тигельной печи хромовой бронзы для электродов контактной сварки / С.Л. Бусыгин, А.М. Токмин, М.В. Первухин, В.С. Казаков, М.Ю. Кучинский // Metallurgy машиностроения. – 2016 (1). – С. 7–9.

5. **Busygin, S.L.** Technological peculiarities of electric resistance welding of intersecting crosswise rods made of aluminum alloys / S.L. Busygin, A.I. Demchenko, Yu.G. Novoseltsev, A.A. Bezrukich, A.A. Shaichadinov, M.A. Aryamnova // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, – 2016. – Vol. 9(6). – P. 905–911.

6. **Busygin, S.L.** The Heating Process in an Induction Crucible Furnace and the Technology of Chromium Bronze Smelting in Order to Obtain Resistance Welding Electrodes / S.L. Busygin, A.M. Tokmin, I.S. Dementeva, V.S. Kazakov // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2018. – Vol. 11(2). – P. 148–154.

7. **Бусыгин, С.Л.** Особенности изготовления электродов для контактной сварки арматуры ЖБИ / С.Л. Бусыгин, А.М. Токмин, А.В. Можяев, Р.С. Маслов // Сварочное производство. – 2018. – №12. – С. 19–23.

8. **Бусыгин, С.Л.** Электроды из низколегированного наноструктурированными частицами хрома сплава меди для контактной точечной сварки / С.Л. Бусыгин, Н.Н. Довженко, А.В. Можяев, А.И. Демченко, А.А. Безруких // Инновации и инвестиции. – 2020. – №5. – С. 174–178.

9. **Бусыгин, С.Л.** Влияние технологии изготовления на свойства электродов из хромистой бронзы для контактной рельефной сварки арматурных стержней / С.Л. Бусыгин, А.М. Токмин, Н.Н. Довженко, В.С. Казаков // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2021. – Т. 14(8). – С. 914–929.

Другие публикации:

10. **Бусыгин, С.Л.** Инновационная технология получения электродов контактной сварки совмещенным способом литья и горячей штамповки // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. трудов 4 - ой Международной научно–практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых / Юргинский технологический ин-т. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2013. – С. 61–64.

11. Баяндина, О.В. Установка для производства электродов контактной сварки методом горячей штамповки из утилизированных медных отходов / О.В. Баяндина, **С.Л. Бусыгин** // Актуальные проблемы современного машиностроения: сб. трудов Международной научно–практической конференции / Юргинский технологический ин-т. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2014. – С. 342–346.

12. **Бусыгин, С.Л.** Технологические особенности контактной сварки пересекающихся стержней вкрест из алюминиевых сплавов / С.Л. Бусыгин, Э.Э. Проскурина, Е.К. Бусыгина // Инновационные технологии в машиностроении:

сб. трудов 7 - ой Международной научно–практической конференции / Юргинский технологический ин-т. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2016. – С. 18–22.

13. **Бусыгин, С.Л.** Технология изготовления и испытания электродов контактной сварки // Научный журнал «Chronos». «Вопросы современной науки: Проблемы, тенденции и перспективы». – Москва. – 2020. – Вып. 1(39). – С. 16–21.

14. **Busygin, S.L.** The electrodes of low - alloy nanostructured the chromium particles of alloy copper for resistance spot welding / S.L. Busygin, N.N. Dovzhenko, A.V. Mozhaev, A.I. Demchenko, A.A. Bezrukich // Сб. науч. статей по итогам работы Международного научного форума «Наука и инновации – современные концепции». – Москва: Изд-во Инфинити. – 2020. – Т.2. – С. 132–143.

15. **Бусыгин, С.Л.** Совершенствование технологии изготовления электродов из хромистой бронзы для контактной сварки арматурных стержней / С.Л. Бусыгин, Н.Н. Довженко, А.М. Токмин, С.Б. Сапожков // Инновации в технике и технологиях. – В. Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого. – 2023. – С. 29–37.

Патенты и акты внедрения результатов научной деятельности:

16. Способ изготовления электродов для контактной сварки: пат. 2412035 РФ МПК: В23К 35/40, В23К 11/30 / **С.Л. Бусыгин, А.И. Демченко, А.С. Рафальский**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Сибирский федеральный университет (СФУ). – № 2010108888/02; заявл. 09.03.2010; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5.

17. Акт промышленных испытаний технологии изготовления электродов контактной сварки № 0352 от 10.03.2023 на предприятии ООО «ОКБ Микрон» г. Красноярск.

18. Акт по результатам промышленных испытаний электродов контактной сварки № 153–23 от 28.03.2023 на предприятии АО «Фирма Культбытстрой» г. Красноярск.

19. Акт о внедрении в учебный процесс политехнического института СФУ результатов диссертационной работы **Бусыгина С.Л.** от 21.04.2023, г. Красноярск.