

ОТЗЫВ

официального оппонента Петржика Михаила Ивановича

на диссертацию **Бусыгина Сергея Леонидовича**

«Разработка технологии производства изделий из композиционного материала с металлической матрицей на основе меди и армирующими наноразмерными частицами хрома»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Актуальность темы диссертации

Высокопроизводительные машины контактной сварки, получившие широкое распространения в промышленности, требуют применения электродов, сочетающих высокие значения прочности и электропроводности. Однако существующие технологии производства электродов (литье, холодное прессование, высокоскоростная штамповка, токарная обработка прутков), не удовлетворяют современным требованиям. Их недостатком являются низкие эксплуатационные показатели изделий, многооперационная и трудоемкая технология изготовления, а также большие потери металла в процессе производства, что значительно повышает стоимость конечного продукта.

Это вызывает необходимость совершенствования процесса получения электродов с использованием современных материалов, обеспечивающих сочетание высоких значений функциональных и эксплуатационных свойств (электропроводности, теплопроводности, прочности, стойкости к деформации и разрушению и др.) в широком интервале температур и давлений. К таким материалам относится перспективный металломатричный композит Cu–MMNCr, в котором медная матрица армирована твёрдыми наноразмерными частицами хрома. Этот объект исследования был выбран автором диссертации для разработки экономичной малооперационной технологии производства электродов контактной сварки, что несомненно является важной научной и прикладной задачей. Тема данного диссертационного исследования является **актуальной**, что также подтверждается тем, что оно было выполнено в рамках государственного задания FSRZ–2020–0011.

Анализ содержания диссертации

Во *введении* описана актуальность и степень разработанности темы исследования, поставлена цель и задачи исследования, приведена научная новизна полученных результатов, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов работы, приведена апробация результатов работы, сведения о публикациях, личный вклад соискателя, структура и объем работы.

В *первой главе* рассмотрены современные композиционные материалы для электродов контактной сварки на основе меди. Проведен анализ взаимосвязи

электропроводности и прочности в металломатричных композитах на основе меди. Рассмотрено влияние микроструктурных характеристик на повышение механической прочности и электропроводности меди. Определены направления развития технологии производства электродов контактной сварки.

Во *второй главе* описана технология и оборудование для изготовления электродов контактной сварки из композиционного материала Cu–MMNCr, определена методика исследований.

В *третьей главе* исследован фракционный состав нанопорошка хрома после помола. Проведен термодинамический анализ образования реакций взаимодействия компонентов расплава в процессе приготовления композиционного материала Cu–MMNCr. Исследованы смачивающие свойства хрома медным расплавом. Построены модели процесса литья композиционного материала Cu–MMNCr в металлическую форму с особенностями формирования структуры. Предложена модель дисперсно - дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди, построенную на гипотезе нечётких множеств. Исследовано влияние операций термообработки на физико-механические свойства литого композиционного материала Cu–MMNCr.

В *четвертой главе* построены модели стадии горячей штамповки совмещенного процесса литья - штамповки электродов контактной сварки с особенностями формирования структуры. Подтверждена модель дисперсно - дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди, построенная на гипотезе нечётких множеств. Исследованы физико-механические свойства композиционного материала Cu–MMNCr, полученного совмещенным процессом литья и штамповки с последующей термообработкой.

В *пятой главе* обоснован выбор технологии производства электродов контактной сварки. Проведено сравнение производственной и новой малоцикловой технологии производства электродов контактной сварки из композиционного материала Cu–MMNCr. Приведены результаты испытаний электродов контактной сварки. Представлено сравнение свойств экспериментальных электродов контактной сварки с аналогами. Проведена оценка возможностей вторичной переработки композиционного материала Cu–MMNCr. Представлен экономический анализ применения новой технологии изготовления электродов контактной сварки.

В *заключении* обобщены результаты, полученные по работе.

Научная новизна полученных результатов

1. Установлено, что за счет образования дефектов структуры при измельчении порошка 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 изучена гидродинамика свободной заливки расплава в форму для электрода и установлено образование тороидального вихря, замедляющего процесс

растворения наноразмерных частиц Cr, препятствующего их всплыванию на зеркало расплава и определяющего условия формирования структуры и свойств электрода из металломатричного композита Cu–MMNCr.

3. Впервые предложена модель дисперсно - дисперсионного упрочнения и 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 значения пластической деформации при высокой скорости горячей деформации повышают механические свойства электродов из Cu–MMNCr при последующем старении, причём, наибольшее влияние оказывают в комплексе среднее нормальное сжимающее напряжение и интенсивность касательных напряжений, приводящие к повышению плотности дислокаций.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость работы заключается в создании научных основ малооперационной технологии изготовления легирующе - армирующей таблетированной лигатуры на основе порошка Cu и наноразмерных частиц Cr, включающей способ введения и равномерного распределения наноразмерных частиц Cr в медной матрице и совмещённого процесса литья - штамповки электродов с повышенными свойствам для контактной сварки. Предложена модель дисперсно - дисперсионного упрочнения медной матрицы наноразмерными частицами хрома в процессе старения закаленного электрода, построенная на гипотезе нечётких множеств, и проведено компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов технологических процессов получения электродов.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов подтверждается использованием комплекса современных методов исследования, таких как оптическая и электронная микроскопия, рентгеноструктурный фазовый анализ, термодинамический анализ, определение твердости, микротвердости и удельной электропроводности, результаты которых не противоречат друг другу и опубликованным данным, полученным другими авторами. Компьютерное моделирование процессов литья и штамповки проведено с использованием программ ProCAST, Kompas 3D, Deform 3D.

Общая оценка диссертации

Диссертация состоит из введения, пять глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы из 103 наименований и трёх приложений. Работа хорошо оформлена, изложена на 133 страницах, содержит 20 таблиц и 72 рисунка. По теме диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах,

рекомендуемых ВАК РФ и зарегистрирован 1 патент на изобретение. Диссертация соответствует трем пунктам паспорта специальности 2.6.5 - Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Научные положения, сформулированные автором достоверны, обоснованы, обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью. Практическая значимость выполненных исследований подтверждается актами промышленных испытаний разработанных электродов и актом о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы, выполненной Бусыгиным С.Л., которые приведены в приложениях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе

При общем положительном мнении о работе в целом, она не лишена недостатков, по которым следует сделать следующие **замечания**:

1. При использовании состава таблетированной лигатуры: 0,83 мас. % медного порошка марки ПМС-1 и 0,17 мас. % наноразмерных частиц хрома Х99, автор не указывает процент угара легирующего элемента (хрома) в процессе плавки. Этот показатель может оказывать существенное влияние как на стоимость самой таблетированной лигатуры, так и на конечную стоимость изделий (электродов).

2. Не указан материал, геометрические размеры мелющих тел и соотношение их массы к массе порошка хрома, обрабатываемого в планетарно - центробежной мельнице. В процессе помола в состав порошка с высокой вероятностью могут попадать элементы мелющих тел. Но приведенные рис.3.1 б результаты микрорентгеноспектрального анализа порошка после помола не позволяют оценить изменения в элементном составе порошка, вызванные этой обработкой.

3. Требуют пояснения результаты, представленные на рис. 4.14 и 4.15. Согласно рис.4.14 после старения в микроструктуре присутствуют наночастицы хрома, однако на дифрактограмме, приведенной на рис.4.15, заметны только узкие рефлексы, что не типично для наноразмерных фаз.

4. При оценке возможностей вторичной переработки композиционного материала Cu-MMNCr (раздел 5.5) не указаны операции подготовки вторичного сырья к переплаву (удаление с поверхностей продуктов массопереноса, определения состава сплава и т.д.).

5. В целом, диссертация написана четким и понятным языком, с использованием научной лексики, логично выстроена и хорошо оформлена, хотя текст диссертации и автореферат, который полностью отражает ее содержание, содержит отдельные синтаксические и логические ошибки, а также нечеткие термины. Такие словосочетания как: «взаимодействие между частицами дислокаций» (с. 21), «остаточные выделения хрома в матрице» (с. 22), «зоны ГП, богатые растворенными веществами» (с. 22), «частицы фазы имеют разную размерность .. » (с. 89) и др., затрудняют понимание рассуждений автора.

Указанные выше замечания требуют реакции автора, но не влияют на общую положительную оценку работы.

Общее заключение по диссертации

Диссертационная работа Бусыгина Сергея Леонидовича «Разработка технологии производства изделий из композиционного материала с металлической матрицей на основе меди и армирующими наноразмерными частицами хрома» соответствует специальности 2.6.5 - Порошковая металлургия и композиционные материалы и является завершенной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, в которой на основании выполненных автором исследований усовершенствован процесс получения металломатричного композита Cu-MMNCr и разработана новая малооперационная технология изготовления из него электродов контактной сварки с повышенными функциональными и эксплуатационными характеристиками, что имеет существенное значение для развития страны. Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, а ее автор, Бусыгин Сергей Леонидович, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент:

профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

доктор технических наук

Петржик Михаил Иванович

«28» ноября 2023

Почтовый адрес: Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-т, д.4, стр.1
Телефон (рабочий): +7 499 236-55-20 Электронный адрес: petrzhik.mi@misis.ru.

Подпись д.т.н. Петржика М. И. заверяю

Проректор по науке и инновациям



ФИЛОНОВ М.Р.