

ОТЗЫВ

Официального оппонента Сметкина Андрея Алексеевича
на диссертационную работу Бусыгина Сергея Леонидовича
на тему «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 диссертационной 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 и разработки новой малоцикловой технологии изготовления из него электродов контактной сварки.

В связи с этим автор мотивированно выбрал **цель исследования**, заключающуюся в разработке малооперационной технологии производства электродов контактной сварки из композиционного материала с металлической матрицей на основе меди и армирующими наноразмерными частицами хрома (Cu-MMNCr). Для достижения этой цели поставлены следующие **задачи**:

1. Рассмотреть и проанализировать современное состояние вопроса повышения механических свойств при обеспечении высокой электропроводности материалов с медной матрицей;

2. Исследовать фракционный состав наноразмерного порошка хрома после помола и разработать способ его введения в расплав;

3. 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;

4. Изучить закономерности формирования структуры композиционного материала с металлической матрицей на основе меди при вводе армирующих наноразмерных частиц хрома;

5. Исследовать структуру и свойства композиционного материала Cu-MMNCr, полученного совмещенным способом литья - штамповки с последующей термической обработкой;

6. 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;

7. Разработать малооперационную технологию изготовления электродов контактной сварки из композиционного материала Cu-MMNCr с возможностью переработки вторичного медного сырья.

Основная идея диссертации заключается в разработке технологии изготовления легирующе - армирующей таблетированной лигатуры на основе порошка меди и наноразмерных частиц хрома, включающих способ введения и равномерного распределения наноразмерных частиц хрома 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.

Новые научные результаты, полученные автором:

1. Установлено, что за счет образования дефектов структуры при измельчении Cr, краевой угол смачивания медью наноразмерных частиц Cr при 1250 °C 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.

Достоверность полученных результатов подтверждается современными методами 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 MicrosoftOfficeExcel.

Научно-квалификационная 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.

По теме научно-квалификационной работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ и 1 патенте на изобретение.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной 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».

Замечания по диссертационной работе:

1. В подразделе 2.1.1 не конкретизирован задаваемый массовый процент хрома для всей отливки, а также не указаны в явном виде параметры измельчения металлического хрома в планетарно-центробежной мельнице такие, как соотношение масс мелющих тел к массе обрабатываемого материала, среда обработки, из какого материала изготовлены мелющие тела и т.п.

2. В разделе 2.2 не указано, каким методом определяли размер частиц измельченного в мельнице хрома. Существует много различных методов гранулометрического анализа, позволяющих охарактеризовать распределение по размерам, средний размер и др. статистические параметры распределения. При этом методы имеют свои ограничения и используются в анализе частиц на определенных масштабных макро-, мезо-, микро-, наноуровнях.

3. В разделе 3.1 на рис. 3.1 представлен результат элементного анализа только в одной точке. Интерпретировать его как общий для всего измельченного порошка некорректно. Вполне вероятно, что в процессе измельчения происходит намол примесей с оснастки мельницы в обрабатываемый порошок хрома. Так же в таблице 3.1 не указаны единицы измерений.

4. В подразделе 3.3 утверждение об уменьшении угла смачивания медью частиц хрома с увеличением температуры не отражено на рис. 3.10.

5. В подразделе 3.4.3 в анализе элементного состава областей с не растворившимися частицами хрома нет интерпретации зафиксированного в EDX-спектрах различного соотношения содержания хрома и меди (рис. 3.20).

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы Бусыгина С.Л.

Общее заключение по диссертационной работе:

Диссертационная работа Бусыгина Сергея Леонидовича «Разработка технологии производства изделий из композиционного материала с металлической матрицей на основе меди и армирующими наноразмерными частицами хрома», имеет внутреннее единство и является завершенной научно-

квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технологические решения по получению изделий из композиционного материала Cu-MMNCr, имеющие существенное значение для развития страны. Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор Бусыгин Сергей Леонидович достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 - «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

Официальный оппонент,
кандидат технических наук,
доцент кафедры Механики композиционных
материалов и конструкций
ФГАОУ ВО «Пермский
национальный исследовательский
политехнический университет»

 Сметкин Андрей Алексеевич

Подпись к.т.н., доцента Сметкина А.А. заверяю.

Ученый секретарь ПНИПУ, к.т.н., доцент  /В.И. Макаревич/

«13» ноября 2023

Адрес: Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-кт, д. 29, кафедра Механики композиционных материалов и конструкций. E-mail: smetkinaa@pstu.ru. Тел. 89124836345