



«УТВЕРЖДАЮ»
И.о. проректора по науке и стратегическим проектам,
Национального исследовательского
Томского политехнического университета
А.С.Тоголев
«02» 11 2023 г.

ведущей организации федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет»

на диссертационную работу Бусыгина Сергея Леонидовича
«РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ НА ОСНОВЕ МЕДИ И АРМИРУЮЩИМИ
НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ХРОМА»,

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

На отзыв представлены рукопись и автореферат диссертации «Разработка
технологии производства изделий из композиционного материала с металлической
матрицей на основе меди и армирующими наноразмерными частицами хрома».

1. Актуальность темы исследования. Основой достижения 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 и технологий их обработки. Традиционные технологии производства, основанные на применении хромовых бронз, имеют ряд недостатков: большой объем отходов материала в процессе обработки, длительная многоцикловая технология и сложный процесс изготовления, ограниченность по форме и размерам, низкие эксплуатационные показатели. В последнее время получили развитие металлические матричные композиты, армированные твёрдыми частицами. С развитием нанотехнологий армирующие частицы масштабируются до наноуровня для повышения свойств композитов с металлической матрицей. Однако наноразмерные армирующие частицы при переработке имеют тенденцию к агломерации. Поэтому задачи повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик медных сплавов с высокой тепло- и электропроводностью, стойкостью к деформации и разрушению в широком интервале температур и давлений, являются актуальными при разработке процесса получения композиционного материала Cu-MMNCr (Cu металл - матричный с армированием наноразмерным Cr) и технологии изготовления из него электродов контактной сварки.

2. Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые изучен характер термогидродинамики свободной заливки расплава в форму для электрода, установлено образование тороидального вихря, замедляющего процесс растворения наноразмерных частиц Cr и определяющего условия формирования структуры и свойств композиционного материала Cu-MMNCr;
- впервые предложена модель 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; -показано, что малые горячие пластические деформации при высокой скорости деформации повышают механические свойства композиционного материала Cu–MMnCr при старении, а наибольшее влияние оказывают в комплексе среднее нормальное сжимающее напряжение и интенсивность касательных напряжений, приводящие к изменению структуры композита.

3. Практическая значимость представленной работы.

На основе предложенной модели дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди и 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. Разработаны технологические режимы и способ изготовления электродов контактной сварки, защищенный патентом РФ № 2412035 от 20.02.2011.
4. 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.

4. Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечиваются системным подходом к исследованиям с привлечением стандартизованных экспериментально-аналитических методов испытаний и современных методов исследования структуры композитов; совпадением данных лабораторных и опытных испытаний в реальных промышленных условиях.

5. Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 103 наименований. Работа изложена на 133 страницах, содержит 72 рисунка, 20 таблиц и 3 приложения.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, обозначена основная цель, определены задачи и сформулирована научная новизна, приведена практическая ценность, указаны основные направления реализации диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы в области существующих подходов к созданию композитов для контактной сварки. Выявлено противоречие между повышением механических свойств и снижением электропроводности, поэтому установление компромиссного соотношения между прочностью, твёрдостью и электропроводностью является фундаментальным научным вопросом и играет решающую роль в разработке состава и технологии производства сплавов меди. По результатам обзора современного состояния исследований в диссертационной работе сформулированы основные задачи разработки композитов для электродов контактной сварки.

Во второй главе даны характеристики объектов и описаны методики исследований, сформулированы требования к выбору материалов. Представлены материалы, оборудование и методы исследований структуры и свойств композиционного материала Cu–MMnCr.

В третьей главе приведены результаты исследований фракционного состава порошка хрома после помола в планетарно – центробежной мельнице ПЦМ–50–НАНО и разработан способ его введения в расплав с помощью таблетированной лигатуры Cu–Cr. 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) 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, и при дальнейшем повышении температуры плавно уменьшается, что приводит к увеличению седиментационной устойчивости наноразмерных частиц Cr в расплаве. С помощью компьютерного моделирования проанализирован характер термогидродинамики процесса литья и полученной структуры. Предложена модель дисперсно – дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами Cr в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди.

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 позволило установить, что температура в поверхностных слоях в процессе штамповки заготовки снижается с 950 °С до 725 °С за 0,17 с, что позволяет производить закалку сплава, исключая дополнительную операцию нагрева для закалки. Установлены взаимосвязи между распределением твёрдости и параметрами теплового и напряженно – деформированного состояний 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. Технология получения литых – штампованных электродов с последующей термообработкой обеспечивает повышение твердости до 142 НВ, микротвердости до 378 НВ и электропроводности до 86 % IACS.

В пятой главе проиллюстрирована сварка арматуры и показаны линейные зависимости повышения параметров твёрдости, микротвёрдости и удельной электропроводности у электродов от количества сварных соединений. 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 из композиционного материала Cu–MMNCr с аналогами, изготовленными по разным технологиям, указывает на хорошую стойкость экспериментальных образцов. Построена зависимость износа рабочей части электродов от количества сварных контактов. Новая малоцикловая технология изготовления электродов контактной сварки из композиционного материала Cu–MMNCr позволяет перерабатывать вторичное сырьё, что в свою очередь повышает экологичность производства. Наиболее важными результатами настоящего исследования следует отметить следующие:

- показано, что наноразмерные частицы хрома формируют компромиссные соотношения между прочностью, твёрдостью и электропроводностью без существенного снижения электропроводности за счет формирования структурных характеристик (границы зёрен, границы двойников, армирующие включения и дислокации);
- показано, что после обработки исходного порошка хрома в планетарно – центробежной мельнице полученный наноразмерный порошок (среднее значение 54,6 нм) за счет механохимической активации хрома приводит к увеличению седиментационной устойчивости наноразмерных частиц в расплаве;

- с использованием компьютерного моделирования свободной заливки (гравитационное литье) описан характер гидродинамики расплава, определяющий формирование структуры и свойств композиционного материала;
- предложена модель дисперсно – дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в структурных изменениях композиционного материала с металлической матрицей на основе меди, описывающая их вклад в твердый раствор и вторую упрочняющую фазу при старении (дисперсионное упрочнение);
- выведены взаимосвязи между распределением твердости и параметрами теплового и напряженно – деформированного состояния в объеме изделия из композиционного материала Cu–MMNCr при совмещенном способе литья – штамповки с последующей термической обработкой. Показано повышение количества сварных соединений с увеличением твердости HB, микротвердости HV и удельной электропроводности;
- показано, что при внедрении новой малоцикловой технологии, затраты на изготовление электродов контактной сварки по сравнению с покупкой готовых электродов, сокращается в несколько раз.

6. Замечания по диссертационной работе. При ознакомлении с текстом диссертации и авторефератом возникли следующие замечания:

1. В постановке задачи исследования автор в досточной степени не обосновывает, почему повышение физико – механических и эксплуатационных характеристик медных сплавов, высокой тепло– и электропроводности в широком интервале температур и давлений при разработке электродов контактной сварки следует искать именно в области нанотехнологий. Ведь нанонаполнители напрямую не связаны с упрочнением матрицы, но несут массу проблем по их распределению и получению (включая высокую стоимость).
2. При анализе механизмов обеспечения дисперсного и дисперсионного упрочнения наноразмерными частицами хрома в *структурных изменениях* композиционного материала с металлической матрицей на основе меди (глава 4 и положение №3, выносимое на защиту) не доказательно указывается на повышение плотности дислокаций вследствие изменения напряженно – деформированного состояния. Изменение же фазового состояния (выпадение второй фазы Cr) вследствие старения подтверждено рентгено-фазовым анализом, а вопрос о роли дислокаций скорее остается дискуссионным.
3. В заключении указано, что малооперационная технология изготовления электродов контактной сварки из композиционного материала Cu–MMNCr, позволяющая перерабатывать вторичное медное сырье, повышает экологичность производства. Однако при этом не проведена оценка экономической эффективности использования нанонаполнителей при производстве композитов для электродов.

Указанные замечания не относятся к сути основных выводов и защищаемых положений, а также не влияют на общую высокую оценку диссертации.

7. Оформление диссертации. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям (п.п. 9-14 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям»). Материал диссертации изложен последовательно и логично грамотным техническим языком. **Автореферат** диссертации соответствует её содержанию.

8. Публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 9 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, получен 1 патент РФ, 2 акта промышленных испытаний.

9. Общая характеристика работы. Диссертационная работа Бусыгина Сергея Леонидовича по полученным и опубликованным результатам является завершённым

научным исследованием, выполненным на достаточно высоком научном и методическом уровнях, что подтверждается четкой формулировкой цели и задач исследования, обоснованностью используемой методологии.

Основные выводы базируются на анализе большого объема экспериментальных работ автора с использованием современных экспериментальных и аналитических методов исследования, интерпретации данных известных положений материаловедения.

Поставленные в работе задачи были решены автором. Сформулированные выводы характеризуются научной новизной.

10. Заключение. Проведенный анализ позволяет утверждать, что диссертационная работа Бусыгина Сергея Леонидовича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена задача усовершенствования процесса получения композиционного материала Cu–MMNCr, имеющая существенное значение для новой малоцикловой технологии изготовления электродов контактной сварки с повышенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, высокой тепло- и электропроводностью, стойкостью к деформации и разрушению в широком интервале температур и давлений.

По своей актуальности, уровню решенных задач, научной новизне, теоретической и практической значимости, обоснованности научных положений и выводов, достоверности научных результатов, уровню апробации и опубликованию основных положений, диссертационная работа Бусыгина Сергея Леонидовича «Разработка технологии производства изделий из композиционного материала с металлической матрицей на основе меди и армирующими наноразмерными частицами хрома» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а также п.п. 9-14 «Положения о присвоении ученых степеней ВАК Минобрнауки РФ», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а также паспорту специальности 2.6.5, а её автор, Бусыгин Сергей Леонидович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Диссертационная работа и отзыв заслушаны, обсуждены и одобрены на расширенном семинаре отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский Томский политехнический университет (протокол № 96 от 01.11.2023 г.)

Председатель семинара

Профессор Отделения материаловедения

Инженерной школы новых производственных технологий НИ ТПУ

доктор технических наук, профессор



Панин Сергей Викторович

(специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела)

Панин С.В., ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Телефон: 8(3822) 286-904,

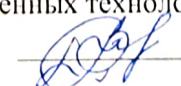
E-mail: svp71@tpu.ru

Секретарь семинара

Доцент Отделения материаловедения

Инженерной школы новых производственных технологий НИ ТПУ

кандидат технических наук



Ваулина Ольга Юрьевна