

## ОТЗЫВ

официального оппонента Романова Дениса Анатольевича  
на диссертационную работу Рябинкиной Полины Андреевны  
«Структура и свойства композиционных покрытий системы медь-хром,  
полученных методом детонационного напыления», представленную  
на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 2.6.17 – «Материаловедение»

**Актуальность темы диссертации.** Разработка новых функциональных покрытий является одной из типичных задач, решаемых материаловедами. Газотермическое напыление порошковых смесей позволяет получать композиционные покрытия различных составов. Например, при формировании покрытий электротехнического назначения возможно получение покрытий с медной матрицей, упрочненной керамическими частицами, а также частицами тугоплавких металлов, характеризующихся низкой растворимостью в меди. В этих случаях медная матрица обеспечивает высокую электропроводность, в то время как добавки приводят к увеличению твердости и износостойкости покрытий. Среди множества технологий газотермического напыления стоит выделить метод детонационного напыления, использование которого позволяет получать композиционные покрытия с низкой пористостью, высокими адгезионными свойствами и хорошим соответствием состава формируемых покрытий составам исходных порошковых смесей. Актуальными также являются исследования, посвященные анализу процессов, имеющих место при взаимодействии частиц с подложкой при напылении. Стоит отметить, что современные тиристорные коммутационные аппараты переменного и постоянного тока в случае воздействия на них интенсивного электромагнитного излучения мгновенно приходят в негодность. По этой причине необходимо разрабатывать новые высоконадежные дугостойкие электроконтактные материалы, в том числе и покрытия. Для таких линейных операций как подъем и спуск груза на башенном или козловом кране медные контактные пары в контакторах и прочих высоковольтных выключателях будут использоваться десятилетиями в связи с простотой их чистки и замены, вместе с тем материал электрических контактов необходимо улучшать современными методами.

**Анализ содержания диссертации.** Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, трех приложений и списка литературы, состоящего из 239 источников. В работе 186 страниц, включая 66 рисунков и 12 таблиц.

**Во введении** обсуждается актуальность темы исследования и степень ее разработанности; сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены данные об апробации результатов.

**В первом разделе** приведен литературный обзор по теме исследования. В нем описаны основные методы получения композиционных материалов и покрытий с медной матрицей. Представлен анализ источников, в которых охарактеризованы результаты, полученные как отечественными, и зарубежными исследовательскими группами, занимающимися разработкой композитов на основе меди.

**Во втором разделе** охарактеризованы материалы исследования, приведено описание установки, использованной для напыления покрытий, и режимов получения материалов. Представлено подробное описание примененного метода численного моделирования, постановки задачи, решаемой в рамках диссертационной ра-

боты; методов исследования структурно-фазового состояния материалов и их свойств.

**Третий раздел** посвящен оценке влияния исходных параметров напыляемых частиц на структуру и геометрию формируемых сплэтов. Процессы, сопутствующие столкновению единичной частицы с подложкой при различных режимах, проанализированы с применением численного моделирования. Исследованы особенности структуры медных покрытий, оценено влияние режимов напыления на свойства покрытий и их структурные характеристики.

**В четвертом разделе** диссертации описаны результаты исследования структуры, фазового и элементного составов, механических и физических свойств, стойкости к дуговой эрозии композиционных медно-хромовых покрытий. Показано влияние фракционного состава исходных порошковых смесей, соотношения компонентов в смеси, дистанции напыления, используемого заряда взрывчатой смеси на соответствие составов покрытий составам исходных смесей, пористость, шероховатость, твердость, адгезионную прочность, электрическое сопротивление и электроэрозионную стойкость полученных материалов.

**В пятом разделе** отражено практическое использование результатов исследований, представленных в диссертации. Результаты исследований используются в производственной деятельности ООО «Сибирские технологии защитных покрытий». Разработанные технологические параметры детонационного напыления композиционных покрытий переданы в ООО «Коммутационные, электронные, преобразовательные системы».

**В заключении** сформулированы основные выводы по проведенным исследованиям и описаны планы дальнейшего развития темы работы.

**Обоснованность научных положений и выводов**, сформулированных в диссертационной работе Рябинкиной П.А., подтверждается большим количеством экспериментальных результатов, полученных на аттестованном современном оборудовании, и их согласием с результатами, полученными и опубликованными другими авторами, ведущими исследования в области разработки композиционных материалов с медной матрицей.

**Достоверность** материалов, изложенных в диссертации Рябинкиной П.А., подкреплена обсуждением полученных результатов на всероссийских и международных конференциях. Результаты диссертации Рябинкиной П.А. опубликованы в 4 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых наукометрическими базами Web of Science и Scopus.

**Научная новизна** диссертационной работы связана с тем, что с использованием дифракции синхротронного рентгеновского излучения определены характеристики микроструктуры медных покрытий, полученных методом детонационного напыления на медных и стальных подложках. Установлено, что в сформированных покрытиях плотность дислокаций возрастает в 5,5–13,5 раз по сравнению с исходным порошком меди. С использованием модифицированных методов профильного анализа дифракционных пиков доказано, что в структуре полученных покрытий формируются преимущественно винтовые дислокации. С использованием подхода, основанного на численном моделировании, соискателем показано, что при взаимодействии нагретых, но не расплавленных частиц с подложкой происходит их частичное оплавление. Установлено, что геометрические параметры сплэтов, выявленные расчетным путем, согласуются с экспериментальными данными по детонационному напылению единичных частиц.

На основании проведенных исследований Рябинкиной П.А. определены параметры детонационного напыления, обеспечивающие получение композиционных покрытий системы медь-хром, характеризующихся равномерным распределением частиц упрочняющей фазы в матрице, низкой пористостью ( $\sim 1\%$ ), высоким уровнем твердости и адгезионной прочности, а также удельным электрическим сопротивлением в диапазоне  $4,3 \cdot 10^{-8} - 7,1 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Показано также, что образцы с детонационными покрытиями, содержащими от 33 до 43 масс. % хрома, при воздействии электрической дуги не склонны к формированию выступов (выбросов материала), способствующих интенсификации эрозии поверхностных слоев при замыканиях контактов. Подтверждаю опубликование основных научных результатов диссертации в научных изданиях.

**Теоретическая значимость** заключается в том, что результаты, полученные в рамках выполнения диссертационной работы, вносят вклад в расширение представлений о процессах, сопутствующих взаимодействию частиц порошка и подложки в условиях детонационного напыления, и особенностях формирования композиционных покрытий системы медь-хром со структурой псевдосплавов.

**Практическую значимость** работы подтверждают акты использования результатов диссертации компаниями, деятельность которых связана с нанесением защитных функциональных покрытий различного назначения, а также с разработкой и производством электрооборудования. Возможные конкретные пути использования результатов переставляются оппоненту как производство электроэрозионно-стойких медных электрических контактов различной номенклатуры, упрочненных покрытиями системы Cu–Cr различного состава, полученных методом детонационно-газового напыления.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.17 – Материаловедение в части пунктов 1, 2, 9, 11, 16. Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию, основным идеям и выводам диссертации.

**Замечания по диссертационной работе следующие.**

1. Почему в качестве подложек использованы именно сталь Ст3 и медь М1?
2. Проводились ли исследования изменения структуры подложки после напыления покрытий? Частицы же осаждаются в нагретом и расплавленном состоянии, не приводило ли тепловое воздействие к росту зерен в подложке, например?
3. Для более корректной оценки стойкости к дуговой эрозии в качестве образца сравнения стоило использовать один из ряда имеющихся в продаже материалов аналогичного состава.
4. Проводились ли тесты на сходимость при выборе размеров SPH-частиц при моделировании?
5. В степени разработанности темы исследования не указаны зарубежные организации и зарубежные научные группы по изучению покрытий на основе меди с упрочняющими добавками. Также и по работам с детонационным напылением.
6. Излишне большой список литературы – 239 наименований.
7. Почему точки на рис. 2.3, с. 49 диссертации точки соединены отрезками?
8. Почему в ряде случаев при увеличении дистанции напыления увеличивается твердость покрытий (текст на с. 115, второй абзац), а иногда наоборот уменьшается (текст на с. 115, третий абзац).
9. Почему выбирали именно такие значения заполнения заряда взрывчатой смеси, соотношения порошков и прочих технологических параметров детонационно-

газового напыления? Почему не использовали более дискретный шаг изменения этих параметров?

### Заключение

Диссертационная работа Рябинкиной Полины Андреевны «Структура и свойства композиционных покрытий системы медь-хром, полученных методом детонационного напыления», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение, является научно-квалификационной работой, в которой изложено решение разработки медно-хромовых покрытий, полученных методом детонационно-газового напыления, для применения в качестве электроэрозсионностойких электрических контактов высоковольтного оборудования.

Все вышеуказанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации. Работа Рябинкиной П.А. является законченным научным исследованием, выполнена на актуальную тему и содержит результаты, отличающиеся научной новизной. По содержанию и объёму исследований, новизне, научной и практической значимости диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Рябинкина П.А. заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение.

Официальный оппонент

Доктор технических наук (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния), доцент (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния), заведующий лабораторией электровзрывного напыления высоконадежных покрытий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет».

Дата подписания  
02.12.2024 г

Романов Денис Анатольевич

Подпись Романова Дениса Анатольевича удостоверяю.



Проректор по научной и инновационной деятельности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», доктор технических наук, профессор.

Сергей Валерьевич

Даю свое согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационное дело П.А. Рябинкиной.

Адрес: 654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, стр. 42.

Телефон/факс: +7 (3843) 78-43-91. E-mail: romanov\_da@physics.sibsiu.ru

Принято в печать 03.12.2024  Романов Д.А.  
С отзывом ознакомлена 03.12.2024  Рябинкина П.А.