

ОТЗЫВ

официального оппонента

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 диссертационной работы

Медно-хромовые композиты широко применяются при изготовлении электрических контактов вакуумных выключателей и другого высоковольтного оборудования. Для получения таких материалов традиционно используют методы порошковой металлургии. В диссертационной работе Рябинкиной П.А. предлагается альтернативный подход к проблеме изготовления разрывных контактов, основанный на нанесении покрытия из дугостойкого материала на медную основу. При таком технологическом варианте не требуется дополнительная операция напайки рабочей части к тыльной части электрического контакта.

В качестве способа получения дугостойких покрытий в работе использовано детонационное напыление порошковых смесей медь – хром. Этот способ является одним из наиболее технологичных методов газотермического напыления покрытий, который широко используется для получения функциональных покрытий различного назначения. Однако данных о применении этого метода для формирования композиционных покрытий с медной матрицей, упрочненных частицами тугоплавких металлов, в научно-технической литературе представлено недостаточно. В связи с этим, диссертационная работа Рябинкиной П.А., направленная на разработку медно-хромовых композиционных покрытий с использованием метода детонационного напыления, является актуальной как с научной, так с практической точки зрения.

Структура и содержание диссертационной работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, оценена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научная новизна и практическая значимость полученных при выполнении работы результатов, изложены положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов работы. Представлены сведения об объеме работы, апробации результатов диссертации и основных публикациях.

Первый раздел диссертации посвящен анализу научно-технической литературы, посвященной методам получения металлматричных композиционных материалов, в том числе на основе меди. Описаны основные технологические варианты: введение

упрочняющей фазы в расплав, пропитка тугоплавкого каркаса, твердофазное и жидкофазное спекание порошковых смесей, в том числе современный метод искрового плазменного спекания. Рассмотрены газотермические методы нанесения покрытий, описаны особенности структуры и свойств композиционных покрытий с медной матрицей, упрочненной керамическими частицами – оксидами, боридами, карбидами, частицами тугоплавких металлов. Обоснована целесообразность выбора метода детонационного напыления для получения дугостойких материалов для электрических контактов вакуумных выключателей.

Во втором разделе представлены данные об использованных в работе материалах, описана конструкция детонационного комплекса, приведены режимы получения медных покрытий и единичных сплэтов, дана характеристика примененного метода численного моделирования процесса формирования сплэтов в условиях детонационного напыления медного порошка. Приведены составы порошковых смесей, использованных для напыления композиционных покрытий, описаны методы структурных исследований, а также методики измерения твердости, адгезионной прочности, электрического сопротивления, стойкости разрабатываемых материалов к дуговой эрозии.

В третьем разделе представлены результаты исследований единичных сплэтов, полученных при детонационном напылении порошка меди на медные и стальные подложки с использованием разных режимов. Описаны структурные особенности различных типов сплэтов. Теоретические значения скорости и температуры частиц при изменении объема заполнения ствола взрывчатой смесью были определены в программе L_И и использованы в качестве исходных параметров при моделировании процесса взаимодействия частицы порошка с подложкой в процессе напыления. Геометрия полученных при моделировании сплэтов сравнивались с экспериментальными данными, была выявлена хорошая согласованность полученных результатов. В разделе также представлены результаты структурных исследований медных покрытий. С использованием методов профильного анализа дифракционных пиков было установлено, что в напыленном материале возрастает плотность дислокаций, уменьшается размер областей когерентного рассеяния, наблюдается преимущественное формирование винтовых дислокаций.

В четвертом разделе представлены результаты исследования влияния фракционного состава, дистанции напыления и используемого заряда взрывчатой смеси на структуру и свойства композиционных покрытий. Установлено, что покрытия, обладающие наиболее благоприятным сочетанием структуры и свойств, формируются при использовании порошковой смеси частиц меди и хрома одинакового фракционного состава, дистанции напыления 150 мм и объема взрывчатой смеси, равного 60 % от общего объема

ствола. Разработанные материалы исследовались на стойкость в условиях воздействия электрической дуги. Было установлено, что в покрытиях, сформированных при напылении чистого порошка меди, а также смеси, содержащей 25 масс. % хрома, образуются выступы металла, которые могут приводить к последующей интенсификации эрозии поверхности материала. При увеличении содержания хрома в покрытиях до 43 масс. % формирования данных выступов зафиксировано не было.

В пятом разделе даны рекомендации по практическому применению полученных в работе результатов исследований композиционных медно-хромовых покрытий. Разработанные рекомендации по составам порошковых смесей и режимам напыления переданы в ООО «Коммутационные, электронные, преобразовательные системы» для использования при конструировании вакуумных контакторов и высоковольтных вакуумных выключателей. В диссертационной работе также показана эффективность сочетания экспериментальных методов структурных исследований и методов численного моделирования при разработке технологических процессов нанесения покрытий и оптимизации режимов их получения. Данные результаты работы используются в производственной деятельности ООО «Сибирские технологии защитных покрытий», которое занимается нанесением детонационных покрытий на ответственные детали нефтегазового оборудования.

В заключении приведены основные выводы, сформулированные на основе результатов, полученных при выполнении диссертационной работы, изложены дальнейшие планы по развитию темы исследований.

Наиболее важные научные и практически значимые результаты работы, отличающиеся новизной:

- Установлены 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 $4,3 \times 10^{-8} - 7,1 \times 10^{-8} \text{ Ом} \times \text{м}$.

- 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, 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.

- Показано, 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.

Достоверность научных результатов, обоснованность выводов и научных положений, выносимых на защиту, обеспечены использованием взаимодополняющих методов анализа и современного аналитического и испытательного оборудования. Результаты диссертационной работы опубликованы в 10 печатных работах, из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК и рецензируемых в базах Web of Science и Scopus, 6 – в сборниках научных трудов конференций различного уровня.

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. В диссертации следовало бы привести равновесную диаграмму медь – хром и обсудить возможное влияние вида диаграммы на взаимодействие порошковых компонентов в термокинетических условиях детонационного напыления. Это облегчило бы понимание структурных превращений при напылении порошковых смесей и интерпретацию формирующейся структуры покрытий.
2. Сведения об использованных в работе порошках меди и хрома неполные. Отсутствуют сведения о содержании газовых примесей, в особенности кислорода. Данные о содержании кислорода в исходных порошках, в совокупности с результатами дополнительного химического анализа на кислород в напыленных покрытиях позволили бы установить источник кислорода для образования окислов, обнаруженных по результатам рентгеноструктурного анализа.
3. На рисунке 2.3. (стр. 49) диссертации приведены расчетные зависимости температуры и скорости частиц меди различного размера при вылете из ствола от объема взрывчатой смеси. Результаты получены с использованием численной модели, реализованной в виде компьютерного кода *LIF*. При этом не указано, какие характеристики порошка учитываются и при каких допущениях проводился расчет. Это затрудняет оценку надежности и достоверности полученных результатов.

Указанные выше замечания не изменяют общую положительную оценку диссертационной работы П.А. Рябкиной. Материал рукописи изложен грамотно, результаты работы проиллюстрированы качественным графическим материалом. Выводы по работе обоснованы результатами проведенных экспериментов. Автореферат достаточно полно отражает основные результаты и выводы диссертации.

Диссертация представляет собой законченное научное исследование, которое посвящено решению важной практической задачи и соответствует паспорту научной специальности 2.6.17 – Материаловедение в части пунктов 1, 2, 9, 11, 16.

В соответствии с пунктом П.9 Положения о присуждении ученых степеней диссертация может рассматриваться как научно-квалификационная работа, в которой изложены результаты исследований, направленных на разработку композиционных медно-хромовых покрытий электротехнического назначения.

По уровню решаемых задач, научной новизне, практической значимости и объему полученных результатов диссертационная работа «Структура и свойства композиционных покрытий системы медь-хром, полученных методом детонационного напыления» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение, а ее автор Рябкина П.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент: доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Лаборатории физики консолидации порошковых материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения

наук (ИФПМ СО РАН)

Прибытков Геннадий Андреевич

Подпись Прибыткова Геннадий Андреевич
заверяю.

Ученый секретарь ИФПМ СО РАН
кандидат физико-математических наук

Н.Ю. Матолыгина

22 » ноября 2024 г.
М.П.

Почтовый адрес: пр. Академический, 2/4, г. Томск, Россия, 634055
телефоны: мобильный 8 (906) 860-04-49, рабочий +7 (3822) 28-69-67
e-mail: gapribyt@mail.ru

Присутств. в совете 29.11.2024 [подпись] Перин В.В.
С отзывом ознакомлена 02.12.2024 [подпись] Рябкина П.А.