

**Отзыв официального оппонента на диссертационную работу Лебедева Дмитрия Иосифовича «Формирование структуры и свойств контактной поверхности порошковых покрытий системы Ni-Cr-B-Si с ультрадисперсными добавками» представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09-Материаловедение (машиностроение)**

За последние годы исследователи отдают приоритет разработке технологических режимов упрочнения и восстановления деталей машин и механизмов с применением высокоэнергетических процессов формирования покрытий на основе порошковых смесей сплавов, тугоплавких металлов, нитридов, оксидов и других компонентов, которые улучшают структуру и свойства покрытий. Покрытия, получаемые с использованием нанопорошков в качестве модификаторов имеют, как это следует из анализа литературных данных, неоднородное строение, трудно контролируемую пористость, фазовый состав и всё это связано со спецификой применяемых технологических режимов, с неравновесными термодинамическими параметрами в зоне нагрева частиц и их последующим охлаждением на поверхности обрабатываемой детали. При наличии современных физико-химических методов анализа фазового, элементного состава, структуры, свойств покрытий исследователям удаётся в большинстве случаев однозначно интерпретировать многие функциональные свойства покрытий. Однако если речь идёт об износостойких твёрдых покрытиях, которые должны в процессе эксплуатации взаимодействовать с поверхностями изделий, то кроме исходной информации о составе и структуре покрытий, необходимо иметь экспериментальные данные позволяющие прогнозировать с определённой долей вероятности долговечность и надёжность работы покрытий. По-видимому, ответить на такой вопрос при современном накопленном знании о свойствах покрытий не всегда возможно. Сделать прогноз о работоспособности покрытия только на основе его состава, структуры без учёта свойств контактирующего с ним материала контртела не представляется возможным. Но как повлияют свойства материала контртела и покрытия на износостойкость рассматриваемой системы при трении? По какому параметру или критерию можно сделать прогноз о работоспособности? Для ответа на эти вопросы автором работы была поставлена задача всестороннего изучения пары трения «модифицированное покрытие-металлическое контртело» с оценкой износостойкости на основе данных по исследованию микрогеометрии контактных поверхностей трения, отражающей взаимосвязь структуры материалов. Следует согласиться с автором, что выбранная тема исследования является актуальной, а для её решения потребуются усилия многих исследователей и не традиционные методы её решения. Как и любая неразработанная научная проблема должна в своём развитии пройти ряд стадий и одной из таких стадий является накопление экспериментальных данных, подтверждающих выдвигаемые автором критерии оценки исследуемой системы. Ожидать на этом этапе следует только надёжных научно обоснованных экспериментальных данных, которые, по мере их накопления, будут служить базой для научных обобщений. В работе поставлена цель - установление закономерностей формирования структуры и фрикционного

взаимодействия контактных поверхностей при трении скольжения покрытий из сплавов системы Ni-Cr-B-Si с ультрадисперсными модифицирующими добавками шпинелей  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  и  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$  и провести: испытание на износ модифицированных порошковых покрытий при трении скольжения с металлическими контртелами; исследование закономерностей формирования и взаимосвязи микрогеометрии контактных поверхностей при трении.

Результаты исследований, представленные автором в диссертационной работе, изложены на 142 страницах, включают введение, четыре главы, 85 наименований литературных источников, 41 рисунков, 8 таблиц и три приложения на 7 страницах. Основные результаты исследования опубликованы в 9 статьях, в 8 журналах рекомендованных ВАК по специальности и апробированные на многих научно-технических конференциях.

В первой главе представлен обзор методов исследования, структуры, физико-механических и трибологических свойств порошковых покрытий, формируемых при газотермических режимах с использованием различных по составу и гомогенности порошков. Проанализированы методы испытаний на износ покрытий, дан анализ развития работ по трибологии, отмечается необходимость создания унифицированных методов сравнительных и паспортных триботехнических испытаний для производственных целей. Отмечается отсутствия единого методологического подхода к контролю и управлению значениями входов трибологической системы. Отмечу некоторые неточности в изложении. При определении модификаторов первого и второго рода (стр. 12) автор приводит определение модификатора второго рода—это растворимые вещества, адсорбирующие что-то или всё же адсорбирующиеся на гранях зародышей, изменяющие межфазное натяжение? На стр.13 дана ссылка на [2,9] и приведена фраза: «в соответствии с физической классификацией нано материалов, размер структурного фрагмента имеет порядок характерного размера физического явления». Что за размер структурного фрагмента и размер явления? Можно ли их сравнивать?

Из первой главы автор делает вывод, что исследования свойств покрытий с модифицирующими добавками остаются актуальными, так как полученные данные позволят обосновать их влияние на ресурс и работоспособность покрытий в условиях высоких температур и ударных нагрузках. Остаётся нерешённой и задача, по какому параметру сравнивать покрытия близкие по составу и испытанные в одинаковых режимах трения.

Во второй главе представлены результаты исследования состава, структуры и микротвёрдости материалов покрытий и контртел. В качестве объектов исследования взяты газотермические покрытия с добавками шпинелей в качестве модификаторов. С подобными добавками работали и другие исследователи, но автор расширил диапазон концентраций добавок (в качестве основы взят порошок ПР-Н70Х7С4Р4). Напыление и оплавление проводилось газовой горелкой. Описаны методика приготовления шлифов, типы испытательных машин, состав материала контртел, методика измерений шероховатости на профилографе SJ-201P, но не приведены температурные режимы обработки. В разделе 2.2 приведены результаты металлографического анализа микроструктуры поверхности покрытий при трении скольжения. Как утверждает автор,

увеличение содержания ультрадисперсных добавок с 0,05 до 0,2 % приводит к повышению дисперсности упрочняющих фаз (ссылка на рис. 2.8), ...а также степени пресыщения твёрдого раствора на основе Ni. Вследствие этого микротвёрдость покрытия повышается (стр.50). О каких упрочняющих фазах идёт речь? Из рисунка о каких либо фазах трудно сделать вывод. Взаимодействует ли добавка (шпинель) с фазами исследуемой системы? Если не взаимодействуют, то при повышении концентрации шпинели происходит разрушение покрытия? Приведённые изображения рис. 2.7-2.9 мне показались малоинформативными. Как расшифровать «...увеличение содержания ультрадисперсных добавок приводит к появлению микроструктуры покрытия, в которой отдельные частицы сохраняют индивидуальность по форме и объёму. Это, безусловно, приводит к снижению микротвёрдости покрытия.» (стр.50). Индивидуальность относится к частицам добавки?

Контртела при исследовании покрытий на износ были выполнены из ВК6 и стали Ст6. Измерения микротвёрдости проведены на микротвердомере «ПМТ-3М» с нагрузкой на индентор 100 г. В результате проведённых исследований структуры и микротвёрдости автором было показано, что до 0, 2% добавки шпинели микротвёрдость покрытия увеличивается в 1,3-1,4 раза. Для контртела из ВК6 характерна двухфазная микроструктура состоящая из кристаллов WC и участков твёрдого раствора WC в кобальте. Для контртела из стали исходная структура автором определена как ферритно-перлитная, а после термообработки структура стала однородной (какой?) с повышенной микротвёрдостью.

В третьей главе представлены результаты исследования разрушения структуры поверхностных слоёв модифицированных покрытий и металлических контртел. Автор ставил задачу выявления характерных особенностей разрушения материала как покрытия так и контртела в условиях сухого трения скольжения. В процессе установившегося износа поверхности соприкасающихся тел претерпевают изменения в результате пластической деформации, деформационного упрочнения, частичного отрыва частиц материала, которые, попадая в зону контакта, могут вдавливаясь в более мягкую часть поверхности материала и выполнять роль режущего элемента. В процессе приработки поверхностей площадь контакта увеличивается. Стоит не согласиться с автором в том, что окисление поверхностей для такого процесса не характерно (стр.17). В условиях высоких локальных нагрузок на материал в окислительной среде обязательно будут происходить процессы окисления. Окисляться будут не шпинели (это уже двойные окислы), а элементы входящие в состав основы. И как расшифровать фразу стр.67: «это обусловлено составом, который способствует образованию трудноактивируемых при контакте шпинелей». Образуются дополнительно шпинели? На стр.70 автор констатирует, что для контртела Ст6 ТО после 9000 циклов начинается окисление поверхности, но окисление зависит не от количества циклов, а от условий в зоне контакта трущихся поверхностей. По утверждению автора износ в зоне трения в основном связан с микрорезанием твёрдыми частицами, внедрёнными в сталь и последующим их перемещением по поверхности, но не исключаются и процессы окисления. Эти два процесса и обеспечивают интенсивный износ контртела из стали.

В разделе 3.2 приведены данные микрорентгеноспектрального исследования как покрытий, так и контртела из стали. Автором рассмотрены вопросы «перехода» материалов контактных тел при трении (железа в покрытие, а никеля - в контртело). Естественно при трении перенос элементов возможен, но зачем приведены изображения распределения по поверхности кислорода рис.3.4? Кислород в покрытии находится в связанном состоянии - в шпинели и полученное распределение кислорода связано с окислением поверхности? Или происходит перенос частиц шпинели?

В разделе 3.3 описана методика и приведены экспериментальные данные по установлению корреляционных характеристик профиля контактных поверхностей трения, описывающих взаимосвязь частиц покрытия и структурных элементов материала контртела. Приведен анализ профилограмм поверхности трения покрытия и контртел. Согласно полученным автором экспериментальным данным автокорреляционная функция профилей имеет три характерных участка, описывается зависимостью вида  $\exp(-d/r_0)$ , где  $r_0$  – радиус корреляции, который связан с параметром  $d$ , определяемый путём математической обработки профилограмм. Так как в строении поверхностей трения преобладают продольные борозды, то в качестве характеристики поверхности трения автор рекомендует рассматривать радиус корреляции - координату вдоль профиля, при которой автокорреляционная функция обращается в ноль. По физическому смыслу радиус корреляции отражает среднюю полуширину продольных борозд на поверхности трения.

В результате анализа металлографических исследований и профилограмм поверхностей покрытий и контртел обнаружена устойчивая корреляция координат соседних точек поперечного профиля с коэффициентом корреляции 0,7 – 0,8. Это отражает, по мнению автора, наличие характерных продольных борозд на поверхности трения по всему пути трения и в качестве характеристики структуры поверхности трения износостойких покрытий предлагается рассматривать верхнее значение радиуса корреляции, который соответствует средней полуширине борозд на поверхности трения.

Четвёртая глава посвящена исследованию модифицированных порошковых покрытий и металлических контртел, приведены данные по износу покрытий различного состава, предложен механизм различного изнашивания в начальной стадии приработки и в процессе установившегося изнашивания. Установлено, что покрытие с ультрадисперсными добавками кобальтовой шпинели более устойчиво, чем покрытие с  $\text{CuAl}_2\text{O}_4$ . Для контртела из твёрдосплавного материала в начальный период (до 10000 циклов) наблюдается заметный износ, что объясняется автором малой площадью контакта с исследуемыми покрытиями, но всё же износ контртела из такого материала на порядок меньше, чем износ покрытия. Для контртел из Ст6 автором не обнаружены участки приработки – сразу фиксируется установившейся равномерный износ после 5000 циклов. Такое поведение пары трения объяснено тем, что упругопластическое покрытие приводит к быстрому установлению равновесной микрогеометрии поверхностей трения. Из экспериментальных данных, как установлено автором, следует, что термическая обработка материала контртела из стали приводит к большей устойчивости в условиях трения с исследуемыми покрытиями.

В разделе 4.2 приведены данные параметров микрогеометрии поверхностей при фрикционном взаимодействии покрытий от количества циклов. На этапе приработки

отмечается снижение шероховатости поверхностей, а далее фиксируется износ материала, но механизм износа различен для материала покрытия и контртела, что объяснено автором большей хрупкостью твёрдосплавного материала, выкрашиванием частиц, что и приводит к нестабильности характеристик поверхностей трения. Покрытия проявляют более высокие упругие свойства при фрикционном контакте. Регистрируемые колебания шероховатости и среднеквадратического отклонения объясняются автором воздействием частиц износа, которые принимают участие в изменении характеристик профиля поверхности трения. Установлено наличие корреляции характеристик равновесных поверхностей пары трения: контртело - покрытие. Для пары трения покрытие – контртело из стали после термообработки обе поверхности трения имеют сопоставимый характер шероховатости и это, как показал автор, связано со свойствами структуры материала контртела, которая после термообработки становится более однородной и мелкозернистой, что и приводит к большей стабильности при трении.

По четвёртой главе общий вывод сводится к тому, что для всех материалов наблюдается корреляция характеристик микрогеометрии контактных поверхностей и предложено за характеристики контактных поверхностей трения принимать коэффициенты корреляции параметров профиля шероховатости:  $R_a$ ,  $R_g$ ,  $R_z$ . Величина и знак корреляции характеристик контактных поверхностей зависит от материалов контртела и покрытия. Четвёртый вывод, приведённый в заключении работы (стр. 124), также касается коэффициента корреляции контактирующих поверхностей. Что касается положений, выносимых автором на защиту, то первое положение следовало бы конкретизировать: что образуется, какие фазы, при каких условиях. Остальные положения – это экспериментальные результаты для конкретных пар трения. По-видимому, трудно предсказать свойства взятых любых пар трения, основываясь на выводах сделанных в работе, или это возможно? Хотелось бы знать мнение автора.

Содержание автореферата адекватно отражает содержание диссертационной работы. Некоторые рисунки, как я уже отмечал, малоинформативные, встречаются некоторые опечатки, но несмотря на сделанные замечания всё же надо отметить, что обоснованная автором методика анализа микрогеометрии поверхностей материалов трущихся пар несомненно представляет научный и практический интерес, что подтверждено при выборе материала для повышения износостойкости пары трения при выполнении автором проекта №6781 Фонда содействия развития малых форм предприятий в научно – технической сфере и может быть применена при разработке новых высокоэффективных материалов, используемых в ответственных узлах пар трения.

Диссертационная работа Лебедева Дмитрия Иосифовича отвечает всем критериям, предъявляемым к работам, представляемым на соискание учёной степени кандидата технических наук, соответствует требованиям пункта №9 положения о порядке присуждения учёных степеней (постановление Правительства РФ от 24. 09. 2013 №842), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09. – Материаловедение (машиностроение)

Заведующий лабораторией защитных покрытий и морской коррозии  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии  
Дальневосточного отделения Российской академии наук, доктор технических наук,  
профессор, заслуженный деятель науки РФ

П. С. Гордиенко

690022 г. Владивосток, проспект 100-лет Владивостоку, 159, Институт химии ДВО РАН  
ТЕЛ: 8 914 703 77 89 e-mail: [pavel.gordienko@mail.ru](mailto:pavel.gordienko@mail.ru)

Подпись П. С. Гордиенко заверяю  
Учёный секретарь ИХ ДВО РАН  
к.х.н.



Д. В. Маринин