

На правах рукописи



ЛЕБЕДЕВ ДМИТРИЙ ИОСИФОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОНТАКТНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ
СИСТЕМЫ Ni-Cr-B-Si С УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ**

Специальность
05.16.09. – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2014

Работа выполнена в институте физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН) (г. Якутск)

Научный руководитель: **Лебедев Михаил Петрович**, чл.- корр. РАН, доктор технических наук, директор Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (г. Якутск)

Официальные оппоненты: **Гордиенко Павел Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией защитных покрытий и морской коррозии ФГБУН Институт химии ДВО РАН

Тарасов Петр Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры физики твердого тела ФГАОУ ВПО Северо-Восточный федеральный университет им М.К.Аммосова

Ведущая организация: ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения (ИФПМ) СО РАН, г. Томск

Защита состоится «23» сентября 2014 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201 корпус 3. Факс: 8(4217)53-61-50; .e-mail: mdsov@knastu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета и на официальном сайте организации по адресу www.knastu.ru

Автореферат разослан «22» июля 2014 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.И. Пронин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для повышения эксплуатационных характеристик путем упрочнения и восстановления деталей машин и механизмов широкое применение получили высокоэнергетические технологии нанесения порошковых покрытий. В качестве материала порошковых покрытий в основном используются промышленные самофлюсующиеся сплавы никеля или кобальта, а также их смеси с соединениями тугоплавких металлов, нитридов, карбидов, оксидов, ультрадисперсных порошков и др., которые способствуют образованию упрочняющих фаз и улучшают структуру покрытия. Модифицированные порошковые покрытия имеют неоднородную структуру – выделения избыточных дисперсных и коагулированных фаз, слоистое строение и пористость. Это происходит вследствие специфики технологических процессов напыления, заключающейся в неравновесном, быстропротекающем ($10^{-3} - 10^{-5}$ с) нагреве частиц порошка до температуры плавления, и их последующем охлаждении с высокой скоростью. Состав и свойства упрочняющих фаз в структуре покрытий определяют служебные характеристики обработанной поверхности деталей при трении с металлической поверхностью контртела-детали машин и механизмов. Поэтому для оценки износостойкости пары трения необходимо установить влияние структуры и свойств модифицированных порошковых покрытий на фрикционное взаимодействие с материалом контртела. Следует выявить, как особенности свойств и структуры покрытия будут проявляться в процессах изнашивания обеих контактных поверхностей трения.

В настоящее время существуют многочисленные работы по исследованию покрытий и материалов с покрытиями; в отдельных работах рассматриваются свойства собственно покрытий (пористость, адгезия, износостойкость и др.). Общий анализ используемых методов приведен в известных работах Л.И. Тушинского, Ю.С. Борисова, С.С. Бартенева, М. Х. Шоршорова, В. В. Кудинова и др. Следует отметить, что исследований фрикционного взаимодействия материалов с покрытиями значительно меньше, чем работы по изучению свойств собственно покрытий. Но дело в том, что вопрос влияния покрытий на износостойкость обработанной детали в целом значительно сложнее и не может быть полностью решен исследованием структуры и свойств только покрытий. Поэтому актуальность исследования в диссертации определяется необходимостью комплексного, всестороннего изучения пары трения «модифицированное покрытие - металлическое контртелo» с оценкой ее износостойкости на основе исследования формирования микрогеометрии обеих контактных поверхностей трения, отражающей взаимосвязь структуры материалов при трении скольжения.

Также, изучение влияния состава, структуры и свойств износостойких модифицированных покрытий на характеристики профилей способствует правильному выбору материалов контактных поверхностей трения, позволяет научно обосновать способы улучшения физико-механических свойств покрытий, обеспечивает возможность разработать способы подбора металлического контртела для повышения износостойкости пары трения в целом.

Связь работы с научными программами. В основу диссертации положены результаты исследований по следующим научно-исследовательским работам: Программа фундаментальных исследований СО РАН Ш.28. «Система многокритериального связного анализа, обеспечения и повышения прочности, ресурса, живучести, надежности и безопасности машин, машинных и человеко-машинных комплексов в междисциплинарных проблемах машиноведения и машиностроения. Научные основы конструкционного материаловедения», проект «Развитие научных основ технологического и эксплуатационного материаловедения износостойких покрытий и перспективных макрогетерогенных материалов для техники и конструкций Севера», блок 1 (2013-2016 г.г.); Программа фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, проект №13.1 «Статистические подходы к описанию процессов формирования и изнашивания структуры порошковых покрытий и материалов при трении скольжения» (2009-2011 г.г.), проект №2.12.4 «Исследование статистических закономерностей формирования и изнашивания макроструктуры порошковых износостойких покрытий, твердосплавных и алмазосодержащих материалов инструментального назначения» (2012-2014 г.г.); региональный проект РФФИ № 12-08-98500 - p_восток_a «Исследование микрогеометрии поверхности трения модифицированных порошковых покрытий при трении скольжения».

Цель работы:

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 $CoAl_2O_4$ и $CuAl_2O_4$

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обзор и анализ работ по исследованию структуры, физико-механических и трибологических свойств износостойких порошковых покрытий.
2. Исследование состава, структуры и микротвердости контактных поверхностей при трении скольжения модифицированных порошковых покрытий.
3. Испытания на износ модифицированных порошковых покрытий при трении скольжения с металлическим контртелом.
4. Исследование закономерностей формирования и взаимосвязи микрогеометрии контактных поверхностей при трении износостойких модифицированных порошковых покрытий с металлическим контртелом.

Научная новизна работы.

Научную новизну полученных результатов составляют:

1. Установлено влияние ультрадисперсных добавок на структуру и микротвердость покрытий системы Ni-Cr-Si-B: введение небольших ультрадисперсных добавок (0,02 %) приводит к увеличению микротвердости (в 1,1...1,3 раза) и износостойкости (в 1,3-1,4 раза) покрытий, хотя микроструктура практически не изменяется. Далее, увеличение ультрадисперсных добавок (до ~0,5%) способствует повышению дисперсности упрочняющих фаз с равномерным их распределением и росту микротвердости; при содержании 0,2...0,5% микротвердость мо-

дифицированного покрытия повышается в 1,6 раза. Дальнейшее увеличение содержания ультрадисперсных добавок ведет к росту содержания неметаллических включений в покрытии, расположенных по границам частиц, и коалесценции структурных составляющих; это приводит к снижению микротвердости покрытия.

2. Микрорентгеноспектральными исследованиями изучена микрогеометрия контактных поверхностей модифицированных покрытий системы Ni-Cr-Si-V. Выявлено, что переход материала покрытия к контртелу и обратно влияет на формирование микрогеометрии контактных поверхностей трения модифицированного покрытия и металлического контртела. Структуру поверхности трения модифицированных износостойких покрытий предложено характеризовать верхней оценкой радиуса корреляции, который отражает среднюю полуширину характерных продольных борозд, а также зависит от материалов контактных поверхностей и условий трения.

3. Установлены и научно обоснованы новые закономерности фрикционного взаимодействия металлических контактных поверхностей трения скольжения с износостойкими модифицированными порошковыми покрытиями.

Для оценки фрикционного взаимодействия износостойкого покрытия, модифицированного ультрадисперсными шпинелями, с металлическими контртелами использованы соотношения и корреляционные зависимости характеристик микрогеометрии контактных поверхностей: шероховатости R_a , среднеквадратического отклонения R_q и высоты неровностей R_z .

Практическая значимость работы.

Полученные в диссертации результаты позволяют научно обосновать технологию получения покрытий, модифицированных ультрадисперсными добавками, обеспечивают возможность разработать способы подбора металлического контртела для повышения износостойкости пары трения.

Полученные практические результаты использовались при выполнении проекта № 6781 Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Положения выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния ультрадисперсных добавок $CoAl_2O_4$ и $CuAl_2O_4$ на структуру и свойства порошковых износостойких покрытий системы Ni-Cr-V-Si.
2. Результаты аналитических исследований состава, структуры и распределения микротвердости модифицированных порошковых покрытий и металлических контртел.
3. Результаты испытаний на износ модифицированных порошковых покрытий и металлических контртел.
4. Анализ факторов, оказывающих существенное влияние на взаимодействие структур модифицированных порошковых покрытий и металлических контртел.
5. Результаты профилометрических исследований взаимосвязи характеристик контактных поверхностей

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием поверенных приборов и средств измерений, испытательного оборудования. Также применены стандартные методики определения износостойкости и исследования характеристик поверхности трения, апробированных и взаимно дополняющих друг друга современных аналитических методов исследования.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены и обсуждены на III, IV и V Евразийских симпозиумах по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата (г. Якутск, 2006, 2008, 2010 г.г.); на международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов «MESOMECH'2009» (г. Томск); XVIII Международной интернет-конференции для молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения «МИКМУС» (г. Москва, 2006 г.); Всероссийской научной конференции «Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования» (г. Хабаровск, 2008 г.); Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Создание новых материалов для эксплуатации в экстремальных условиях» (г. Якутск, 2009 г.); XI Международной практической конференции «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня» (г. Санкт-Петербург, 2009 г.); VII Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург, 2009 г.); Международной научно-технической конференции «Современное материаловедение и нанотехнологии» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2010 г.); VI Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов DFMN» (г. Москва, 2011 г.); Всероссийской конференции научной молодежи «ЭРЭЛ» (г. Якутск, 2011 г.); XIV и XVI Международной научно-технической конференции «Проблема ресурса и безопасной эксплуатации материалов» (г. Санкт-Петербург, 2009, 2011 г.г.); IX Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (г. Москва, 2012 г.); XIV и XV Международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» (г. Санкт-Петербург, 2012, 2013 г.г.); на семинарах отдела материаловедения и технологическом семинаре ИФТПС СО РАН.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации отражены в 30 публикациях: в 9 статьях в научных журналах и сборниках материалов конференций, в том числе 8 журналах из списка ВАК, 21 тезисах докладов на научно-технических конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка использованных источников из 85 наименований. Полный объем диссертации составляет 142 страниц, включая рисунков 41, таблиц 8, приложений 3.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору и анализу литературных источников по высокоэнергетическим технологиям нанесения порошковых покрытий; проана-

лизированы методы исследования состава, структуры и свойств износостойких газотермических покрытий.

Как отмечено выше, исследований взаимодействия материалов с покрытиями значительно меньше, чем работы по изучению свойств самих покрытий. В настоящее время существуют многочисленные исследования, посвященные научным основам высокоэнергетических технологий нанесения покрытий (Харламов Ю.А., Жуков М.Ф., Кудинов В.В., Борисов Ю.С., Костиков В.И., Солоненко О.П., Алымов М.И., Хасуи А., Fauchais P. и др.), изучению структуры и свойств газотермических покрытий (Пекшев П.Ю., Калита В.И., Лебедев М.П., Комлев Д.И., Сафиуллин В.А., Mostaghimi J., Chandra S. и др.), исследованию трибологических свойств износостойких порошковых покрытий (Тушинский Л.И., Буйкус К.В., Похмурский В.И., Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И. и др.). В них исследована зависимость состава, структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств формируемых газотермических покрытий от технологических параметров нанесения (ток дуги, дистанция напыления, гранулометрический и химический состав порошкового материала, расходы плазмообразующего и транспортирующего газов и т.д.).

Анализ многочисленных исследований также показывает, что актуальными остаются работы по созданию и применению новых составов механических порошковых смесей на основе самофлюсующихся сплавов с добавками тугоплавких металлов, оксидов, боридов, нитридов, шпинелей. Также актуальны работы по разработке и применению покрытий с ультрадисперсными модифицирующими добавками, при этом повышение износостойкости покрытий позволяет упрочненным поверхностям работать в условиях высоких контактных и ударных нагрузок.

Актуальность исследования в диссертации определяется необходимостью изучения фрикционного взаимодействия в паре трения «модифицированное покрытие - металлическое контртело» с исследованием формирования микрогеометрии обеих контактных поверхностей трения, учетом структуры и свойств обоих материалов пары трения для оценки ее износостойкости.

Вышеприведенный анализ современного состояния проблемы явился обоснованием для постановки цели и задач диссертационной работы.

Во второй главе приведены характеристики исследуемых материалов, технологические операции их подготовки, режимы нанесения модифицированных покрытий, представлены использованные аналитические методы и результаты исследования структуры и распределения микротвердости материалов контактных поверхностей.

В диссертационной работе исследовались износостойкие газотермические покрытия с модифицирующими добавками ультрадисперсных шпинелей CoAl_2O_4 , CuAl_2O_4 , получаемых в процессе плазмохимического синтеза (производства Латвийской компании АО НЕОМАТ, размер порошка в среднем ~ 100 нм).

Выбор добавок ультрадисперсных шпинелей CoAl_2O_4 , CuAl_2O_4 , был основан:

1. Соответствует требованиям, предъявляемым к модификаторам I рода;
2. Соединения шпинелей трудно-активируемые на контакте при трении скольжении. В случае образования упрочняющей фазы в покрытии (с учетом соотношения скоростей процессов расплавления и охлаждения) повышению износостойкости способствует как модифицирование структуры, так и появление новой упрочняющей фазы.

Покрытия нанесены на образцы цилиндрической формы для испытаний на изнашивание диаметром 50 мм, шириной 10 мм, толщина покрытий - до 1,5мм; напыление и оплавление проводилось газовой горелкой «Mogul-9».

Металлографические исследования структуры материалов проведены на микроскопе «Neophot-32»; микротвердость измерена на твердомере «ПМТ-3М».

Испытание на износ покрытий с модифицирующими добавками ультрадисперсных шпинелей проведены на машине трения СМЦ-2. По результатам обзора анализа работ и методик трибологических испытаний выбрана схема трения «диск-колодка». Были изготовлены контртела в виде колодок из твердого сплава ВК6 и стали марки Ст6; известно, что данные материалы существенно отличаются по твердости. Также структура материала контртела из Ст6 подвержена изменению при термообработке. Поэтому данный методический подход обеспечивает отдельно исследовать влияние твердости и структуры материала контртела на процессы изнашивания контактных поверхностей трения.

Важнейшими количественными характеристиками микрорельефа поверхности трения, показывающие динамику изнашивания в зависимости от параметров – температуры, скорости скольжения, нагрузки и т.д., являются шероховатость Ra, среднеквадратическое отклонение Rq и наибольшая высота профиля Rz. Поверхности трения изучались профилометром SJ-201P (Япония) и с помощью оптических микроскопов «Stemi 2000C», «Axio Observer» через каждые 4500 циклов трения. Измерялся поперечный профиль покрытий и контртел; для покрытий - на четырех маркированных диаметрально противоположных участках с усреднением по всей поверхности трения.

Для изучения контактных поверхностей, оценки перехода материала покрытия к контртелу и обратно при трении скольжения проведен микрорентгеноспектральный анализ материалов на установке Jeol.

Для проведения металлографического анализа был подготовлены поперечные шлифы покрытия, твердосплавного материала ВК6 и стали Ст6 контртел шлифованием на грубых наждачных бумагах и полированием с помощью алмазной пасты (рис. 1). В диссертационной работе на основе анализа предыдущих исследований ИФТПС СО РАН оценены и обобщены структура и свойства покрытий с ультрадисперсными добавками шпинелей (рис. 1,а). Металлографическим анализом выявлена мелкозернистая микроструктура вольфрамокобальтовых твердых сплавов (рис. 1,б).

Как видно из рисунка.1в, исходная микроструктура контртела из Ст6 представляет ферритно-перлитную структуру, в основном наблюдается выделение зеренного перлита. В диссертации проведено исследование влияния микроструктуры стального контртела на процессы изнашивания поверхности тре-

ния модифицированных покрытий. С этой целью для обеспечения необходимой однородности микроструктуры стального контртела была проведена термообработка (далее ТО). Для выбора режимов термообработки температура заковки определялся исходя из массовой доли углерода и соответствующего ей значения критической точки; была определена температура заковки 820÷840 °С. С целью не допущения снижения твердости (рисунок 2) и прочности закаленной стали был проведен низкий отпуск.

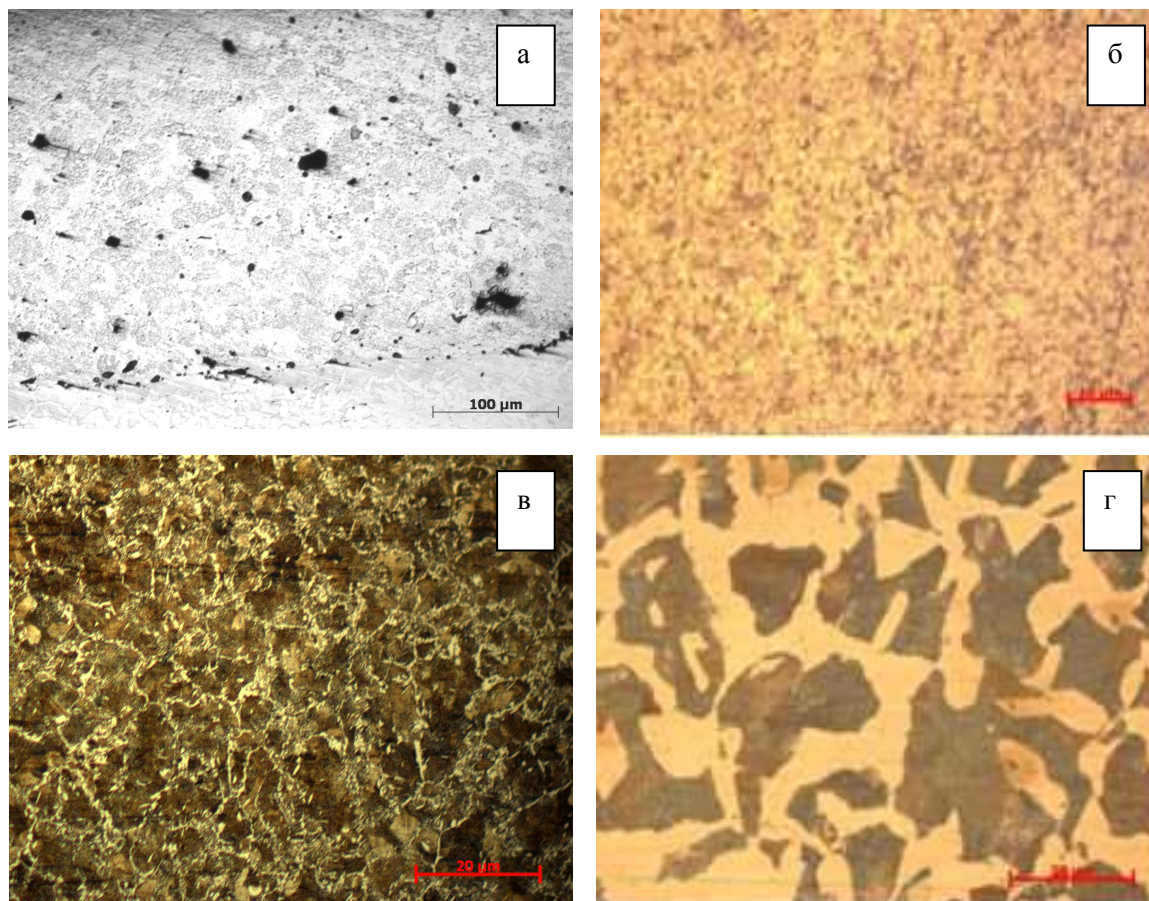


Рисунок 1 – Микроструктура материалов модифицированного покрытия и контртел: а) покрытие с ультрадисперсными добавками CoAl_2O_4 (0,02%); б) ВК6; в) Ст6; г) Ст6 после термообработки

Таким образом, были выбраны следующие режимы термообработки с учетом размера образцов:

- нагрев образца до 830°C с выдержкой в течении 14 мин.;
- заковка в машинном масле;
- низкий отпуск при 250°C в течении 1-1,5 ч.

Также для сравнения были проведены средний отпуск образцов стальных контртел при 420°C и высокотемпературный отпуск при 560°C. Как видно из рис.1,г, проведенная термообработка обеспечивает более однородную ферритно-перлитную микроструктуру материала контртела.

Известно, что износостойкость материала существенно зависит от его твердости, поэтому, учитывая результаты металлографического анализа, были проведены измерения микротвердости материалов контртел (рис.2).

Гистограмма частот для твердосплавного материала ВК6 показывает, что его микротвердость практически достигает микротвердости покрытия (рисунок 2а,г). Как видно из рисунка 2 б,в, микротвердость стального материала контртела после термообработки повысилась примерно на ~1000 МПа.

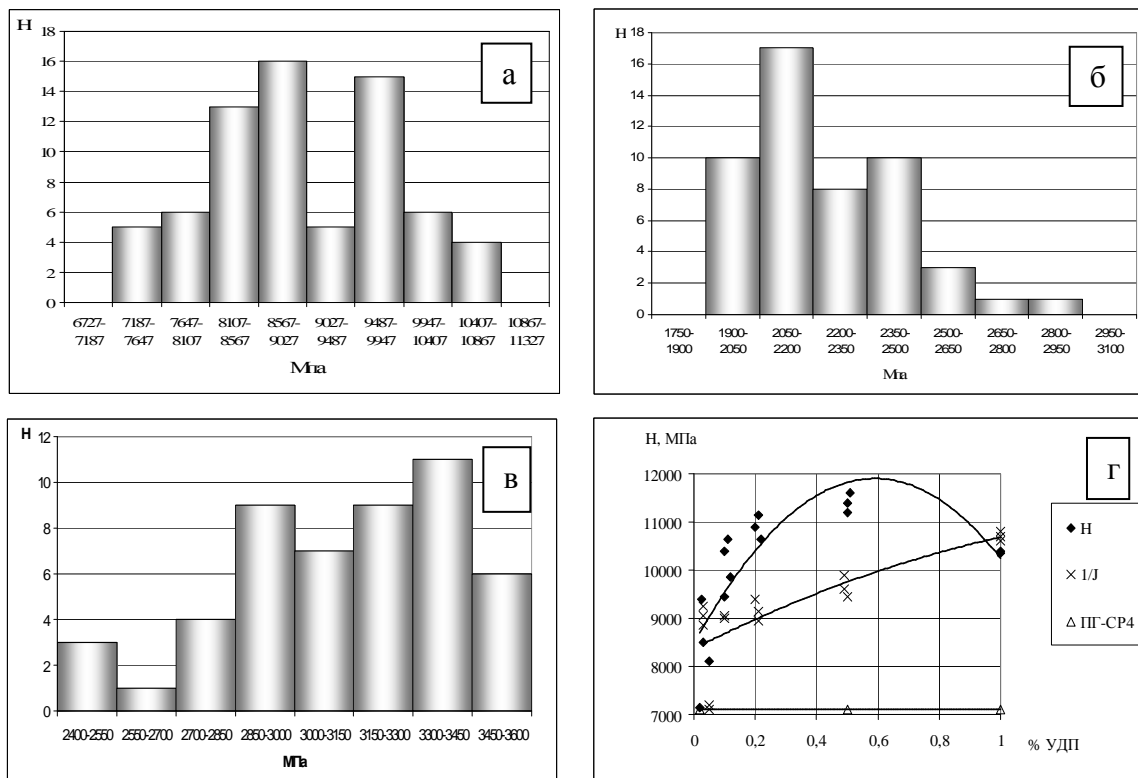


Рисунок 2 – Распределение микротвердости материалов контртел: а) ВК 6; б) Ст6; в) Ст6 ТО; г) покрытие с ультрадисперсными добавками CoAl_2O_4

В третьей главе приведены результаты микрорентгеноспектральных исследований перехода материалов контактных поверхностей при трении модифицированных покрытий с контртелами и характеристики их фрикционного взаимодействия.

На рисунке 3 приведены изображения поверхности трения (а) модифицированного покрытия с ультрадисперсными добавками CuAl_2O_4 при трении с контртелом из Ст6 после термообработки и элементные карты железа, никеля и кислорода.

Как видно из рисунков, наблюдается переход материала Ст6 контртела к покрытию и наоборот, в областях, которые определяются микрогеометрией контактной поверхности трения.

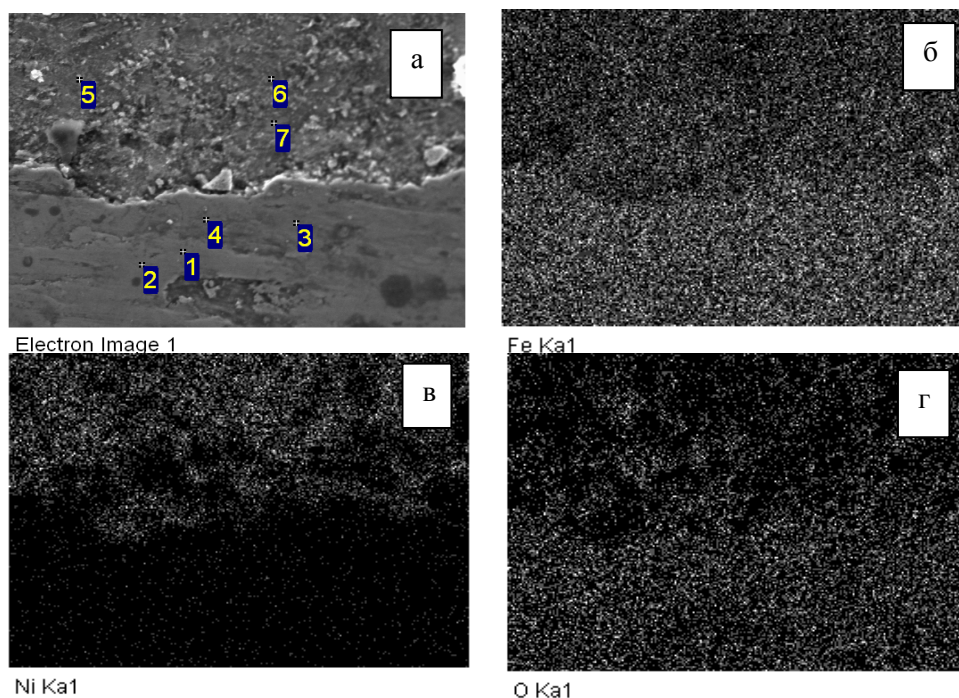


Рисунок 3 – Поверхность трения (а) модифицированного покрытия с CuAl_2O_4 и элементные карты: б) железо; в) никель; г) кислород.

Поверхность трения износостойкого покрытия с CuAl_2O_4 , также имеет менее выраженный рельеф с относительно ровными дорожками трения (как на рисунке 4) и более тонкими бороздками. Элементы пластического отеснения на поверхностях не очень развиты. В образовании микроучастков со следами глубинного расслоения и вырывания участвуют силы адгезионного взаимодействия. Наблюдается переход материала прилипанием стального контртела в областях выкрашивания покрытия (рисунок 4б).

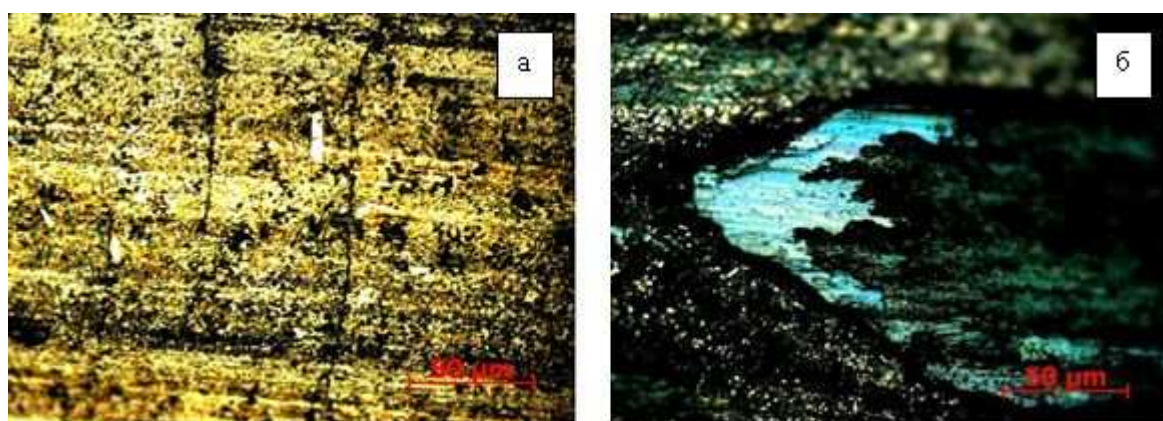


Рисунок 4 – Поверхность трения износостойкого покрытия:
а) область контакта; б) пустоты; модификатор CoAl_2O_4 ;
путь трения 54000 циклов; увеличение 20х

Структура материала влияет на формирование микрогеометрии поверхности трения при изнашивании. В диссертации профилометрическими измерениями была изучена микрогеометрия поверхностей трения. На рисунке 4 и 5

приведены основные характеристики микрогеометрии контактных поверхностей трения.

Как видно из рисунка 5а в графиках шероховатость поверхности трения вольфрамокобальтового сплава ВК6 сначала и по всему пути трения является значительно развитым, имеет множество выступов, впадин, неровностей; начальная шероховатость профиля практически сохраняется, постоянно восстанавливаясь по пути трения. Это объясняется тем, что вольфрамокобальтовый сплав из-за большей хрупкости способен к разрушению поверхности выкрашиванием при трении скольжения, так происходит формирование новой структуры поверхности трения. Далее, по пути изнашивания неровности снова сглаживаются, разрушаясь под воздействием контактного трения с покрытием. Фрикционный износ вольфрамокобальтового сплава состоит из таких чередований механизмов постепенного усталостного разрушения поверхностного слоя. Таким образом, структура твердосплавного материала проявляется на микрогеометрии поверхности трения. Как видно из графиков на рисунке 5б, интервал средних отклонений к концу испытаний (36000 циклов) незначительно расширяется; прослеживается симметричность интервала относительно средней линии профиля, за исключением отдельных значений разброса.

Как установлено профилометрическими исследованиями, распределение высот равновесного профиля поверхности трения твердосплавного материала в основном является одномодальным и характеризуется симметрией (рисунок 5в); такая же закономерность сохраняется по всему пути трения (рисунок 5г).

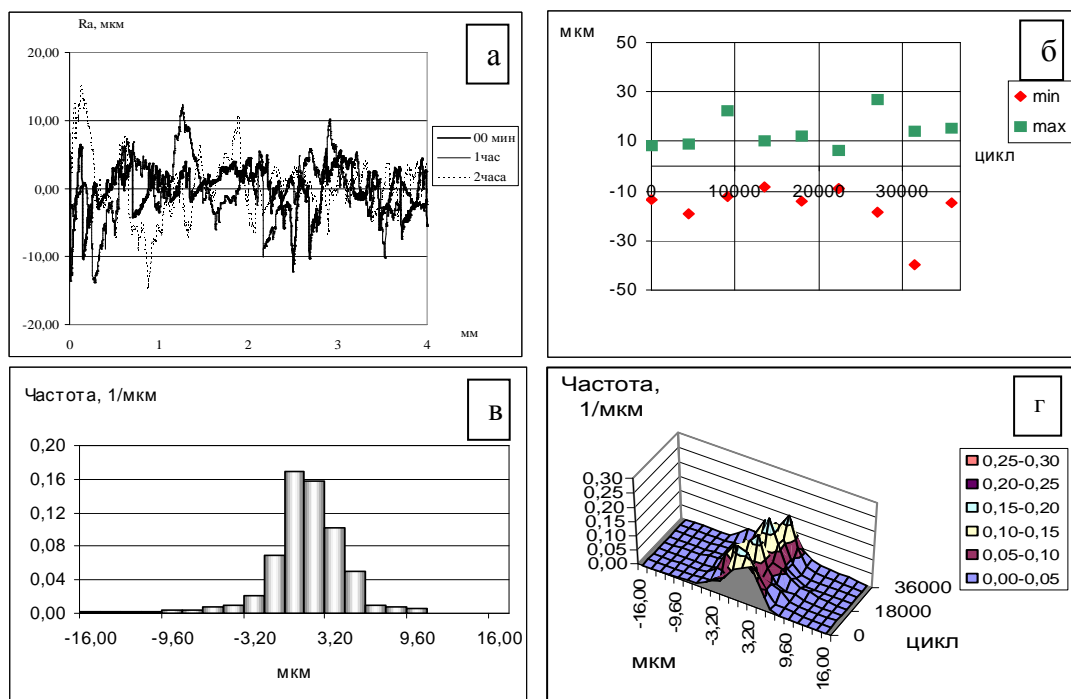


Рисунок 5 – Отклонения профиля поверхности трения контртела из ВК6: а) изменение профиля; б) максимальные отклонения; в) гистограмма отклонений, путь трения 4500 циклов; г) гистограммы отклонений по пути трения.

Обнаруженные экспериментальные профилометрические зависимости отклонений микрогеометрии поверхности твердосплавного материала согласу-

ются с известной гипотезой о нормальности высот равновесного профиля (рисунок 5).

В диссертации на основе изучения автокорреляционных функций поперечного профиля (рисунок б) был проведен анализ характерного строения поверхностей трения. Анализ поперечных профилограмм поверхности трения покрытий и контртел показывает, что их значение при фиксированном значении $x = x_0$ существенно не отличается от значений координат профиля в достаточно малой окрестности точки x_0 . Поэтому следует ожидать существование корреляции между координатами профиля соседних точек контактных поверхностей трения. Действительно, существование устойчивой корреляции с коэффициентом корреляции $>0,8-0,7$ между координатами профиля соседних точек поверхности покрытия подтверждается экспериментальной усредненной автокорреляционной функцией (рисунок ба), она показывает тесноту взаимосвязи сечений профиля.

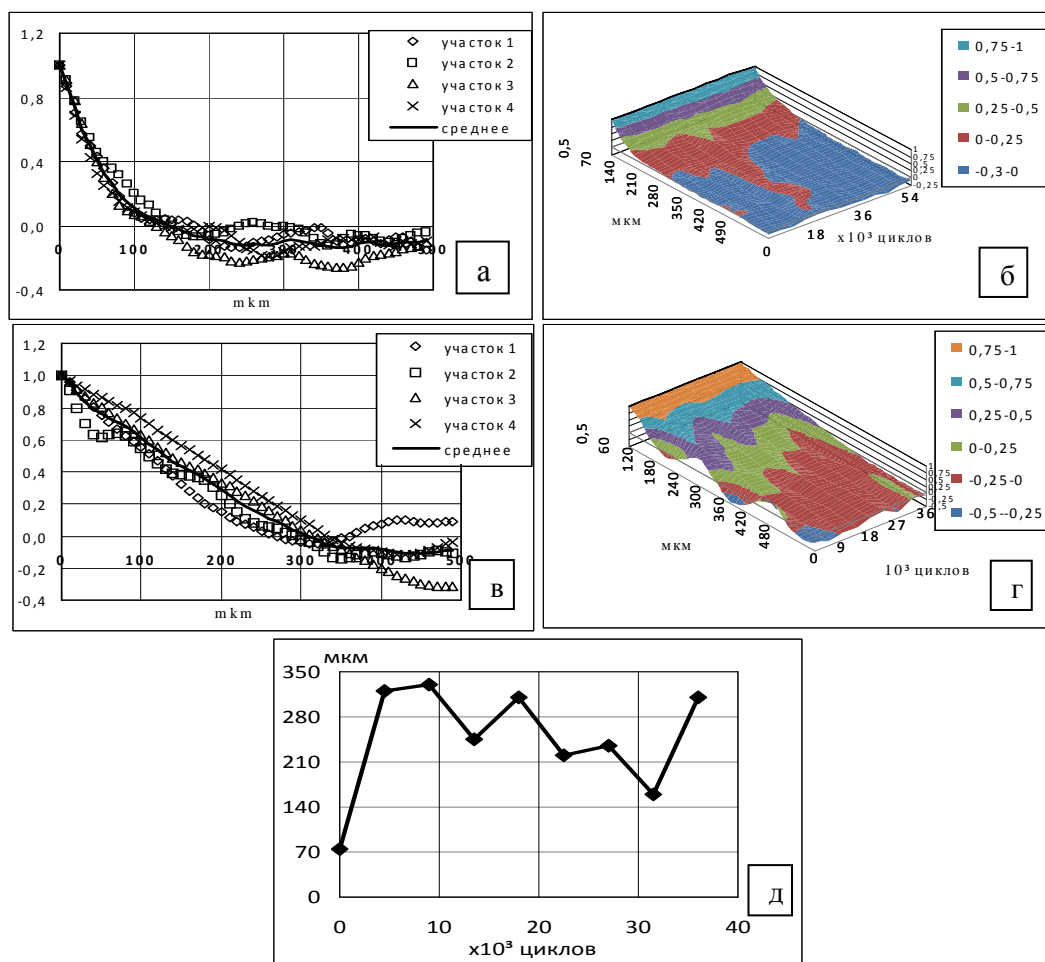


Рисунок 6 – Автокорреляционные функции профиля поверхности трения износостойких модифицированных порошковых покрытий.

- а) участки покрытия с CuAl_2O_4 , контртело Ст6; путь трения 4500 циклов
- б) покрытие с CuAl_2O_4 , контртело Ст6;
- в) участки покрытия с CuAl_2O_4 , контртело ВК6; путь трения 4500. циклов;
- г) покрытие с CuAl_2O_4 , контртело ВК6;
- д) радиус корреляции; покрытие с CuAl_2O_4 , контртело ВК6.

Как видно из графиков, автокорреляционные функции участков в области значительной корреляции несущественно отличаются, характеризуются монотонным убыванием. Исследованиями выявлено, что автокорреляционная функция профиля покрытия с ультрадисперсными добавками шпинелей качественно не изменяется по пути трения, монотонно убывает с увеличением расстояния, практически исчезает при больших расстояниях; наблюдаются незначительные характерные колебания функции по расстоянию и по пути трения (рисунок 6б).

Установлено, что на автокорреляционную функцию поперечного профиля покрытия существенное влияние оказывает материал контртела. На рисунке 6в приведены автокорреляционные функции участков покрытия с ультрадисперсными добавками шпинели CuAl_2O_4 при трении с контртелом из твердосплавного материала ВК6; также наблюдается устойчивая корреляция между координатами профиля соседних точек поверхности покрытия с коэффициентом корреляции $>0,8-0,7$. Разброс данных корреляционной функции также обусловлен влиянием свойств твердосплавного материала контртела на механизм изнашивания. Выявлено, что высокая износостойкость твердосплавного материала приводит к бороздам большей ширины (рисунок 5а) даже при меньшей нагрузке.

Особенно четко на графике рисунка 6г наблюдается сглаживание начальной шероховатости, обусловленной наличием практически регулярно расположенных борозд на исходной поверхности покрытия. Как установлено исследованиями, влияние начальной шероховатости исчезает к концу стадии приработки с началом установившегося износа.

При трении скольжения в качестве характеристики случайной структуры поверхности модифицированных износостойких покрытий предлагается рассматривать верхнюю оценку радиуса корреляции, который отражает среднюю статистическую полуширину характерных продольных борозд. На рисунке 6д приведен график оценки радиуса корреляции профиля поверхности трения покрытия с ультрадисперсными добавками CuAl_2O_4 при трении с контртелом из твердосплавного материала ВК6.

Как видно из графика, оценка радиуса корреляции в отличие от известного среднего шага неровностей S отражает механизмы изнашивания случайной структуры контактной поверхности трения (рисунок 6д).

Далее, необходимым является исследование фрикционного взаимодействия поверхностей трения, на микрогеометрию которых влияют структура и свойства материала контактной поверхности (рисунок 5).

В четвертой главе приведены результаты испытаний на трение скольжение и исследований взаимосвязи микрорельефа поверхностей модифицированных порошковых покрытий и металлических контртел.

Для установления закономерностей фрикционного взаимодействия при идентичных условиях профилометрическим методом были исследованы поверхности модифицированного покрытия при трении с одинаковыми по размерам колодками - контртелами из трех материалов: из твердого сплава класса ВК, стали Ст6 и из термообработанной стали Ст6. Данные материалы существенно отличаются по твердости (рисунок 2), поэтому для них наиболее четко

проявляется различие в закономерностях фрикционного изнашивания материала контактных поверхностей трения.

Как установлено испытаниями на износ, для материалов покрытий и контртел характерны незначительные участки приработки (до $\approx 10\ 000$ циклов), далее наблюдается процесс установившегося износа (рисунок 8). Покрытие с ультрадисперсными добавками CoAl_2O_4 характеризуется более высокой износостойкостью, чем состав, содержащий CuAl_2O_4 (рисунок 7а). Как установлено испытаниями на износ, в кривых массового износа твердосплавного контртела наблюдается небольшое снижение массового износа (рисунок 7б). Это приводит к скачкообразному поведению графика в периоде от 15000 до 25000 циклов трения, что объясняется попаданием пластичных частиц износа покрытия на углубления поверхности твердосплавного материала с последующим закреплением в лунках и бороздах рельефа поверхности трения. Это влияет на профиль поверхности материала.

Графики массового износа покрытий и контртел из Ст6 и Ст6 ТО показывают, что контртело из Ст6 ТО является более износостойким, износ покрытия повышается. (рисунок 7в,г). В кривых массового износа стального контртела и покрытия также практически не наблюдается существенного участка приработки, сразу начинается установившийся износ. Наблюдается существенная разница массовых износов покрытия и контртела, обусловленная различной твердостью материалов контактных поверхностей, износ покрытий и контртел отличаются практически на порядок (рисунок 7).

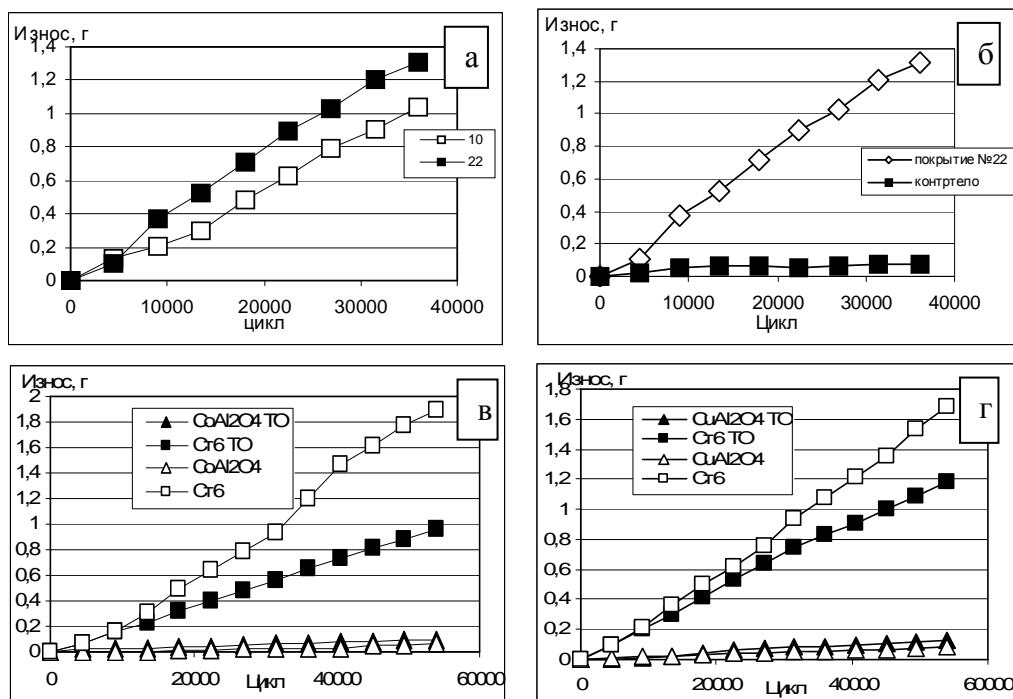


Рисунок 7 – Кривые массового износа: а) покрытия с ультрадисперсными добавками 10 - CoAl_2O_4 ; 22 - CuAl_2O_4 - ВК6; б) покрытие с CuAl_2O_4 - ВК6; в) покрытие с CoAl_2O_4 - Ст6 и Ст6 ТО; г) покрытие с CuAl_2O_4 - Ст6 и Ст6 ТО.

На рисунке 8 приведены зависимости средних шероховатостей R_a контактных поверхностей при трении покрытия с ультрадисперсными добавками $CoAl_2O_4$ в зависимости от количества циклов машины трения. В отличие от графиков массового износа на рисунке 7 с монотонными зависимостями, шероховатость контактных поверхностей изменяется сложным колеблющимся образом. Как видно из графика, к концу ≈ 5000 циклов трения практически исчезает влияние начальной шероховатости контактных поверхностей трения вследствие ее приработки (рисунок 7).

Далее, микрогеометрия контактных поверхностей практически определяется механизмом изнашивания материалов; это приводит к существенной разнице в поведении шероховатости поверхностей трения покрытия и контртела. Тогда как шероховатость поверхности трения покрытия имеют меньшие колебания, шероховатость контртел характеризуется большим разбросом, обусловленным периодическими колебаниями. Это обусловлено тем, что хрупкость твердосплавного материала влияет на формирование микрогеометрии поверхности трения (рисунок 8а), а материал Ст6 интенсивно изнашивается из-за низкой износостойкости (рисунок 8в,г); эти процессы приводят к смене рельефа контртела и последующему его сглаживанию, следовательно, к большей нестабильности шероховатости поверхности. Износостойкие покрытия при трении скольжения более стабильно сохраняют микрогеометрию поверхности трения (рисунок 8). Из рисунка 8в видно, что термообработка контртела из Ст6 приводит к значительной стабилизации шероховатостей обеих поверхностей трения.

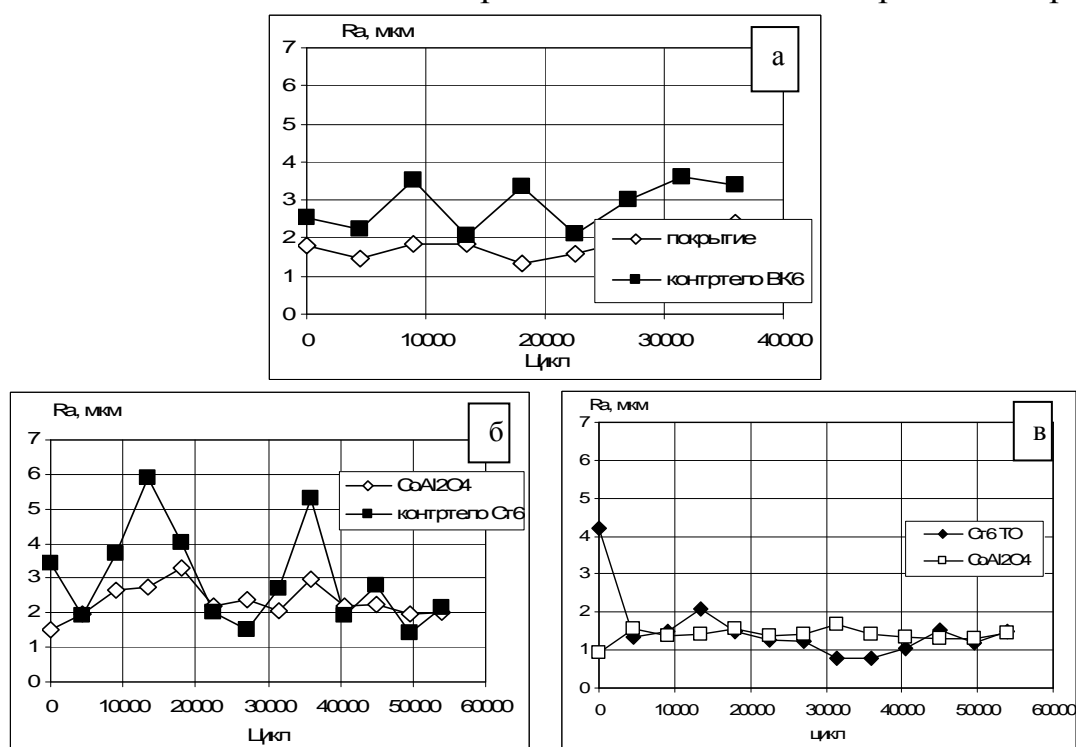


Рисунок 8 – Шероховатости контактных поверхностей покрытия с ультрадисперсными добавками $CoAl_2O_4$ и контртел: а) ВК6; б) Ст6; в) Ст6 ТО.

Как видно из графиков на рисунке 8а, при трении модифицированного покрытия с твердосплавным контртелом шероховатости контактных поверхно-

стей отличаются по уровню, что приводит к меньшему взаимовлиянию структуры материалов при трении. И наоборот, при трении модифицированного покрытия со стальным контртелом шероховатости контактных поверхностей регулярно становятся сопоставимыми (рисунок 8б,в), что приводит к большему взаимовлиянию структуры материалов при изнашивании.

В случае пар трения модифицированное покрытие с УДП добавками и контртело из стали Ст6 после термообработки закалкой оба поверхности имеют более сглаженный вид, уровни шероховатостей поверхности сопоставимы (рисунок 8в.).

Для отражения взаимосвязи характеристик контактных поверхностей пары трения «покрытие - контртело» целесообразным является построение соответствующих данных по пути трения в координатах шероховатостей - покрытия Ra_n и контртела Ra_k (рисунок 9) и радиусов корреляции – покрытия r_n и контртела r_k (рис.10).

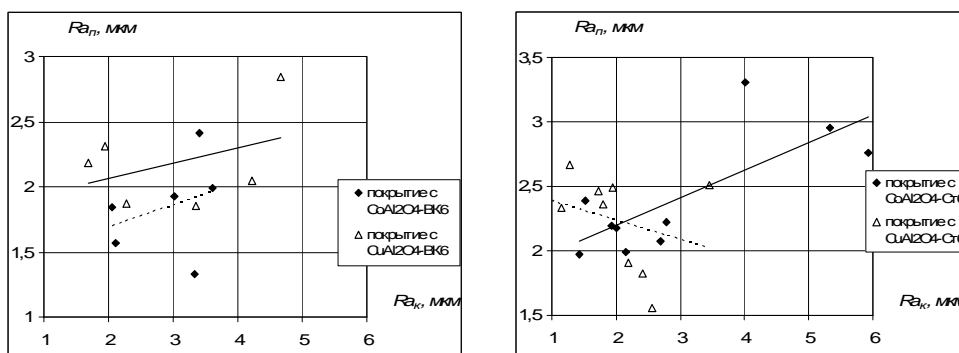


Рис.9. Взаимосвязь шероховатости контактных поверхностей трения; покрытия с ультрадисперсными добавками $CoAl_2O_4$ и $CuAl_2O_4$; контртело: а) ВК6; б) Ст6.

На рисунке 9 сплошной и пунктирной линиями проведены прямые линейной регрессии для шероховатости покрытий с ультрадисперсными добавками $CoAl_2O_4$ и $CuAl_2O_4$, соответственно. Как видно из графиков, величина и знак корреляции шероховатостей контактных поверхностей зависит от материала контртела и покрытия. Установленные коэффициенты корреляции шероховатости контактных поверхностей трения приведены в таблице 1. В качестве характеристик контактных поверхностей трения можно выбрать также величины среднеквадратического отклонения Rq и размаха отклонений Rz профиля поверхностей, которые изменяются по аналогичной закономерности. Как видно из таблицы 1 и рисунка 9, для всех пар трения наблюдается корреляция характеристик микрогеометрии контактных поверхностей. Влияние модифицирующих добавок покрытия на коэффициент корреляции является несущественным для контртела из ВК6, трение покрытий со шпинелью $CuAl_2O_4$ приводит к практическому сохранению корреляции характеристик контактных поверхностей. При трении покрытий с модификаторами $CuAl_2O_4$ с контртелом из Ст6 наблюдается смена знака коэффициента корреляции характеристик контактных поверхностей трения. Как видно из таблицы 1 и рисунка 9, материал контртела влияет на коэффициент корреляции неоднозначным образом; если для покрытия с модификаторами $CoAl_2O_4$ трение с контртелом из Ст6 повышает коэффициент кор-

реляции, то для покрытия с модификаторами CuAl_2O_4 использование контртела из Ст6 приводит к снижению со сменой знака коэффициента корреляции.

При трении со стальным контртелом, в отличие от четко выраженной взаимосвязи шероховатостей контактных поверхностей (рисунок 9б), взаимосвязь радиусов корреляции является слабой, корреляция является несущественной (рисунок 10а,б).

Таблица 1 – Коэффициент корреляции характеристик контактных поверхностей трения

Модификатор покрытия	Материал контртела	Ra	Rq	Rz
CoAl_2O_4	ВК6	0,39	0,58	0,38
CuAl_2O_4	ВК6	0,51	0,51	0,43
CoAl_2O_4	Ст6	0,79	0,77	0,82
CuAl_2O_4	Ст6	-0,71	-0,58	-0,67
CoAl_2O_4	Ст6 ТО	-0,29	-0,51	-0,42
CuAl_2O_4	Ст6 ТО	0,12	0,33	0,24

Таким образом, фрикционное взаимодействие модифицированных покрытий с металлическими контртелами можно обобщить схемой (рисунок 11):

- структура материалов проявляется на микрогеометрии контактных поверхностей (рисунки 6, 8, 11);
- независимо от соотношения микротвердостей наблюдается корреляция характеристик микрогеометрии контактных поверхностей, наблюдается фрикционное взаимодействие структур материалов (рисунки 9, 11, таблица 1);
- однородная структура стального контртела после термообработки приводит к снижению характеристик микрогеометрии и корреляции характеристик микрогеометрии контактных поверхностей (рисунки 7, 10, таблица 1).

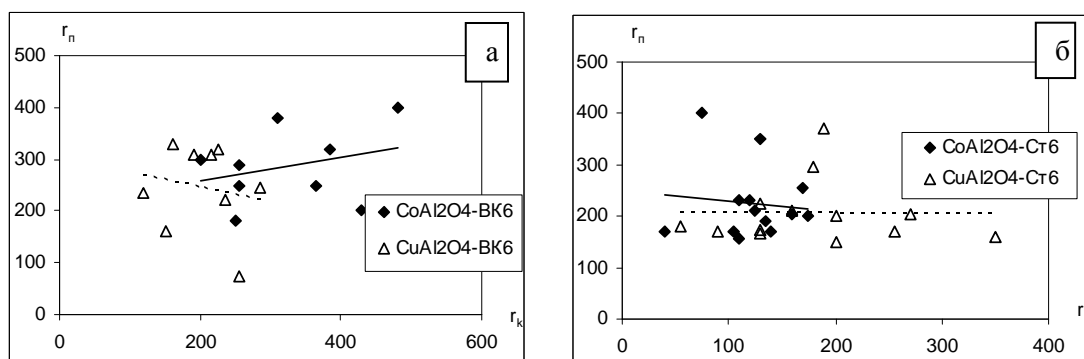


Рисунок 10 – Взаимосвязь радиусов корреляции контактных поверхностей трения покрытий с ультрадисперсными добавками CoAl_2O_4 , CuAl_2O_4 и контртел: а) ВК6; б) Ст6.

Схема пар трения

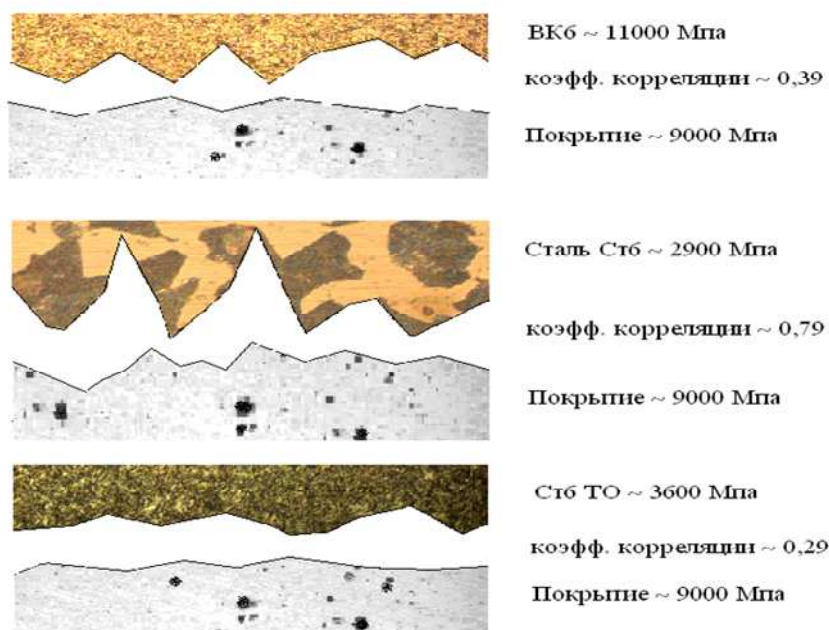


Рисунок 11 – Схема фрикционного взаимодействия в паре трения «модифицированное покрытие- металлическое контртело».

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что введение ультрадисперсных добавок влияет на структуру и микротвердость покрытий системы Ni-Cr-Si-B. При введении 0,02% добавок структура практически не меняется, микротвердость повышается до 8000-9000МПа. Увеличение содержания ультрадисперсных добавок с 0,05% до 0,2% приводит к повышению дисперсности упрочняющих фаз, равномерности их распределения. При этом микротвердость модифицированного покрытия повышается, при содержании 0,2% превышает микротвердость покрытия из чистого порошка системы Ni-Cr-Si-B в 1,3-1,4 раза. Дальнейшее увеличение содержания ультрадисперсных добавок ведет к росту содержания неметаллических включений в покрытии, расположенных по границам частиц; это приводит к снижению микротвердости покрытия.

2. Микрорентгеноспектральными исследованиями изучена микрогеометрия контактных поверхностей модифицированных покрытий системы Ni-Cr-Si-B. Установлен переход материала покрытия к контртелу и обратно, что влияет на формирование микрогеометрии контактных поверхностей трения модифицированного покрытия и металлического контртела.

3. Исследованы автокорреляционные функции поперечного профиля износостойких покрытий с модифицирующими добавками ультрадисперсных шпинелей $CoAl_2O_4$, $CuAl_2O_4$ при трении скольжения с металлическими материалами – сталью Ст6 и вольфрамокобальтовым сплавом ВК6. Для всех износостойких покрытий обнаружено существование устойчивой корреляции координат соседних точек поперечного профиля с коэффициентом корреляции $>0,8-0,7$, что от-

ражает наличие характерных продольных борозд на поверхности трения по всему пути трения.

В качестве характеристики структуры поверхности трения износостойких покрытий предлагается рассматривать верхнюю оценку радиуса корреляции, который отражает среднюю полуширину характерных продольных борозд на поверхности трения.

4. Аналитическими исследованиями, испытаниями на износ и профилометрическими измерениями установлено, что структура материалов проявляется на микрогеометрии контактных поверхностей; для всех материалов наблюдается корреляция характеристик микрогеометрии контактных поверхностей.

При трении модифицированного покрытия с твердосплавным контртелом шероховатости контактных поверхностей отличаются по уровню, что приводит к снижению взаимовлияния структуры материалов при трении. При трении модифицированного покрытия со стальным контртелом шероховатости контактных поверхностей регулярно сопоставимы, что приводит к большему взаимовлиянию структуры материалов при изнашивании.

Предложено, что за характеристики взаимосвязи контактных поверхностей трения, зависящие от структуры материалов, следует рассматривать коэффициенты корреляции параметров Ra, Rq, Rz профиля.

Термообработка контртела из Стб приводит к уменьшению и стабилизации шероховатостей, что значительно снижает корреляцию характеристик микрогеометрии контактных поверхностей трения.

Основные публикации по теме диссертации Статьи в рецензируемых журналах ВАК

1. Лебедев, М.П. Исследование износостойких электрометаллизационных покрытий из порошковых проволок с минеральными модифицирующими добавками / Лебедев М.П., Винокуров Г.Г., Кычкин А.К., Стручков Н.Ф., Лебедев Д.И. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – №1(2), Том 11. – С. 223-226.
2. Винокуров, Г. Г. Износостойкость и характеристики поверхности трения газотермических покрытий с ультрадисперсными добавками / Винокуров Г. Г., Лебедев М. П., Васильева М. И., Стручков Н. Ф., Федоров М. В., Лебедев Д. И. // Трение и износ. – 2009. – №6, Том 30. – С. 596-600.
3. Vinokurov, G. G. Wear Resistance and Friction-Surface Characteristics of Gas-Thermal Coatings with Ultra-Disperse Additives / Vinokurov G. G., Lebedev M. P., Vasil'eva M. I., Struchkov N. F., Fedorov M. V., Lebedev D. I. // Friction and wear. – 2009. – Vol. 30, No. 6. – P. 420-424.
4. Винокуров, Г.Г. Корреляция шероховатостей контактных поверхностей трения модифицированного газотермического покрытия и металлического контртела / Винокуров Г.Г., Лебедев Д.И., Лебедев М.П. // Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук. – 2011. – Том 13 №1(3). – С. 549-552.

5. Лебедев, Д.И. Взаимосвязь характеристик поверхностей упрочняющего покрытия для деталей машин и металлического контртела / Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г. // Труды ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 107. № 2. – С. 73-76.
6. Стручков, Н.Ф. Исследование характеристик контактных поверхностей трения газотермических покрытий с ультрадисперсными модифицирующими добавками и металлического контртела / Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г., Лебедев Д.И., Лебедев М.П. // Фундаментальные исследования. – 2012. – №3 (2). – С. 419-422.
7. Винокуров, Г.Г. Исследование корреляционных характеристик профиля при трении скольжения порошкового покрытия с ультрадисперсными добавками / Винокуров Г.Г., Лебедев Д.И., Лебедев М.П. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т.14, №1(2). – С. 597-600.
8. Винокуров, Г.Г. Исследование поверхности трения порошкового покрытия с ультрадисперсными модифицирующими добавками / Винокуров Г.Г., Лебедев Д.И., Лебедев М.П. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т.15, №4(2). – С. 435-442.

Другие публикации

1. Винокуров, Г.Г. Исследование газотермических покрытий из порошковых проволок / Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф., Васильева М.И., Лебедев Д.И., Федоров М.В. // Сб тр. III Евразийского симп. по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. – Якутск, 2006. – Ч.2. – С. 65.
2. Стручков, Н.Ф. Исследования износостойкости газотермических покрытий из порошковых проволок / Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г., Федоров М.В., Лебедев Д.И. // Сб. статей конф. «X – Лаврентьевские чтения». – Якутск, 2006. – Т.1. – С. 180 – 185.
3. Федоров, М.В. Влияние структуры газотермического покрытия из порошковых проволок на процессы его изнашивания при трении скольжения / Федоров М.В., Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф., Лебедев Д.И. // Тезисы докладов XVIII междунар. интернет – конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения «МИКМУС-2006». – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2006 г. – С. 53.
4. Винокуров, Г.Г. Исследования процессов изнашивания газотермических покрытий из порошковых проволок при трении скольжения / Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф., Федоров М.В., Лебедев Д.И., Кычкин А.К. // Наука и образование. – 2007. – №1. – С. 33-37.
5. Лебедев, Д.И. Порошковые материалы для получения износостойких покрытий и материалов, их модифицирование наноразмерными добавками / Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г., Яковлева С.П., Васильева М.И., Стручков Н.Ф., Федоров М.В., Лебедев М.П. // Материалы IV Ларионовских чтений. – Якутск: ТИРЦ ЯРООО ВОС, 2009. – С. 74-78.
6. Лебедев, Д.И. Влияние ультрадисперсных добавок на износостойкость и характеристики поверхности трения газотермических покрытий / Лебедев Д.И., Стручков Н.Ф., Федоров М.В. // Сб. тр. междунар. конф. с элементами

- научной школы для молодёжи «Создание новых материалов для эксплуатации в экстремальных условиях». – Якутск: ПаблИш Групп, 2009. – С. 141-143.
7. Стручков, Н.Ф. Исследование износостойкости термообработанных электрометаллизационных покрытий / Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г., Васильева М.И., Федоров М.В., Лебедев Д.И. // Сб. тр. междн. конф. по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов. – Томск, 2009. – С. 370-371.
 8. Винокуров, Г.Г. Исследование триботехнических характеристик газотермических покрытий с ультрадисперсными модифицирующими добавками / Винокуров Г.Г., Васильева М.И., Кычкин А.К., Стручков Н.Ф., Федоров М.В., Лебедев Д.И. // Материалы 11-й междн. практической конф. «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – Ч.1. – С. 44-49.
 9. Винокуров, Г.Г. Исследование взаимосвязи структуры и микротвердости износостойких покрытий, модифицированных ультрадисперсными порошками / Винокуров Г.Г., Федоров М.В., Кычкин А.К., Васильева М.И., Сивцева А.В., Лебедев Д.И. // Сб. тр. VII междн. научно-практической конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2009. – С. 180-181.
 10. Лебедев, Д. И. Формирование структуры износостойких покрытий, модифицированных наноразмерными порошками / Лебедев Д. И., Винокуров Г. Г., Яковлева С. П., Васильева М. И., Стручков Н. Ф., Федоров М. В. // Сб. тезисов XV Всероссийской научной конф. студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-15». – Кемерово - Томск, 2009. – С.737 -738.
 11. Лебедев, М.П. Использование минеральных модифицирующих добавок в износостойких электрометаллизационных покрытиях из порошковых проволок / Лебедев М.П., Кычкин А.К., Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф., Лебедев Д.И. // Материалы выездной сессии научного совета РАН по научным основам химической технологии «Современные проблемы химической технологии». – Новосибирск, 2009. – С.58.
 12. Лебедев, Д.И. Взаимосвязь характеристик поверхностей модифицированного газотермического покрытия и твердосплавного контртела при трении скольжения / Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г., Лебедев М.П. // Тр. V Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата «EURASTRENCOLD-2010». – Якутск, 2010. – Ч.1. – С. 129-138.
 13. Лебедев, Д.И. Взаимосвязь характеристик поверхностей модифицированного газотермического покрытия и контртела при трении скольжения / Лебедев Д.И., Лебедев М.П., Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф. // Материалы междн. научно-технической конф. «Современное материаловедение и нанотехнологии». – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – С.127-132.
 14. Лебедев, Д.И. Исследование характеристик поверхностей трения газотермического покрытия и твердосплавного контртела // VII Росс. ежегод-

- ная конф. молодых научных сотрудников и аспирантов. – М: Интерконтакт Наука, 2010. – С. 462-464.
15. Лебедев, Д.И. Исследование взаимосвязи характеристик поверхностей трения модифицированного газотермического покрытия и контртела / Лебедев Д.И., Лебедев М.П., Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф. // Сб. тр. XVI междн. научно-технической конф. «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций». СПб, 2011. – С. 170-174.
 16. Винокуров, Г.Г. Корреляция шероховатостей контактных поверхностей трения покрытия с ультрадисперсными модифицирующими добавками и стального контртела / Винокуров Г.Г., Лебедев Д.И. // Сб. материалов IV междн. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов DFMN-2011». – М., 2011. – С.454-456.
 17. Лебедев, Д.И. Взаимосвязь характеристик поверхностей износостойкого покрытия и металлического контртела при трении скольжении / Лебедев Д.И., Лебедев М.П., Винокуров Г.Г. // Материалы Всероссийской конф. научной молодежи «ЭРЭЛ - 2011». – Якутск: Изд-во ООО «Цумари Пресс», 2011. – Т.1. – С. 103-105.
 18. Гаврильева, А.А. Применение статистического подхода для определения параметров поперечного профиля поверхностей пар трения / Гаврильева А.А., Лебедев Д.И. // Материалы XV Ларионовских чтений. – Якутск: ОАО «Медиа-холдинг Якутия», 2012. – Т.1. – С. 68-72.
 19. Лебедев, Д.И. Автокорреляционные функции поперечного профиля поверхности трения износостойких порошковых покрытий / Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г., Лебедев М.П. // Материалы XIV междн. научно-практической конф. «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – Ч.1. – С. 102-108
 20. Лебедев, Д.И. Корреляционные характеристики профиля поверхности трения износостойких порошковых покрытий / Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г., Лебедев М.П. // Тр. Всероссийской конф. молодых ученых «Проблемы и перспективы управления энергетическими комплексами и сложными техническими системами в арктических регионах». – Якутск: Изд-во "Компания Дани АлмаС", 2012. – С. 159-163.
 21. Лебедев, Д.И. Корреляционные характеристики профиля поверхности трения износостойких модифицированных порошковых покрытий // Сб. материалов IX Росс. ежегодной конф. молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». – М.:ИМЕТ РАН, 2012. – С. 499-501.
 22. Винокуров, Г.Г. Влияние модифицирующих добавок на износостойкость газотермических порошковых покрытий / Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф., Лебедев Д.И. // Материалы XV междн. научно-практической конф. «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика». – СПб.: Изд-во Поли-техн. ун-та, 2013. – Ч.1. – С. 48-52.