

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.383.02, СОЗДАННОГО  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 26.10.2022 г. № 23

О присуждении Маркову Михаилу Александровичу, гражданину РФ, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Функциональные керамические покрытия, полученные с применением метода микродугового оксидирования» по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов, принята к защите 22 июня 2022 г. (протокол заседания № 17) диссертационным советом 24.2.383.02, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26), утвержденным приказом Минобрнауки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Марков Михаил Александрович, 1988 года рождения.

В 2010 году соискатель окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» в 2010 году, инженер по специальности «Химическая технология тугоплавких неорганических и силикатных материалов. В 2017 году окончил заочную аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)». В 2017 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов на тему «Износостойкие керамические материалы на основе оксида

алюминия для пар трения». В настоящее время работает научным сотрудником и состоит в докторантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)».

Диссертация выполнена на кафедре химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)».

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Пантелеев Игорь Борисович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Шаяхметов Ульфат Шайхизаманович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», кафедра инженерной физики и физики материалов, заведующий кафедрой;

Сырков Андрей Гордианович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра общей и технической физики, профессор;

Баньковская Инна Борисовна, доктор химических наук, доцент, ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени «Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН», лаборатория кремнийорганических соединений и материалов, ведущий научный сотрудник;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск, в своем положительном отзыве, подписанном Ворожцовым Александром Борисовичем, доктором физико-математических наук, профессором, проректором по научной и инновационной деятельности, заведующим научно-исследовательской лабораторией высокоэнергетических и специальных материалов физико-технического факультета, утвержденном Галажинским Эдуардом Владимировичем, академиком РАО, доктором психологических наук, профессором, ректором ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», указала, что

рассматриваемая диссертация может быть оценена только положительно. По мнению ведущей организации диссертация соответствует требованиям действующего Положения о присуждении ученых степеней и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной проблемы, направленной на разработку новых технологий функционально-градиентных керамических покрытий заданного фазового состава на изделиях из металлов и сплавов с применением метода микродугового оксидирования, имеющей существенное значение для развития такой отрасли наук, как технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов, а автор диссертации Марков Михаил Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов. Учитывая достаточно высокий научный уровень проведенных исследований, их объем, а также спектр затронутых проблем, можно говорить о создании Марковым М.А. научно-технологического направления по способам получения функционально-градиентных керамических покрытий с комплексным использованием таких технологий, как «холодное» газодинамическое напыление (ХГДН), микродуговое оксидирование (МДО), магнетронное напыление. Ведущая организация отмечает, что результаты диссертации могут быть использованы следующими организациями: ООО «Невский инструментальный завод», ООО «Научно-производственное предприятие «Металлокерамические композиционные материалы», ФГБУН «Институт проблем машиноведения Российской академии наук», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)».

Соискатель имеет 107 опубликованных научных работ, из них 61 научная работа по теме диссертации, в том числе 42 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК, из них 37 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных (Scopus, WoS, Springer, Chemical Abstracts), 9 патентов РФ на изобретения, 10 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях. Авторский вклад соискателя заключается в разработке планов экспериментов, проведении анализа материалов и покрытий, исследовании физико-механических свойств, анализе результатов исследования и современного состояния проблемы, подготовке текстов публикаций.

Опубликованные работы полностью отражают основные положения диссертационного исследования, в диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые работы автора по теме диссертации:

1. Kuznetsov, Y. The use of cold spraying and micro-arc oxidation techniques for the repairing and wear resistance improvement of motor electric bearing shields/ Kuznetsov Y., Kravchenko I., Gerashchenkov D., Markov M., Davydov V., Mozhayko A., Dudkin V., Bykova A.// *Energies*. – 2022. – Т. 15. – № 3. – P. 912.

Markov, M.A. Formation of Wear- and Corrosion-Resistant Coatings by the Microarc Oxidation of Aluminum/ M.A. Markov, A.D. Bykova, A.V. Krasikov, B.V. Farmakovskii, D.A. Gerashchenkov // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2018. – Vol. 59. – № 2. – P. 207–214.

2. Markov, M.A. Study of the microarc oxidation of aluminum modified with silicon carbide particles/ Markov M.A., Perevislov S.N., Krasikov A.V., Gerashchenkov D.A., Bykova A.D., Fedoseev M.L. // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2018 – Vol. 91. – No. 4. – P. 543-549.

3. Markov, M.A. Corrosion-Resistant Ceramic Coatings that are Promising for Use in Liquid Metal Environments/ M.A. Markov, A.D. Kashtanov, A.V. Krasikov, A.D. Bykova, D.A. Gerashchenkov, A.M. Makarov, S.N. Perevislov// *Key Engineering Materials*. – 2019. – Vol. 822. – P. 752-759.

4. Markov, M.A. Investigation of the Characteristics of Ceramic Coatings Obtained by Microarc Oxidation on Direct and Alternating Currents in an Alkaline Silicate Electrolyte/ M.A. Markov, Yu.A. Kuznetsov, A.V. Krasikov, A.D. Bykova, Yu.A. Fadin, I.N. Kravchenko, A.N. Belyakov, S.N. Perevislov// *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2020. – Vol. 49. – № 8. – P. 21-28.

5. Markov, M. A. Features of ceramic coating formation by a method of microspark oxidation in an electrolyte based on boric acid/ M.A. Markov, Yu.A. Kuznetsov, A.V. Krasikov, A.A. Slobodov, A.D. Bykova, S.N. Perevislov// *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2020. – Vol. 61 – № 3. – P. 293-298.

6. Markov, M.A. Porous Functional Coatings by Microarc Oxidation/ M. A. Markov, D.A. Gerashchenkov, A.V. Krasikov, I.V. Ulin, A.D. Bykova, M.L. Shishkova, N.V. Yakovleva// *Glass and Ceramics*. – 2018. – Vol. 75. – No. 7-8. – P. 258-263.

7. Markov, M.A. Formation of Protective Ceramic-Metal Coatings on Steel Surfaces by Microarc Oxidation with Electro-Chemical Deposition of Nickel/ Markov M.A., Krasikov A.V., Gerashchenkov D.A., Bykova A.D. Ordan`yan S.S., Fedoseev M.L. // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2018. – Vol.58. – № 6. – P. 634-639.

8. Markov, M.A. Development of a Method for Evaluating Alumina Ceramic Material the Wear Resistance/ M.A. Markov, Yu.A. Fadin, O.N. Bezenkina, A.D. Bykova,

A.N. Belyakov// Refractories and Industrial Ceramics. – 2020. – Vol. 60. – P. 614-617.

9. Markov, M.A. Technological features of the porous functional ceramic coatings formation on aluminium by the method of microarc oxidation in silicate electrolytes/ M.A. Markov, A.V. Krasikov, A.D. Bykova, Yu.A. Kuznetsov, I.N. Kravchenko, S.N. Perevislov, I.A. Bogdanov// Welding International. – 2021. – Vol. 33. – Issue 7-9. – P. 351-356.

10. Kuznetsov, Yu.A. Technological Aspects of Temperature Estimation in Metal in the Case of Coating Formation Using the Method of Heterophase Transfer and Microarc Oxidation// Yu.A. Kuznetsov, M.A. Markov, I.N. Kravchenko, A.V. Krasikov, S.A. Velichko, P.V. Chumakov, K.V. Kulakov// Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2021. – Vol. 57. – № 4. – P. 502–506.

На диссертацию и автореферат отзывы прислали:

1 – Апатенко Алексей Сергеевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой технического сервиса машин и оборудования ФГБОУ ВО «Российский государственный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», г. Москва;

2 – Бажин Владимир Юрьевич, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург;

3 – Ваграмян Тигран Ашотович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой инновационных материалов и защиты от коррозии ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», г. Москва;

4 – Вартанян Мария Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии керамики и огнеупоров ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», г. Москва;

5 – Бессмертный Василий Степанович, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технологии стекла и керамики ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород;

6 – Галиновский Андрей Леонидович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой СМ-12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» «Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана», г. Москва;

7 – Величко Сергей Анатольевич, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева, Институт механики и энергетики, р. Мордовия;

8 – Каштанов Александр Дмитриевич, доктор технических наук, заместитель генерального директора НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» по научной работе, Санкт-Петербург;

9 – Петров Сергей Николаевич, доктор технических наук, начальник лаборатории «Исследование структуры и свойств материалов» НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург;

10 – Клопотов Анатолий Анатольевич, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика и материаловедение» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск;

11 – Столяров Владимир Владимирович, профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории узлов трения для экстремальных условий ФГБУН «Институт машиностроения им. А.А. Благонравова», г. Москва;

12 – Верещагин Владимир Иванович, профессор, доктор технических наук, профессор-консультант Научно-образовательного центра Н.М. Кижнера ВГАУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск;

13 – Каргин Юрий Федорович, доктор химических наук, заведующий лабораторией физико-химического анализа керамических материалов ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН», г. Москва;

14 – Сычева Анастасия Максимовна, доцент, доктор технических наук, профессор кафедры специальных сооружений ракетно-космических комплексов ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

Все отзывы положительные.

В отзывах указывается, что диссертационная работа выполнена по актуальной тематике, обладает научной новизной и практической значимостью, в автореферате полностью отражена суть исследования, осуществлены синтез и исследование сложных систем, проведен глубокий научный анализ полученных результатов, диссертационное исследование выполнено по актуальной тематике, обладает научной новизной и практической значимостью, автор работы заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук.

В отзывах содержатся следующие замечания критического характера:

1) Следовало бы продемонстрировать преимущества разработанных покрытий по сравнению с магнетронными и плазменными покрытиями и полученный результат представить, например, в виде сравнительной таблицы.

2) В тексте автореферата не объясняется, почему в качестве твердой смазки для МДО-покрытия выбран именно никель. Проводились ли эксперименты по апробации введения полимерных соединений (фторопласт, СВМП и т.д.)?

3) В данном исследовании важным условием являются термодинамические условия для полного оксидирования из заданного первичного состава смесей, но в автореферате в полной мере этот вопрос не отражен.

4) Представленные в автореферате рентгенограммы требуют программной обработки для улучшения читаемости.

5) В состав боратного электролита входят борная кислота и гидроксид натрия, однако автором никак не рассмотрено возможное внедрение оксианионов бора и особенно катиона  $\text{Na}^+$  в структуру образующихся оксидов алюминия.

6) Излишнее количество табличных данных, усложняющих чтение и восприятие работы, а также наличие необработанных рентгенограмм.

7) Из текста автореферата не ясно, каков состав транспортирующего газа, дистанция напыления и температурные условия напыления.

8) Было бы интересно наглядно представить структуру композиционного МДО-покрытия со встроенными частицами карбида кремния, используя метод ионного сечения, который был задействован в другой части работы.

9) Диссертант не подтверждает осаждение свинца в керамические покрытия результатами рентгенофазового анализа поверхности.

10) Не представлены результаты коррозионных испытаний композиционных керамических МДО-покрытий, модифицированных карбидом кремния, что могло бы качественно усилить работу.

11) Нельзя не отметить, что термодинамический подход описывает равновесные процессы, а реакции, протекающие при электрическом пробое слоя электролита, сугубо неравновесны, и могут не подчиняться законам термодинамики.

12) Таблицу 10 и 11 следовало бы свести в одну, что обеспечило бы информативное сравнение режимов микродугового оксидирования для постоянного и переменного тока, а также исключило бы опечатку со стороны диссертанта.

13) Следовало бы более полно раскрыть разработанные методы диагностики за счет наработанной статистики по испытаниям большого спектра составов керамических покрытий, полученных различными технологическими методами.

14) Не в полной мере раскрыта научная составляющая диссертационной работы.

15) Не приведены основные выводы диссертации.

16) Стр. 11 – подпись к рис. 1 – «Керамические покрытия в боратном электролите»? По-видимому, подразумеваются керамические покрытия, полученные в боратном электролите; стр. 14 – подпись к рис. 5 – «поперечное сечение, распределение элементов по алюминию и кислороду»? – речь идет о распределении алюминия и кислорода по поперечному сечению покрытия Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; стр. 16 – подпись к рис. 7 – «Коррозионные испытания покрытий», - на рисунке представлены фотографии образцов после коррозионных испытаний; рис. 14 – «Структура порошка Al-SiC с цветовым распределением по алюминию и кремнию»? – очевидно, что имеет место распределение алюминия и кремния в механической смеси порошков или армированном порошке.

17) Что автор называет «градиентными покрытиями»? Пояснение встретилось один раз на стр. 13, как это касается других видов покрытий в работе?

18) На стр. 20 автор утверждает, что «Адгезия покрытия обеспечивается связью Al-Al». О каком типе связи идет речь?

19) Таблица 12 – Элементный состав поверхности МДО-покрытия по 4 спектрам и табл. 15. Значения концентрации элементов даны с точностью 0,01 мас. %, что не подтверждено сведениями о погрешности измерений и вызывает сомнение для легких элементов – кислорода, натрия.

20) Стр. 25 – название «энергодисперсионного анализа» не корректно (на стр. 8 указано правильно – микрорентгеноспектрального анализа, а более точно – «локального рентгеноспектрального анализа».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработаны** научно обоснованные параметры технологии керамических покрытий с заданными функциональными свойствами и определены способы управления процессом для синтеза покрытий заданного фазового состава, на основе исследования процесса микродугового оксидирования в нетиповых боратных электролитах,

**разработана** принципиально новая технология функционально-градиентных покрытий на основе алюминия, армированных оксидом алюминия, обладающих сочетанием высокой адгезионной прочности и твердости с низкой пористостью.

Предложено использовать покрытия такого рода, как упрочняющие прекурсоры для микродугового оксидирования,

**разработана** принципиально новая технология износостойких и коррозионностойких керамических наноструктурированных покрытий на металлах с комплексным использованием методов микродугового оксидирования и сверхзвукового гетерофазного переноса,

**изучено** влияние параметров технологии (токовых характеристик, составов силикатно-щелочных электролитов) на формирование пористых керамических покрытий в процессе микродугового оксидирования алюминия и его сплавов. Доказана возможность введения в пористые керамические покрытия функциональных материалов на примере антифрикционного металла и композиций каталитически активных компонентов,

**изучено** сопротивление к окислению карбида кремния при микродуговом оксидировании в электролите на основе борной кислоты, что позволило разработать научно обоснованные параметры технологии износостойких керамических покрытий, модифицированных частицами карбида кремния, на металлах и сплавах.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

**изложен** расчетный способ оценки величины внутренних напряжений, возникающих в функциональных покрытиях на деталях машин, в условиях эксплуатации в высокотемпературной среде и метод расчета температуры на адгезионной границе покрытие – металлическая основа, определены возможности оптимизации механических напряжений в покрытии в зависимости от его толщины и температуры эксплуатации,

**определены** химические взаимодействия компонентов боратных электролитов в контакте с оксидируемым алюминиевым сплавом, что позволило оптимизировать параметры технологии микродугового оксидирования.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что**

**разработаны** керамические функционально-градиентные покрытия для использования на ремонтно-технических и других предприятиях технического сервиса, занимающихся восстановлением и упрочнением изношенных деталей,

**разработаны** керамические функционально-градиентные покрытия на стали, работающие в высокотемпературных агрессивных средах, в том числе в потоке жидкого расплавленного свинца,

**разработан** носитель катализатора на металлической основе за счет введения каталитически активных компонентов на пористую поверхность керамических МДО-покрытий,

**разработаны** антифрикционные металлокерамические покрытия за счет модификации пористой поверхности МДО-покрытия твердой смазкой на примере никеля,

**представлены** информативные результаты длительных трибологических и коррозионных испытаний разработанных керамических покрытий,

**предложены** оригинальные экспресс-методики оценки износостойкости тонкослойных керамических покрытий с применением метода акустической эмиссии или анализа изменения параметров шероховатости.

#### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** достоверность результатов исследования обеспечена применением надежных аналитических методов, стандартной измерительной аппаратуры, согласованностью полученных результатов и их сопоставлением со справочными и литературными источниками,

**теория** основана на достоверных и проверяемых данных и в целом соответствует современным представлениям в научной литературе по теме диссертации,

**идея базируется** на критическом анализе отечественных и зарубежных литературных данных по тематике исследования, учете и обобщении опыта создания функциональных керамических покрытий с применением широкого комплекса технологических подходов,

**использованы** известные подходы и соответствующие решаемым задачам методы обработки и теоретического анализа экспериментальных результатов,

**установлено** качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами по близким аналогам материалов, представленными в независимых источниках по данной тематике,

**использованы** современные методики сбора и анализа исходной информации, методы анализа и стандартизованные методики.

**Личный вклад соискателя** состоит в проведении поиска и анализе литературы по тематике работы, получении опытных образцов керамических и металлокерамических покрытий, исследовании, анализе и обобщении экспериментальных данных, подготовке публикаций. Работа выполнена автором самостоятельно.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические вопросы и замечания:

1. Не до конца ясно по докладу, в чем преимущества МДО алюминия перед анодированием.
2. В работе был использован не только анодный, но и катодно-анодный режим МДО, а в чем их принципиальное различие?
3. Вводились ли еще какие-либо функциональные вещества в пористую поверхность МДО-покрытий, помимо твердой смазки на примере никеля?
4. Изучалось ли, каким образом столь разнородные по химической природе и структуре частицы закрепляются в покрытии?
5. Наночастицы оксида алюминия склонны к агломерации, можно ли ее исключить при нанесении покрытия методом ХГДН?
6. Не очень понятно, почему на стальных образцах с покрытиями присутствуют неровности и цветовые изменения до и после проведения коррозионных испытаний в соляном тумане.
7. Есть ли стандартизированные методы для определения микротвердости керамических покрытий? При нагрузке алмазный индентор может продавить покрытие.
8. В выводах приведены результаты по МДО на переменном токе, как это прокомментировать?
9. В работе мало говорится непосредственно о механизме процесса МДО.
10. Метод ХГДН является чувствительным к фракционному составу наносимых части, как это учитывать?
11. Каковы перспективы использования метода ХГДН для нанесения покрытий на другие (неметаллические) материалы?

Соискатель Марков М.А. согласился с замечаниями, ответил на задаваемые ему вопросы и привел собственную аргументацию:

1. МДО является выгодной технологической альтернативой. В процессе МДО плазмохимические реакции имеют определяющее влияние на фазообразование. Преимущества, по сравнению с анодированием, состоят в следующем: переход от гаммы к альфе модификации оксида алюминия при фазообразовании, более высокая скорость роста покрытия, более высокая микротвердость, использование менее агрессивных электролитов.
2. Катодно-анодный режим МДО обладает рядом преимуществ, по сравнению с анодным режимом, а именно: при катодном импульсе прогревается внутренняя часть

формируемого слоя, что способствует образованию высокотемпературных фаз, при анодном импульсе повышается температура плазмы за счет нахождения в порах водорода, при катодном импульсе из пор выталкивается горячий электролит.

Преимущества катодно-анодного режима для МДО алюминия в силикатно-щелочных электролитах продемонстрированы в работе в таблицах, в частности, повышение микротвердости, снижение пористости.

3. Помимо никеля в поры МДО апробировано введение сверхмолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Введение осуществлялось посредством нанесения суспензии порошка СВМПЭ с глицерином на пористое покрытие, с последующей термообработкой. Метод является трудоемким, так как для получения порошка требуется осуществлять помол с предварительной заморозкой СВМПЭ в жидком азоте.

4. При использовании метода ХГДН формируется механическая связь. Объяснить природу МДО с использованием термодинамического аппарата не представляется возможным. Закрепление керамических частиц в металлическом порошке достигается посредством механосинтеза с использованием чашевого вибрационного истирателя.

5. К сожалению, процесс агломерации мы можем только констатировать и учитывать, но избавиться от этого негативного явления достаточно сложно.

6. На образцы с покрытиями был нанесен клей для изоляции проволочных захватов. Предварительно наносился методом ХГДН алюминиевый слой. Режимы напыления не отрабатывались, так как для коррозионных испытаний качество поверхности можно не учитывать. После нанесения МДО покрытие обладало рельефной поверхностью. Цветовые следы на образцах являются осадком электролита, что также несущественно.

7. Микротвердость покрытий определялась по методикам измерения микротвердости алюмооксидных керамических монокристаллических материалов. Для исключения продавливания покрытий измерение проводилось в поперечном сечении на шлифе.

8. Под переменным током я имею ввиду катодно-анодный или импульсный токовый режим. Согласен с тем, что применил некорректную формулировку.

9. Метод МДО в данной работе является инструментом для формирования покрытий с определенной структурой и свойствами. Механизм процесса МДО на сегодняшний день системно не описан в мировой научной литературе, объяснение процесса основано на выводах из экспериментальных исследований.

10. Экспериментально показано, что мелкие фракции металлических частиц менее 20 мкм преимущественно уносятся в газовом потоке с подложки. В то время, как крупные фракции металлических частиц более 60 мкм ухудшают адгезию и когезию формируемых слоев. Введение мелкодисперсных керамических частиц в покрытие описано в работе по двум способам: при напылении непосредственно в газовый поток или через армированные металлические частицы.

11. Я не проводил апробацию нанесения ХГДН-покрытий на керамику. Нанести методом ХГДН металлические порошки на пластик невозможно, он будет разрушаться под ударным воздействием напыляемых частиц. Однако, методом ХГДН на металлы эффективно напыляются порошки СВМПЭ, фторопласта. Введение данных компонентов в алюминиевое прекурсорное покрытие повышает напряжение на электролитической ванне при МДО-обработке. Мне кажется, что наиболее перспективным направлением в будущем станет формирование объемных структур заданной геометрии методом ХГДН композиционных порошков, с последующей безуглеводородной термообработкой и образованием прочных интерметаллидных или керамических композиций, как частный случай аддитивной технологии.

Диссертация Маркова Михаила Александровича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, имеющую значительную научную и практическую ценность для развития технологии силикатных и тугоплавких неметаллических материалов, полностью соответствует критериям, установленным пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с последующими изменениями).

На заседании 26 октября 2022 года диссертационный совет принял решение за разработку новых научно обоснованных технических и технологических решений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области технологии силикатных и тугоплавких неметаллических материалов, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, присудить Маркову М.А. ученую степень доктора технических наук по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов наук по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов, участвовавших в заседании, из 26 человек,

входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель  
диссертационного совета



Шевчик Андрей Павлович

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Воронков Михаил Евгеньевич

26 октября 2022 года