



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Электроизоляционные свойства алюмооксидных детонационных покрытий

Владимир Ульяницкий ^a, Александр Штерцер ^{b,*}, Игорь Батраев ^c

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, пр. академика Лаврентьева, 15, г. Новосибирск, 630090, Россия

^a <http://orcid.org/0000-0002-3538-1486>, ulianv@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0003-4973-0437>, asterzer@mail.ru,^c <http://orcid.org/0000-0002-0364-144X>, ibatraev@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 534.222.2+621.793.79

История статьи:

Поступила: 01 сентября 2018

Рецензирование: 13 сентября 2018

Принята к печати: 22 октября 2018

Доступно онлайн: 15 декабря 2018

Ключевые слова:

Детонационное напыление

Электроизоляционное покрытие

Удельное сопротивление

Диэлектрическая прочность

Финансирование

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках проекта № 18-43-540008.

АННОТАЦИЯ

Введение. Для получения электроизоляционных покрытий из оксидной керамики широко используются различные методы газотермического напыления, такие как газопламенное, плазменное, HVOF, детонационное и др. Важными, но пока до конца не изученными являются вопросы о природе электропроводности газотермических, в том числе детонационных, покрытий, а также о влиянии состава используемой детонирующей смеси на их электроизоляционные свойства. Экспериментально обнаружено, что электропроводность алюмооксидных покрытий зависит не только от технологического режима их нанесения и структуры, но и от влажности и температуры окружающей атмосферы. Однако физической модели, количественно описывающей механизм электропроводности с учетом этих факторов, пока не предложено, поэтому задача теоретического объяснения имеющихся экспериментальных данных является актуальной. **Цель работы** заключалась в экспериментальном изучении электроизоляционных свойств алюмооксидных покрытий, полученных детонационным напылением, в определении влияния состава детонирующей смеси на их электропроводность, а также в построении физической модели, позволяющей количественно оценивать удельное объемное сопротивление покрытий. **В работе исследованы** детонационные покрытия, полученные на детонационной установке CCDS2000 из порошка корунда марки M40 Super с использованием ацетиленокислородных смесей с различным содержанием компонентов. **Методы исследований** включали измерения пористости, удельного электрического сопротивления и диэлектрической прочности полученных покрытий. Полученная информация использовалась для построения модели проводимости детонационных покрытий с учетом дефектности структуры. **Результаты и их обсуждение.** Различия в свойствах покрытий, полученных с применением ацетиленокислородных детонирующих смесей, в широком диапазоне молярных соотношений кислорода к топливу (от 1,0 до 5,0) не обнаружено. Высказана гипотеза о том, что проводимость покрытий обусловлена наличием дефектов – микроканалов, заполненных адсорбированной водой. Удельное сопротивление покрытий составляет $(0,3 \dots 1,3) \cdot 10^{10}$ Ом·см, условная диэлектрическая прочность 5...6 кВ для толщины 240...300 мкм. Измеряемая в данной работе диэлектрическая прочность называется условной, поскольку до пробоя в обычном понимании, когда значения пробойного тока превышают сотни миллиампер и даже десятки ампер, тестируемые образцы не доводились. Пробой регистрировался, если ток через щуп превышал установленное предельное значение $I = 1$ мА, т. е. ток, уже ощущаемый человеком. На основе экспериментальных данных и предложенной гипотезы построена модель, согласно которой в объеме покрытия существуют сквозные дефекты в виде микроканалов, площадь которых составляет 0,5...2,0 % площади покрытия, а поперечный размер – от 24 до 105 нм. Микроканалы заполнены адсорбированной из атмосферы водой и по ним протекает основной ток при приложении напряжения. Удельное сопротивление воды при условном пробое составляет величину порядка 10^5 Ом·см. Научная значимость результатов заключается в объяснении причины более низкого удельного сопротивления газотермических покрытий по сравнению с беспористой спеченной алюмооксидной керамикой (более 10^{14} Ом·см). Практическая значимость состоит в возможности использования в детонационном напылении ацетиленокислородных смесей с различным сочетанием компонентов без ущерба качества электроизоляционных покрытий.

Для цитирования: Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А., Батраев И.С. Электроизоляционные свойства алюмооксидных детонационных покрытий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 83–95. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-83-95.

Введение

Для электроизоляции металлических элементов приборов и устройств используется широкий спектр материалов – от лаков, красок и полимеров до керамик, работающих в экстремальных

*Адрес для переписки

Штерцер Александр Александрович, д.ф.-м.н., доцент, в.н.с.
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
пр. акад. Лаврентьева, 15,
630090, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 333-00-03, e-mail: asterzer@mail.ru

условиях (высокие температуры, электрические напряжения, радиация и т. д.). Для получения электроизоляционных покрытий из оксидной керамики широко используются различные методы газотермического напыления, такие как газопламенное, плазменное, HVOF, детонационное и др. [1]. Такие покрытия применяются на подшипниках качения генераторов, электромоторов, на элементах индукционных печей и другого электротехнического оборудования, в геофизической аппаратуре, а также в специальных электрофизических установках, работающих в условиях радиации и/или агрессивных сред. Детонационное напыление (ДН) обеспечивает высокие электроизоляционные показатели [2] и хорошие механические характеристики [3], причем благодаря импульсному характеру процесса ДН дает возможность наносить покрытия на тонкостенные детали [4]. Высокое качество покрытий в ДН достигается подбором оптимальной скорости и температуры частиц; в тех случаях, когда параметры напыления далеки от оптимальных, покрытия могут иметь трещиноватую структуру [5, 6], которая ухудшает не только их прочностные, но и электроизоляционные свойства. Опыт показывает, что в оптимальном режиме детонационного напыления керамическая частица должна находиться в полурасплавленном состоянии [7]. В этом случае пористость и трещиноватость покрытий минимальны.

С научной и практической точки зрения важными и пока до конца не изученными являются вопросы о природе электропроводности детонационных покрытий, как, впрочем, и покрытий, полученных другими газотермическими методами, а также о влиянии состава детонирующей смеси на свойства получаемых покрытий. Уже давно было замечено, что диэлектрические свойства плазменных керамических покрытий зависят от их структуры, которая, в частности, характеризуется наличием пор [8]. Так, при пористости 5,5...7,9 % алюмооксидные покрытия сразу после напыления имеют объемное сопротивление $10^9 \dots 10^{10}$ Ом·см, а после сушки при 120 °С этот параметр повышается до $10^{13} \dots 10^{14}$ Ом·см. Диэлектрическая прочность плазменных покрытий зависит также от пористости и составляет 9,0...18,0 кВ/мм. Автор [8] полагает, что на электропроводность оказывает влияние адсорбированная порами вода, но

какого-либо количественного описания этого влияния в статье не предлагается. В работе [9], а также в [10, 11] было обнаружено, что электропроводность плазменных керамических покрытий зависит от температуры и влажности окружающей среды, что согласуется с [8]. Эти работы отличаются высоким экспериментальным уровнем, однако авторы этих работ ограничиваются качественными рассуждениями о влиянии на электропроводность пористости и слоистости структуры газотермических покрытий. Для алюмооксидных покрытий в [8] было также высказано предположение, что электропроводность связана с гигроскопичностью фазы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Однако в [9] эта гипотеза подвергается сомнению, поскольку, например, покрытие из MgAl_2O_4 с устойчивыми кристаллическими фазами тоже показывает падение удельного сопротивления на несколько порядков с ростом влажности атмосферы. Тем не менее появление фазы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ может вносить свой вклад в изменение электропроводности покрытий. Переход корунда $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в метастабильную фазу $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ при газотермическом напылении связан с быстрым затвердеванием расплавленного материала на подложке [4, 11, 12].

Теоретическое описание природы электропроводности и электрического пробоя диэлектриков пока предложено только для беспористых диэлектриков в виде монокристаллических и поликристаллических образцов [13] и для пористой керамики, но с порами, заполненными воздухом [14]. Подход в [14] основан на том, что напряжение пробоя воздуха намного ниже напряжения пробоя керамики, тогда наличие пор приводит к снижению эффективной толщины керамического слоя на величину суммарного размера пор, распределенных по толщине диэлектрика. В [13] показано, что в области низких напряжений (до 1 кВ) природа электропроводности керамики носит омический характер, когда проводимость определяется наличием термически активированных носителей зарядов и величина тока пропорциональна приложенному напряжению. В области же высоких напряжений, близких к пробоя (30 кВ для слоя оксида алюминия толщиной 0,3 мм), доминирующим является SCLC-механизм ограниченной проводимости пространственных зарядов (Space Charge Limited Conduction), в котором ток пропорцио-

нален квадрату напряжения. Количественные же оценки, учитывающие влияние влаги на диэлектрические свойства керамических покрытий, в литературе отсутствуют.

В технологии ДН важную роль играет состав используемой детонирующей смеси, т. е. отношение содержания кислорода к топливу. При малом содержании кислорода (богатая смесь) продукты детонации могут оказывать восстановительное воздействие на напыляемый материал, а при большом (бедная смесь) – окислительное. В случае оксида алюминия ДН применение богатых смесей предположительно может приводить к частичному восстановлению оксида на поверхности частиц, появлению свободного алюминия и вследствие этого ухудшению электроизоляционных свойств покрытий. По этой причине экспериментальная проверка влияния состава детонирующей смеси на электропроводность покрытий является актуальной с точки зрения практического применения ДН.

Цель настоящей работы заключалась в выявлении механизма электропроводности и пробоя алюмооксидных покрытий, получаемых методом ДН, построении физической модели, позволяющей количественно оценивать удельное объемное сопротивление покрытий, и определении влияния состава детонирующей смеси на их электропроводность. Для достижения цели решались задачи, связанные с получением покрытий на детонационной установке CCDS2000 [2, 7] и измерением их электросопротивления и напряжения пробоя. На основе анализа полученных экспериментальных данных строилась модель электропроводности.

Методика исследований

Используемые материалы и получение покрытий

В экспериментах применялся алюмооксидный (корунд) порошок M40 Super с размером зерна 40...28 мкм, производитель ООО «Инокс» (г. Новосибирск). Корунд представляет собой α -модификацию Al_2O_3 , которая по сравнению с другими формами оксида алюминия (γ -, δ -, θ - и т. д.) имеет максимальную плотность 3,9...4,1 г/см³ и твердость (9, по Моосу). Температура плавления оксида алюминия 2044 °С.

Покрытия наносились с помощью детонационной установки CCDS2000 [2, 7] с длиной ствола 800 мм и диаметром 20 мм, которая благодаря прецизионной системе газопитания, локализованной подаче и дозированию порций напыляемого порошка в каждом цикле (выстреле) работы установки обеспечивает высокую повторяемость режима ДН. В качестве подложек использовались диски из дюралюминия диаметром 40 мм и толщиной 7 мм и пластинки из стали Ст 3 размером 70×50×1,5 мм. Первые – для определения диэлектрической прочности покрытий, вторые – для измерения удельного сопротивления. Рабочий заряд формировали из ацетиленокислородных детонирующих смесей $C_2H_2 + kO_2$ со значениями $k = 1,0; 1,75; 2,5; 4,0; 5,0$. Вычисления параметров детонации газовых смесей выполнялись с помощью компьютерной программы DETON, созданной на основе модели, описанной в [15]. Поскольку DETON не работает на граничном значении $k = 1$, то для оценки параметров продуктов детонации данной смеси расчет выполнен с $k = 1,02$. В табл. 1 представлены расчет-

Таблица 1

Table 1

Параметры детонации газовых смесей $C_2H_2 + kO_2$
The detonation parameters of gas mixtures $C_2H_2 + kO_2$

k	D , м/с	U , м/с	P , МПа	T , К	ρ_g , кг/м ³	H , МПа
1,02	2930	1310	4,69	4519	2,15	1,86
1,75	2628	1196	3,96	4408	2,24	1,61
2,50	2425	1108	3,45	4215	2,28	1,41
4,00	2192	1004	2,89	3934	2,32	1,18
5,00	2096	960	2,67	3794	2,34	1,08

ные значения скорости детонации D , массовой скорости U , давления P , температуры T , плотности ρ_g и динамического напора H газа за фронтом детонации в зависимости от k .

Из табл. 1 видно, что продукты детонации ацетиленокислородной смеси с $k = 1,0$ обладают максимальной температурой и динамическим напором, и с этой точки зрения данная смесь, казалось бы, наиболее пригодна для напыления тугоплавких материалов. Что касается состава продуктов детонации, то для эквимольной смеси ($k = 1,0$) они состоят преимущественно из водорода и монооксида углерода, что предположительно может стать причиной частичного восстановления оксида алюминия и появления свободного алюминия с ухудшением диэлектрических свойств покрытия. Проведение ДН с различным k должно дать ответ на вопрос об оптимальном составе детонирующей газовой смеси при получении электроизоляционных покрытий. С тем чтобы скомпенсировать падение T и H при увеличении k , подбор оптимального режима ДН при $k > 1,0$ осуществлялся варьированием заряда детонирующей смеси так, чтобы температура вылетающих из ствола частиц достигала температуры плавления, что фиксировалось путем изучения сплэтов [7].

При напылении газотермическим методом важно исключить влияние нагрева образца на характеристики получаемого покрытия в процессе его формирования. ДН благодаря импульсному характеру процесса позволяет поддерживать температуру в пределах до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение всего процесса формирования покрытия на подложках из любого металла путем вариации частоты выстрелов и применения воздушного охлаждения обрабатываемого объекта. Для исключения искажения измеряемых электрических параметров формируемого покрытия из-за оксидных пленок на металлической подложке непосредственно перед напылением ее поверхность подвергалась пескоструйной обработке с удалением до 10 микрон поверхностного слоя образца. Предварительные эксперименты

на подложках различной толщины (от 1 до 10 мм) из углеродистой и нержавеющей стали, меди, латуни и алюминиевых сплавов показали, что при выполнении этих требований измеряемые параметры напыленного слоя диэлектрика не отличаются в пределах погрешности измерения.

Оптимизация процесса ДН керамики на установке CCDS2000 показала, что наилучшее качество покрытия получается на дистанции напыления 300 мм, когда пятно напыления имеет размер около 30 мм, а толщина слоя меняется в пределах пятна напыления, уменьшаясь от центра к периферии. В наших экспериментах напыление последовательностью выстрелов без сканирования производилось на дюралюминиевые диски диаметром 40 мм. Профиль получаемого покрытия показан на рис. 1, толщина алюмооксидного слоя в пределах пятна изменялась почти в два раза. Измерение производилось с помощью микрометра с погрешностью $\pm 5\text{ мкм}$. Тестирование диэлектрической прочности покрытия сферическим электродом диаметром 3 мм позволило выполнять на одном образце достаточно большое количество измерений.

Исследование пористости и диэлектрических свойств покрытий

Пористость получаемых покрытий измерялась по фотографиям микроструктуры на микроскопе OLYMPUS GX-51 с соответствующим

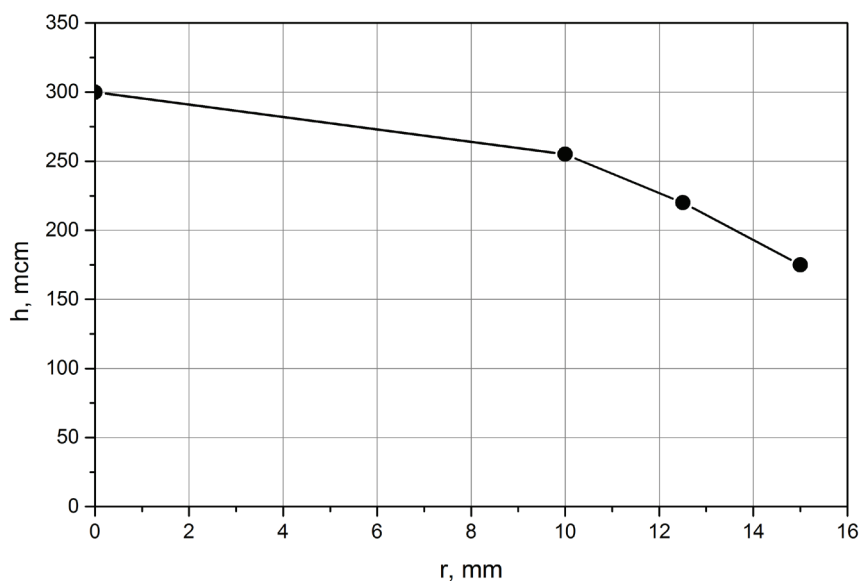


Рис. 1. Профиль покрытия на дюралюминиевой подложке $\varnothing 40 \times 7\text{ мм}$: h — толщина покрытия; r — расстояние от центра подложки

Fig. 1. Profile of the coating on aluminum substrate $\varnothing 40 \times 7\text{ мм}$: h — coating thickness; r — the distance from the substrate center

программным обеспечением. Для этого на оборудовании STRUERS Tegramin-20 после измерения удельного сопротивления из фрагментов стальных образцов приготавливался шлиф поперечного сечения покрытия, типичная микроструктура которого представлена на рис. 2. Сразу отметим, что характерный размер пор, наблюдаемых в покрытии, имеет величину порядка единиц микрон, причем проникающей пористости при таком разрешении не обнаруживается.

Результаты измерений представлены в табл. 2, из которой видно, что у полученных в оптимальных для каждого k режимах напыления покрытий пористость отличается незначительно, хотя можно отметить некоторую тенденцию увеличения пористости по мере обеднения смеси после стехиометрии.

Для измерения проводимости покрытий по ГОСТ Р 50499–93 (рис. 3) требовалось однородное по толщине покрытие под электродами диа-

метром более 40 мм. Поэтому напыление производилось в режиме сканирования образца, что позволило при усредненной толщине 300 мкм добиться на всей поверхности образца 70×50 мм однородности покрытия в пределах ± 10 мкм.

Удельное сопротивление измерялось с помощью прибора АКТАКОМ АММ-2093 Hipot Tester при напряжении $V = 0,5$ кВ в режиме работы прибора IR. Значения объемного удельного сопротивления укладывались в диапазон $(0,3 \dots 1,3) 10^{10}$ Ом·см для всех образцов и всех составов детонирующей смеси независимо от k . Важно отметить, что образцы были получены в летних условиях при влажности атмосферы около 60 %. Поскольку точке росы при температуре 20 °С соответствует парциальное давление паров воды 32 мм рт. ст., то и формирование покрытий и измерения удельного сопротивления выполнены при концентрации водяного пара в воздухе около 2,5 %. Для проверки влияния

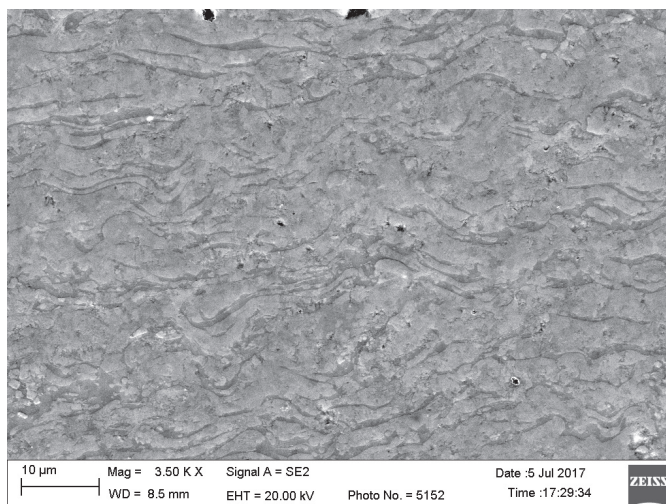
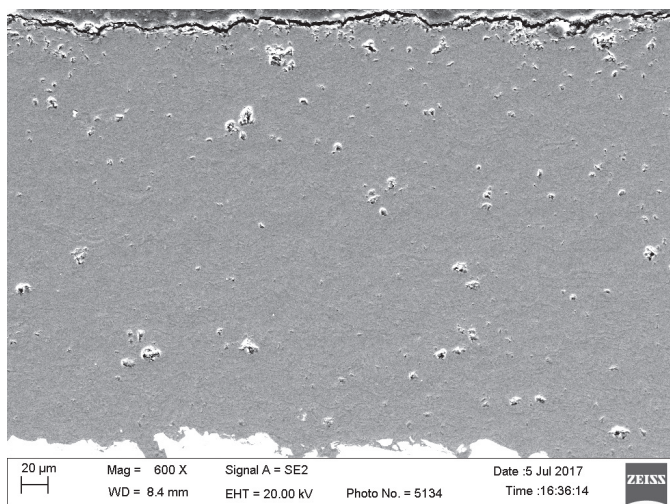


Рис. 2. Микроструктура полученных алюмооксидных покрытий (фото с различным увеличением)

Fig. 2. Microstructure of the produced alumina coatings (photos with different magnification)

Таблица 2

Table 2

Пористость ξ покрытий

Porosity ξ of coatings

k	1.0	1.7	2.5	4	5
$\xi, \%$	$1,3 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,3$	$1,5 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,5$

Примечание: наряду со средними величинами ξ со знаком \pm указаны их среднеквадратичные отклонения.

Note: along with mean values ξ with a sign \pm , its standard deviations are indicated.

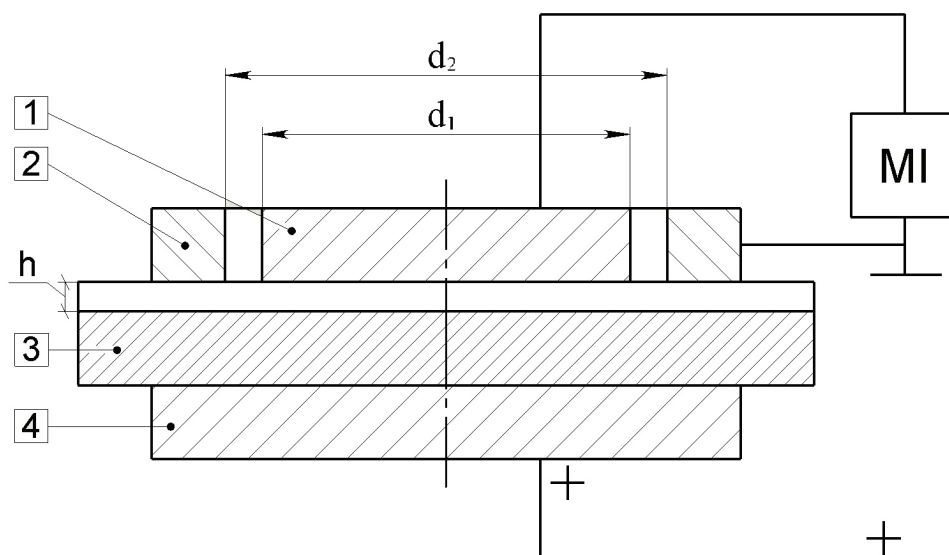


Рис. 3. Схема измерения объемного удельного сопротивления покрытий:

1 – измерительный электрод ($d_1 = 25$ мм); 2 – кольцевой (охранный) электрод ($d_2 = 30$ мм); 3 – образец с покрытием толщиной h ; 4 – высоковольтный электрод (диаметр 40 мм); MI – измерительный прибор

Fig. 3. Measurement design of the coatings volume resistivity:

1 – measuring electrode ($d_1 = 25$ мм); 2 – annular (protective) electrode ($d_2 = 30$ мм); 3 – sample with h coating thickness; 4 – high-voltage electrode (diameter of 40 мм); MI – measuring instrument

влаги тестовые образцы выдерживались в печи при $T = 300$ °С в течение двух часов, затем они остывали с печью до $T = 35$ °С, после чего образцы вынимались из печи и сразу проводились измерения их электросопротивления R . Результат на «просушенных» образцах оказался выше пределов измерения прибора АКТАКОМ в режиме IR (10 ГОм), что соответствует удельному сопротивлению покрытий $\rho > 1,6 \cdot 10^{12}$ Ом·см. При повторном тестировании этих образцов после выдержки в течение трех дней в атмосферных условиях значение ρ вернулось к исходному значению $\sim 10^{10}$ Ом·см. Подробно влияние влаги рассматривается далее в разделе «Результаты и их обсуждение».

Диэлектрическая прочность покрытий, нанесенных на дюралюминиевые диски, измерялась на том же приборе АКТАКОМ АММ-2093 Hipot Tester с варьированием постоянного напряжения (режим DC) от 2,5 до 6,0 кВ. Схема измерений представлена на рис. 4. Мы называем измеряемую по данному способу диэлектрическую прочность условной, поскольку до пробоя в обычном понимании, когда значения тока превышают сотни миллиампер и даже десятки

ампер, тестируемые образцы не доводились. В нашем случае пробоем считалось превышение установленного предельного значения тока $I = 1$ мА (ток, уже ощущаемый человеком). Кончиком щупа был стальной шарик диаметром 3 мм. На тестируемый образец надевалось фторопластовое кольцо с окном радиусом $r = 10$ мм – для измерений в центральной части покрытия и $r = 12,5$ мм – для измерений на периферии. При заданном напряжении осуществлялось сканирование щупом по поверхности покрытия соответственно в центральной и периферийной части с различной толщиной покрытия, как показано на рис. 4. При заданном напряжении фиксировалось число пробоев N_b из N тестов (в среднем $N = 25$) и определялась вероятность пробоя $w = N_b/N$. Результаты измерений для толщин покрытий в диапазонах 240...260 мкм для $r = 12,5$ мм и 260...300 мкм для $r = 10$ мм представлены в табл. 3. Покрытия толщиной более 300 мкм выдерживали напряжение 6 кВ, т. е. при усредненной напряженности электрического поля 20 кВ/мм ток, проходящий через щуп, не превышал 1 мА.

Из табл. 3 видно, что какой-либо зависимости напряжения условного пробоя от состава

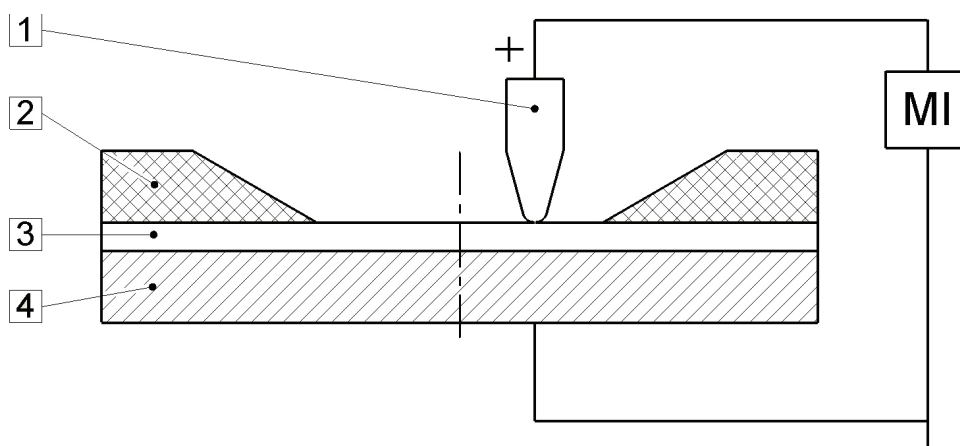


Рис. 4. Схема тестирования покрытий на условный пробой:

1 – щуп; 2 – фторопластовое кольцо; 3 – покрытие; 4 – подложка; MI – измерительный прибор

Fig. 4. Testing of coatings on conditional breakdown:

1 – probe; 2 – teflon ring; 3 – coating; 4 – substrate; MI – measuring instrument

Таблица 3

Table 3

Зависимость вероятности условного пробоя w (%) от приложенного напряжения V и отношения содержания кислорода к топливу k в диапазоне толщин покрытий h от 240 до 300 мкм

The dependence of the conditional breakdown probability w (%) on the ratio of oxygen content to fuel content k for coating thickness h in the range from 240 to 300 mcm

V , кВ	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
$k = O_2/C_2H_2$	$h = (240...260)$ мкм						
1,0	0	0	0	6	87	100	100
1,75	0	0	0	0	20	56	100
2,5	0	0	0	0	25	74	100
4,0	0	0	0	0	0	50	100
5,0	0	0	0	0	18	50	93
$k = O_2/C_2H_2$	$h = (260...300)$ мкм						
1,0	0	0	0	0	0	0	17.6
1,75	0	0	0	0	0	43	100
2,5	0	0	0	0	0	34	100
4,0	0	0	0	0	10	100	100
5,0	0	0	0	0	0	100	100

детонирующей смеси не наблюдается, и полный пробой для наиболее часто используемых на практике толщин покрытий в диапазоне от 240 до 300 мкм происходит при напряжении от 5 до 6 кВ. Результаты контрольных тестов на сканированных пластинках из стали в пределах погрешности эксперимента не отличались от полученных на дисках из дюралюминия.

Результаты и их обсуждение

В табл. 4 приведены некоторые свойства спеченной алюмооксидной керамики различной чистоты, производимой компанией Accuratus Ceramic Corporation (США) [16].

Видно, что удельное сопротивление спеченной беспористой керамики ($>10^{14}$ Ом·см)

Таблица 4

Table 4

Свойства спеченной алюмооксидной керамики
Properties of sintered aluminum oxide ceramics

Параметр	94 % Al ₂ O ₃	96 % Al ₂ O ₃	99,5 % Al ₂ O ₃
Плотность, g/cm ³	3,69	3,72	3,89
Пористость, %	0	0	0
Твердость, МПа	11 520	10 780	14 110
Коэффициент термического расширения, 10 ⁻⁶ /град	8,1	8,2	8,4
Диэлектрическая прочность при постоянном напряжении, кВ/мм	16,7	14,6	16,9
Удельное сопротивление, Ом·см	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴

на четыре порядка превышает сопротивление детонационных покрытий ($\approx 10^{10}$ Ом·см). В то же время диэлектрическая прочность детонационных покрытий толщиной 300 мкм достигает величины 20 кВ/мм и по этому параметру они не уступают спеченной керамике. Поскольку на шлифах покрытий проникающей пористости микронного масштаба не обнаруживается, то можно предположить, что пониженное в сравнении со спеченной керамикой удельное сопротивление детонационных покрытий вызвано наличием сквозных «микроканалов», образуемых наноразмерными порами. Такими порами могут являться дефекты на границах «элементарных» фрагментов, образующих покрытие. При этом микроканалы будут проходить по границам этих фрагментов. Поскольку при столкновении с подложкой напыляемые частицы дробятся на несколько частей [7], то с учетом дисперсности напыляемого порошка 40...28 мкм размер элементарного фрагмента можно приблизительно оценить в 10 микрон.

Наноразмерные микроканалы за счет капиллярных сил всасывают воду из воздуха и можно считать, что их удельное электросопротивление равно при малых напряжениях сопротивлению чистой воды $\rho_a = 6,3 \cdot 10^7$ Ом·см [17]. С ростом напряженности электрического поля, увеличением проходящего тока и связанного с этим нагрева концентрация носителей тока в воде повышается, и в предпробойном состоянии ее удельное сопротивление снижается до величины $\rho_a \approx 7 \cdot 10^3$ Ом·см [18].

Проанализируем полученные результаты на основе предложенной выше гипотезы нанораз-

мерных микроканалов. Пусть на единицу поверхности покрытия выходит n микроканалов, которые представим себе в виде токопроводящих трубок сечением S_i и длиной, равной толщине покрытия h . Тогда доля поверхности, занятая микроканалами, есть $\mu = nS_i$. Поскольку дефекты охватывают не всю поверхность, то $\mu < 1$. Площадь контакта щупа, с помощью которого производится тестирование покрытия, с поверхностью покрытия обозначим S , тогда при за- мере тока щуп охватывает суммарную площадь токопроводящих трубок $S_a = \mu S$. При измерении удельного сопротивления по схеме, изображенной на рис. 3, регистрируемый ток I протекает как по керамике, так и по микроканалам. Отсюда имеем формулу для тока, протекающего через некоторую поверхность покрытия S :

$$I = I_c + I_a = V/R = V \left(1/R_c + 1/R_a \right), \quad (1)$$

где I_c и I_a – токи, протекающие по толще керамики и по всем микроканалам соответственно; V – приложенное напряжение; R_c и R_a – сопротивления керамики и микроканалов, приходящихся на поверхность S соответственно. Далее имеем

$$R_a = \frac{\rho_a h}{\mu S} \quad \text{и} \quad R_c = \frac{\rho_c h}{(1 - \mu) S}, \quad (2)$$

где ρ_a и ρ_c – удельные сопротивления микроканалов (адсорбированной воды) и беспористой керамики соответственно. Тогда, поскольку $R = \rho h/S$, где ρ – измеренное по схеме,

изображенной на рис. 3, получаем удельное сопротивление покрытия из (1) и (2):

$$\rho = \frac{\rho_a \rho_c}{\mu \rho_c + (1 - \mu) \rho_a}. \quad (3)$$

Так как $\rho_a = 6,3 \cdot 10^7$ Ом·см, а удельное сопротивление беспористой керамики $\rho_c > 10^{14}$ Ом·см (см. табл. 4), то для $\rho_c \gg \rho_a$ имеем из формулы (3)

$$\mu = \frac{\rho_a}{\rho}. \quad (4)$$

Как упомянуто выше, измеренное по схеме, показанной на рис. 3, объемное удельное сопротивление покрытия $\rho = (0,3 \dots 1,3) 10^{10}$ Ом·см. Тогда оценка по выражению (4) доли площади покрытия, занимаемой дефектами, дает $\mu = (0,48 \dots 2,10) 10^{-2}$. Можно сказать, что площадь дефектов с повышенной проводимостью составляет примерно от 0,5 до 2,0 % площади покрытия. И хотя оценка удельного содержания нанопор практически совпадает с измерениями микроразмерной пористости (см. табл. 2), здесь можно говорить лишь о корреляции, поскольку сквозные каналы микронного масштаба на шлифах не обнаружены.

По данным табл. 3 можно оценить удельное сопротивление воды в микропорах при условном пробое. Из формул (1) и (2) с учетом того, что $\rho_c \gg \rho_a$, получаем уравнение

$$\rho_a = \frac{V \mu S}{I h}. \quad (5)$$

Поскольку площадь щупа диаметром 3 мм есть $S = \pi \varnothing^2 / 4 = 0,071$ см², $\mu = (0,48 \dots 2,10) 10^{-2}$, пробойное напряжение $V = (5 \dots 6)$ кВ, толщина тестируемых покрытий 240...300 мкм и ток при условном пробое $I \geq 1$ мА, то из формулы (5) для ρ_a получаем интервал $(0,6 \dots 3,7) 10^5$ Ом·см. Этот результат согласуется с приведенными выше данными из [17, 18], что для чистой воды при низких напряжениях $\rho_a = 6,3 \cdot 10^7$ Ом·см, а в состоянии, близком к реальному пробое, $\rho_a = 7 \cdot 10^3$ Ом·см.

Как отмечено выше, что несмотря на повышенную по сравнению со спеченной керамикой проводимость получаемых покрытий, влияния состава взрывчатой смеси на удельное сопротивление, т. е. увеличения проводимости в результате возможного восстановления оксида алюминия в окружении продуктов детонации даже

самой богатой смеси ($k = \text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2 = 1$) в экспериментах не наблюдается.

Полученные данные позволяют также оценить поперечный размер проводящих микроканалов. Для этого рассмотрим упрощенную схему участка поверхности покрытия из mk квадратных фрагментов со стороной квадрата a (рис. 5).

Граница между такими элементарными фрагментами образует сетку из отрезков длиной a , количество которых, исключая края выбранного участка, выражается формулой $[k(m - 1) + m(k - 1)] = (2km - k - m)$. Тогда на квадратном участке покрытия ($k = m$) суммарная протяженность граничной сетки $L = 2k(k - 1)a$. При характерном размере элементарного фрагмента $a = 10$ мкм под используемый в экспериментах по измерению удельного сопротивления электрод диаметром 25 мм попадает более 10^6 таких фрагментов, что соответствует $k \sim 10^3$. Пренебрегая единицей по сравнению с k для протяженности сетки под измерительным электродом, получим оценку $L \approx 2k^2 a$. Поскольку на квадратном участке количество фрагментов $K = k^2$, то $L \approx 2aK$.

Полагая, что в образовании микроканалов участвует вся граница между фрагментами покрытия, получим, что на таком участке расположена сетка микроканалов с площадью поперечного сечения $L\delta = 2aK\delta$, где δ – поперечный размер канала. Сопоставляя удельную площадь

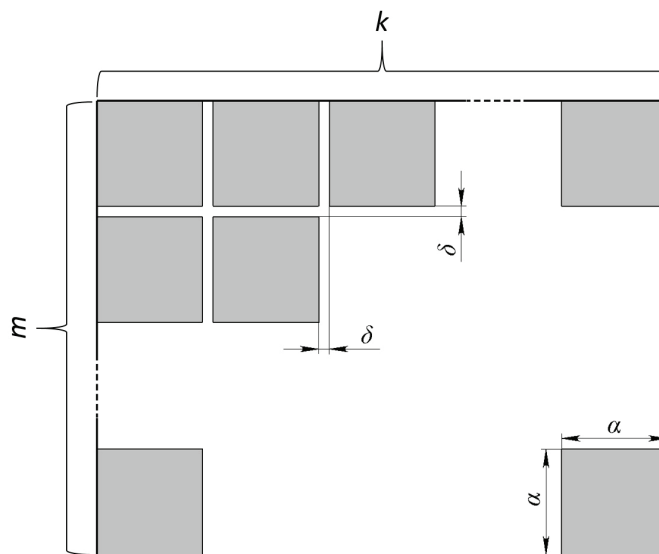


Рис. 5. Схема поверхности покрытия с сеткой микроканалов

Fig. 5. Scheme of the coating surface with a net of microchannels

микроканалов $2aK\delta/a^2K = 2\delta/a$ с величиной μ , для вычисления поперечного сечения «микроканала» получим формулу $\delta = \mu a/2$, по которой при подстановке указанных выше значений μ и a получаем для δ оценку 24...105 нм, что согласуется с предложенной гипотезой о наноразмерном масштабе токопроводящих микроканалов.

Предложенная модель, на наш взгляд, пригодна в первом приближении для описания проводимости покрытий, полученных не только методом ДН, но и другими газотермическими способами. Она может быть взята за основу при построении более глубокого описания проводимости керамических покрытий с дефектной структурой. Характерно, что фиксируемые экспериментально диэлектрические свойства покрытий зависят не только от технологических параметров их получения, но и от выдержки образцов на воздухе после их изготовления (эффект старения), и от применяемой методики измерения [19]. Возможно, что эффект старения обусловлен абсорбцией воды гигроскопичной фазой $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и связанным с этим изменением структуры и соответственно проводимости микроканалов. Отметим, что с гигроскопичностью $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ связано и применение этой керамики для изготовления водопроницаемых мембран [20]. На практике можно осуществлять модификацию свойств покрытий тем или иным способом, начиная с пропитки диэлектрическими жидкостями и кончая термообработкой. Например, в [21] показано, что выдержка свежизготовленных покрытий при 1100 °С приводит к обратному переходу оксида алюминия из γ - в α -фазу.

По нашему мнению, описанные эксперименты и предложенная модель электропроводности детонационных покрытий указывают на то, что в их структуре, кроме общеизвестных дефектов в виде пор и микротрещин, присутствуют также дефекты в виде сквозных микроканалов с поперечным размером в десятки нанометров.

Выводы

Проведенные исследования показали, что при детонационном напылении с использованием ацетиленокислородных детонирующих смесей удельное электрическое сопротивление и напряжение условного пробоя алюмооксидных покрытий не зависят от состава смеси в интерва-

ле отношений молярного содержания кислорода к топливу от 1 до 5. При практической реализации технологии целесообразно ограничиться достаточно широким интервалом соотношений $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$ вблизи стехиометрии от 2 до 4 с учетом оксидной природы напыляемого материала.

Для детонационных покрытий толщиной 240...300 микрон условный полный пробой (превышение с вероятностью 100 % тока утечки 1 мА) наступает при напряжении в диапазоне 5...6 кВ, что соответствует удельной электрической прочности 16,7...24,0 кВ/мм, т.е. в среднем около 20 кВ/мм.

Установлено, что при содержании в окружающей среде 2,5% водяных паров удельное объемное сопротивление детонационных покрытий составляет $(0,3...1,3)10^{10}$ Ом·см. Для объяснения влияния атмосферной влажности предложена гипотеза о наличии в покрытии наноразмерных дефектов – микроканалов, заполненных адсорбированной водой, и построена модель проводимости покрытий с учетом данных дефектов. В соответствии с предложенной гипотезой удельная площадь дефектов детонационных алюмооксидных покрытий составляет примерно 0,5...2,0 % поверхности покрытия, а поперечный размер проводящих микроканалов не превышает величину порядка 100 нм.

Список литературы

1. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. Thermal spray fundamentals: from powder to part. – New York: Springer Science+Business Media, 2014. – 1565 p. – ISBN 978-0-387-28319-7.
2. Deposition of dense ceramic coatings by detonation spraying / V.Yu. Ulianitsky, A.A. Shtertser, I.S. Batraev, I. Smurov // ITSC-2014 Proceedings. – Barcelona, Spain, 2014. – P. 349–352. – (DVS-Berichte; vol. 302). – ISBN 978-3-87155-574-9.
3. Nieme K., Vuoristo P., Mantyla T. Properties of alumina-based coatings deposited by plasma spray and detonation gun spray process // Journal of Thermal Spray Technology. – 1994. – Vol. 3, iss. 2. – P. 199–203. – doi: 10.1007/BF02646266.
4. Development of catalytic converters using detonation spraying / V. Ulianitsky, A. Shtertser, V. Sadykov, I. Smurov // Materials and Manufacturing Processes. – 2016. – Vol. 31, iss. 11. – P. 1433–1438. – doi: 10.1080/10426914.2016.1151041.
5. Edge effect on crack patterns in thermally sprayed ceramic splats / L. Chen, G.-J. Yang, C.-X. Li, C.-J. Li //

Journal of Thermal Spray Technology. – 2017. – Vol. 26, iss. 3. – P. 302–314. – doi: 10.1007/s11666-016-0505-6.

6. *Chen L., Yang G.-J.* Epitaxial growth and cracking mechanisms of thermally sprayed ceramic splats // Journal of Thermal Spray Technology. – 2018. – Vol. 27, iss. 3. – P. 255–268. – doi: 10.1007/s11666-018-0692-4.

7. Computer-controlled detonation spraying: from process fundamentals toward advanced applications / V. Ulianitsky, A. Shtertser, S. Zlobin, I. Smurov // Journal of Thermal Spray Technology. – 2011. – Vol. 20, iss. 4. – P. 791–801. – doi: 10.1007/s11666-011-9649-6.

8. *Pawlowski L.* The relationship between structure and dielectric properties in plasma-sprayed alumina coatings // Surface and Coatings Technology. – 1988. – Vol. 35, iss. 3–4. – P. 285–298. – doi: 10.1016/0257-8972(88)90042-4.

9. Effect of temperature and humidity on dielectric properties of thermally sprayed alumina coatings / M. Niittymäki, K. Lahti, T. Suhonen, J. Metsäjoki // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2018. – Vol. 25, iss. 3. – P. 908–918. – doi: 10.1109/TDEI.2018.006892.

10. Role of microstructure in dielectric properties of thermally sprayed ceramic coatings / M. Niittymäki, I. Rytöluoto, K. Lahti, J. Metsäjoki, T. Suhonen // Proceedings of the 1st International Conference on Dielectrics, ICD 2016. – Montpellier, France: IEEE, 2016. – P. 1102–1105. – doi: 10.1109/ICD.2016.7547811.

11. Comparative study of the electrical properties and characteristics of thermally sprayed alumina and spinel coatings / F.L. Toma, S. Scheitz, L.M. Berger, V. Sauchuk, M. Kusnezoff, S. Thiele // Journal of Thermal Spray Technology. – 2011. – Vol. 20, iss. 1–2. – P. 195–204. – doi: 10.1007/s11666-010-9580-2.

12. On the dielectric strengths of atmospheric plasma sprayed Al_2O_3 , Y_2O_3 , ZrO_2 – 7% Y_2O_3 and $(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$ coatings / J. Kotlan, R.C. Seshadri, S. Sampath, P. Ctibor, Z. Pala, R. Musalek // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41, no. 9. – P. 11169–11176. – doi: 10.1016/j.ceramint.2015.05.066.

13. *Neusel C., Jelitto H., Schneider G.A.* Electrical conduction mechanism in bulk ceramic insulators at high voltages until dielectric breakdown // Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 117. – P. 154902(1)–154902(8). – doi: 10.1063/1.4917208.

14. *Gerson R., Marshall T.C.* Dielectric breakdown of porous ceramics // Journal of Applied Physics. – 1959. – Vol. 30. – P. 1650–1653. – doi: 10.1063/1.1735030.

15. *Nikolaev Yu.A., Topchiyan V.E.* Analysis of equilibrium flows in detonation waves in gases // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 1977. – Vol. 13, iss. 3. – P. 327–338. – doi: 10.1007/BF00740309.

16. Aluminum oxide, Al_2O_3 ceramic properties [Electronic resource] // Accuratus Corporation: website. – URL: <https://www accuratus.com/alumox.html> (accessed: 14.11.2018).

17. *Сколунов А.В.* Геометрия воды и льда. – М.: Компания Спутник+, 2013. – 312 с. – ISBN 978-5-9973-2685-2.

18. *Балыгин И.Е.* Электрическая прочность жидких диэлектриков. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 227 с.

19. Dielectric breakdown strength of thermally sprayed ceramic coatings: effects of different test arrangements / M. Niittymäki, K. Lahti, T. Suhonen, J. Metsäjoki // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24, iss. 3. – P. 542–551. – doi: 10.1007/s11666-014-0211-1.

20. A novel $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanofiltration membrane via introducing hollow microspheres into interlayers for improving water permeability / W. Fu, X. Zhang, Y. Mao, T. Pei, B. Sun, S. Mei, L. Chen // Ceramics International. – 2018. – Vol. 44, iss. 13. – P. 15824–15832. – doi: 10.1016/j.ceramint.2018.05.261.

21. Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed alumina-based coatings / G.Di Girolamo, A. Brentari, C. Blasi, E. Serra // Ceramics International. – 2014. – Vol. 40, iss. 8, part B. – P. 12861–12867. – doi: 10.1016/j.ceramint.2014.04.143.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Electrical Insulation Properties of Aluminum Oxide Detonation Coatings

Vladimir Ulianitsky^a, Alexandr Shtertser^{b,*}, Igor Batraev^c

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

^a <http://orcid.org/0000-0002-3538-1486>, ulianv@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0003-4973-0437>, asterzer@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-0364-144X>, ibatraev@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 01 September 2018

Revised: 13 September 2018

Accepted: 22 October 2018

Available online: 15 December 2018

Keywords:

Detonation spraying
 Electro-insulating coating
 Specific resistivity
 Dielectric strength

Funding

The reported research was partially funded by Russian Foundation for Basic Research and the government of the region of the Russian Federation, grant № 18-43-540008.

ABSTRACT

Introduction. There are different thermal spray techniques used for formation of electrically insulated oxide ceramic coatings: flame spraying, plasma spraying, HVOF, detonation spraying, etc. The nature of electrical conductivity of thermal spray coatings, including those made by detonation spraying, as well as the impact of composition of the used detonating mixture, are important and not yet fully understood questions. It is found experimentally, that electric conductivity of alumina coating depends not only on the spraying mode and coating structure, but on the humidity and temperature of surrounding atmosphere as well. However, there is no physical model describing a mechanism of coating electrical conduction with regard to the said factors; thus, there is a topical problem of theoretical explanation of experimental data. **The purpose of the work** is to investigate the electrical insulation properties of alumina coatings made by detonation spraying, to study an impact of detonating mixture composition on coating electrical conduction, and to build a physical model enabling a quantitative estimation of specific volume resistivity of coating. Detonation coatings made using the CCDS2000 detonation device from the M40 Super corundum powder **are investigated**, it is produced using acetylene-oxygen mixtures with different content of components. **The methods of investigation.** Research techniques included measurements of coating porosity, specific volume resistivity and dielectric strength. The obtained data is used for the development of the model, describing the conductivity of detonation coating considering defects of structure. **Results and discussion.** The difference in properties of the coatings formed in a wide range of oxygen-to-fuel molar ratios (from 1.0 to 5.0) is not observed. The hypothesis is suggested, that electrical conduction of coatings is due to the presence of defects – microchannels filled with adsorbed water. Specific resistivity of coatings is $(0.3-1.3) \cdot 10^{10}$ Ohm·cm, conditional dielectric strength is 5-6 kV for the coating thickness of 240-300 mcm. Here we call the dielectric strength a conditional one, because the samples are not brought to the breakdown in the usual sense, when the values of breakdown current are greater than hundreds of milliamperes, and even dozens of amperes. It is considered that there is a breakdown, when a current passing through the probe is greater than 1 mA, this current is already perceptible for a human. Based on the experimental data and on the suggested hypothesis the model is proposed, according to which there are defects in a coating volume in a form of through microchannels, the area of which covers 0.5-2% of coating surface, and its transverse size is of 24-105 mcm. Microchannels are filled with water, which is adsorbed from atmosphere and the main current passes through these microchannels when voltage is applied. Specific resistivity of water at conditional breakdown has a value of the order of 10^5 Ohm·cm. Scientific importance of the obtained results lies in explaining the reasons of lower resistance of thermally sprayed coatings compared to the sintered non-porous aluminum oxide ceramics (more than 10^{14} Ohm·cm). Practical significance of the obtained results lies in the possibility to use acetylene-oxygen mixtures with different combination of components without compromising the quality of electrically insulated coatings.

For citation: Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A., Batraev I.S. Electrical insulation properties of aluminum oxide detonation coatings. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 83–95. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-83-95. (In Russian).

References

1. Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. *Thermal spray fundamentals: from powder to part*. New York, Springer Science+Business Media, 2014. 1565 p. ISBN 978-0-387-28319-7.

* Corresponding author

Shtertser Alexandr A., D.Sc. (Physics and Mathematics),
 Associate Professor, Leading researcher
 Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS,
 15 Ac. Lavrentieva ave.,
 630090, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (383) 333-00-03, e-mail: asterzer@mail.ru

2. Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A., Batraev I.S., Smurov I. Deposition of dense ceramic coatings by detonation spraying. *ITSC-2014 Proceedings*, Barcelona, Spain, 2014. *DVS-Berichte*, vol. 302, pp. 349–352. ISBN 978-3-87155-574-9.
3. Nieme K., Vuoristo P., Mantyla T. Properties of alumina-based coatings deposited by plasma spray and detonation gun spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1994, vol. 3, iss. 2, pp. 199–203. doi: 10.1007/BF02646266.
4. Ulianitsky V., Shtertser A., Sadykov V., Smurov I. Development of catalytic converters using detonation spraying. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, vol. 31, iss. 11, pp. 1433–1438. doi: 10.1080/10426914.2016.1151041.
5. Chen L., Yang G.-J., Li C.-X., Li C.-J. Edge effect on crack patterns in thermally sprayed ceramic splats. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, vol. 26, iss. 3, pp. 302–314. doi: 10.1007/s11666-016-0505-6.
6. Chen L., Yang G.-J. Epitaxial growth and cracking mechanisms of thermally sprayed ceramic splats. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, vol. 27, iss. 3, pp. 255–268. doi: 10.1007/s11666-018-0692-4.
7. Ulianitsky V., Shtertser A., Zlobin S., Smurov I. Computer-controlled detonation spraying: from process fundamentals toward advanced applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, iss. 4, pp. 791–801. doi: 10.1007/s11666-011-9649-6.
8. Pawlowski L. The relationship between structure and dielectric properties in plasma-sprayed alumina coatings. *Surface and Coatings Technology*, 1988, vol. 35, iss. 3–4, pp. 285–298. doi: 10.1016/0257-8972(88)90042-4.
9. Niittymäki M., Lahti K., Suhonen T., Metsäjoki J. Effect of temperature and humidity on dielectric properties of thermally sprayed alumina coatings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, vol. 25, iss. 3, pp. 908–918. doi: 10.1109/TDEI.2018.006892.
10. Niittymäki M., Rytöluoto I., Lahti K., Metsäjoki J., Suhonen T. Role of microstructure in dielectric properties of thermally sprayed ceramic coatings. *Proceedings of the 1st International Conference on Dielectrics, ICD 2016*, Montpellier, France, 2016, pp. 1102–1105. doi: 10.1109/ICD.2016.7547811.
11. Toma F.L., Scheitz S., Berger L.M., Sauchuk V., Kusnezoff M., Thiele S. Comparative study of the electrical properties and characteristics of thermally sprayed alumina and spinel coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, iss. 1–2, pp. 195–204. doi: 10.1007/s11666-010-9580-2.
12. Kotlan J., Seshadri R.C., Sampath S., Ctibor P., Pala Z., Musalek R. On the dielectric strengths of atmospheric plasma sprayed Al_2O_3 , Y_2O_3 , $\text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ and $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ coatings. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, no. 9, pp. 11169–11176. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.05.066.
13. Neusel C., Jelitto H., Schneider G.A. Electrical conduction mechanism in bulk ceramic insulators at high voltages until dielectric breakdown. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, pp. 154902(1)–154902(8). doi: 10.1063/1.4917208.
14. Gerson R., Marshall T.C. Dielectric breakdown of porous ceramics. *Journal of Applied Physics*, 1959, vol. 30, pp. 1650–1653. doi: 10.1063/1.1735030.
15. Nikolaev Yu.A., Topchiyan V.E. Analysis of equilibrium flows in detonation waves in gases. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1977, vol. 13, iss. 3, pp. 327–338. doi: 10.1007/BF00740309.
16. Aluminum Oxide, Al_2O_3 Ceramic Properties. *Accuratus Corporation*: website. Available at: <https://www accuratus.com/alumox.html> (accessed 14.11.2018).
17. Skolunov A.V. *Geometriya vody i l'da* [Geometry of water and ice]. Moscow, Sputnik+ Company Publ., 2013. 312 p. ISBN 978-5-9973-2685-2.
18. Balygin I.E. *Elektricheskaya prochnost' zhidkikh dielektrikov* [Electric strength of liquid dielectrics]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1964. 227 p.
19. Niittymäki M., Lahti K., Suhonen T., Metsajoki J. Dielectric breakdown strength of thermally sprayed ceramic coatings: effects of different test arrangements. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, vol. 24, iss. 3, pp. 542–551. doi: 10.1007/s11666-014-0211-1.
20. Fu W., Zhang X., Mao Y., Pei T., Sun B., Mei S., Chen L. A novel $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanofiltration membrane via introducing hollow microspheres into interlayers for improving water permeability. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, iss. 13, pp. 15824–15832. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.05.261.
21. Girolamo G. Di, Brentari A., Blasi C., Serra E. Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed alumina-based coatings. *Ceramics International*, 2014, vol. 40, iss. 8, part B, pp. 12861–12867. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.04.143.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.