

УДК 621.793

Ю.А. СЫСОЕВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА ПУСКОВОГО ИНЖЕКТОРА ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ

Приведены результаты исследований по формированию проводящей пленки в разрядном промежутке пускового инжектора в процессе работы вакуумно-дугового источника плазмы. Пленка осаждалась на торцевую поверхность трубки из керамики, применяемой для заполнения разрядного промежутка пусковых инжекторов. Эксперименты выполнялись в условиях реального технологического процесса нанесения защитно-декоративных покрытий в источниках плазмы с магнитным удержанием катодного пятна и катодами из хрома и титана. Установлено влияние материала катода и условий осаждения покрытий на структуру и свойства пленок, получаемых на керамике состава $Al_2O_3-SiO_2-BaO_2$. Определена скорость роста пленок, которая варьируется в диапазоне 1,1 ... 3,3 нм/с.

Ключевые слова: пусковой инжектор, пробой по поверхности керамики, электрический взрыв пленки, система поджига, вакуумно-дуговой источник плазмы.

Введение

Пробой по поверхности твердого диэлектрика является одним из наиболее эффективных методов создания пусковой плазмы, обеспечивающей иницирование вакуумно-дугового разряда в различных плазменных устройствах [1, 2]. Наличие в пусковом разрядном промежутке диэлектрика, в качестве которого обычно используют различные сорта керамики, позволяет существенно снизить напряжение его пробоя по сравнению с вакуумным пробоем того же промежутка [3]. Механизм поверхностного пробоя диэлектриков в вакууме достаточно детально рассмотрен в работах [3 – 5].

Особенностью работы пусковых инжекторов вакуумно-дуговых источников плазмы со стационарной дугой является формирование в разрядном промежутке инжектора проводящей пленки из продуктов эрозии материала катода. Существование такой пленки меняет физические процессы образования пусковой плазмы, которая в этом случае возникает за счет электрического взрыва проводящей пленки. Параметры импульса поджига, обеспечивающие генерирование инжектором форплазмы с характеристиками, необходимыми для надежного запуска дуги, в этом режиме отличаются от случая пробоя по поверхности диэлектрика.

При работе источников плазмы с частыми погасаниями вакуумно-дугового разряда (режим ионной очистки, использование катодов из тугоплавких материалов и др.), проводящая пленка между срабатываниями пускового инжектора восстановиться не успевает. В этом случае для пробоя разрядного промежутка инжектора необходимо применение пуско-

вых импульсов повышенной амплитуды. В работе [6] предложено для надежного срабатывания пускового инжектора при отсутствии проводящей пленки использовать пусковые импульсы с высоковольтным всплеском вначале. Такое решение, по замыслу авторов, должно обеспечивать стабильное срабатывание инжектора, как при наличии, так и при отсутствии проводящей пленки. Однако, как показали исследования, выполненные в [7], не во всех случаях это обеспечивается.

Поскольку пленка в разрядном промежутке пусковых инжекторов вакуумно-дуговых источников плазмы играет существенную роль при возбуждении дугового разряда, представляет интерес изучение процесса ее формирования. Полученные в результате исследований данные о скорости роста пленки, ее сопротивлении и др. могли бы ответить на вопросы о длительности горения вакуумно-дугового разряда, при которой происходит восстановление пленки после срабатывания инжектора, об оптимальных параметрах импульсов поджига и ряд других.

Несмотря на то, что с момента первых работ по использованию пусковых инжекторов для бесконтактного запуска технологических вакуумно-дуговых источников плазмы [8, 9] прошло достаточное количество времени, вопрос формирования проводящей пленки в разрядном промежутке пускового инжектора еще не изучен.

В известной степени восполнить этот пробел призвана настоящая работа, целью которой является изучение особенностей формирования проводящей пленки на поверхности керамики, используемой для заполнения разрядного промежутка пускового инжектора, и исследование ее характеристик.

2. Методика экспериментов

Исследования по формированию проводящей пленки на поверхности керамики в разрядном промежутке инициирующего устройства с целью определения особенностей ее структуры, скорости роста и электрических характеристик были выполнены в условиях реального технологического процесса нанесения защитно-декоративных покрытий. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1.

Источники плазмы А и Б являлись штатными источниками установки «Булат-6», в которых были выполнены следующие изменения. Узел поджига (пусковой инжектор) располагался на поверхности вспомогательного анода, обращенной к вакуумной камере, диаметры катодов равнялись 80 мм. Разрядный промежуток узла поджига, образованный поджигающим электродом и вспомогательным анодом (позиции 6, 11 и 7, 12 в источниках А и Б соответственно), был заполнен керамикой – керамической трубкой от сопротивления МЛТ-2, в которой резистивный слой на торцах трубки был снят. В качестве образцов, на торцах которых осаждалась пленка, использовались керамические втулки 2 и 8, такие же, как и в узлах поджига (4 и 10) источников плазмы. Образцы скобами 1 и 5 крепились к вспомогательным анодам.

Режим обработки изделий В (пластины из нержавеющей стали), определяющий процесс формирования пленок на керамических образцах, состоял из нескольких этапов. После ионной очистки сначала

ла источником А (катод – хром марки Х99 ГОСТ 5905-2004), затем источником Б (катод – титан марки ВТ1-0 ГОСТ 19807-91), на изделия В наносилась пленка хрома при давлении остаточных газов в камере 10^{-3} Па. Затем источник А отключался, включался источник Б и в атмосфере азота ($p = 10^{-1}$ Па) на изделиях В формировалось покрытие на основе нитрида титана. Ток дуги обоих источников плазмы был равен 100 А. Время работы источников определялось требованиями процесса осаждения покрытий на изделиях В и составляло 10 минут для источника А и 20 минут – для источника Б. После проведения процесса керамические трубки 2 и 8 демонтировались и их торцевые поверхности исследовались с помощью электронного микроскопа РЭМ-106.

Измерение сопротивления производилось на разработанном стенде, обеспечивающим возможность перемещения подпружиненного щупа цифрового мультиметра УТ-70D с точностью 0,01 мм. Мультиметр был подсоединен к компьютеру и обеспечивал измерение сопротивления с разрешением 0,01 Ома и точностью $\pm 0,3\%$.

Предварительно, поскольку изоляционное основание для резистора МЛТ может быть выполнено из различных материалов [10, 11], были определены элементный состав образцов и структура их поверхности. Данные исследования (результаты представлены на рис. 2 и 3) выполнялись с помощью электронного растрового микроскопа РЭМ-106 с системой энергодисперсного микроанализа.

Приведенные на рис. 2 данные показывают, что

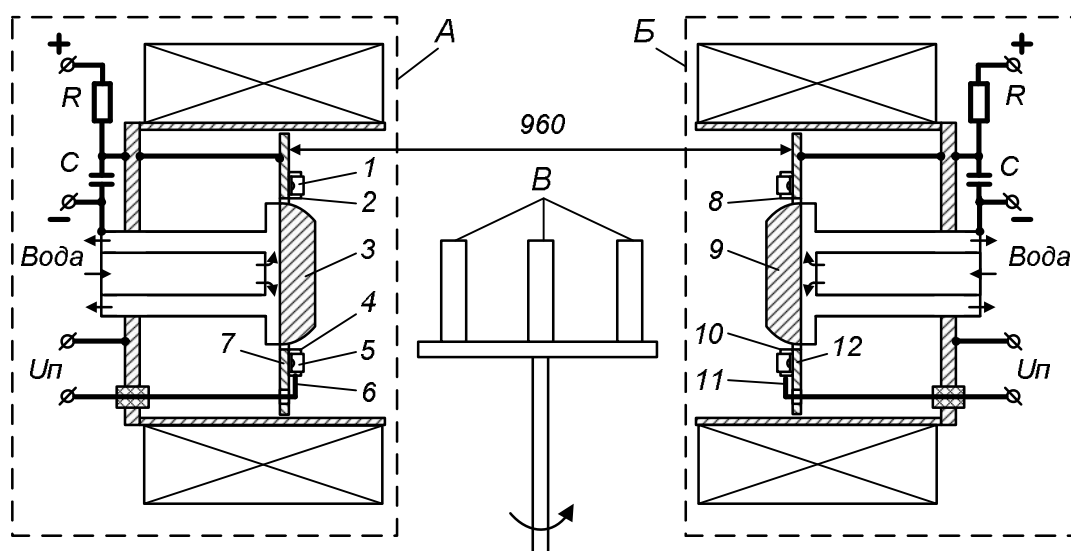


Рис. 1. Схема расположения керамических образцов в источниках плазмы при исследованиях образования пленки на поверхности керамики: А, Б – источники плазмы; В – обрабатываемые изделия; 1, 5 – скобы для крепления керамических втулок; 2, 4, 8, 10 – керамические втулки; 3 – катод из хрома; 9 – катод из титана; 6, 11 – поджигающие электроды; 7, 12 – дополнительные электроды (вспомогательные аноды)

керамические образцы изготовлены из цельзиановой керамики состава $Al_2O_3-SiO_2-BaO_2$ [12], содержащей достаточно много пор различных размеров (рис. 3).

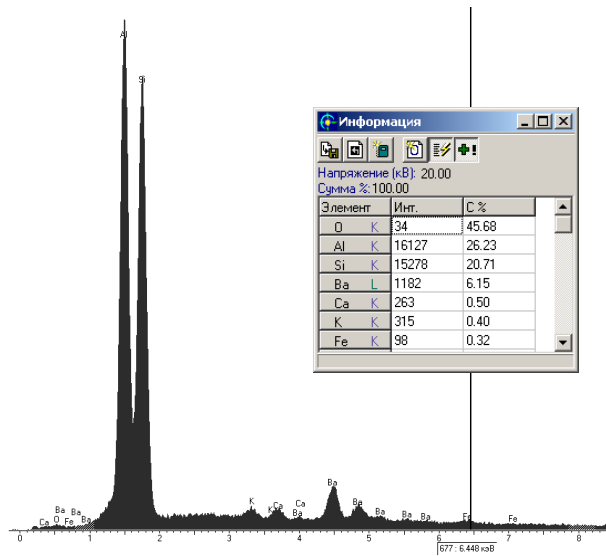


Рис. 2. Элементный состав керамических образцов

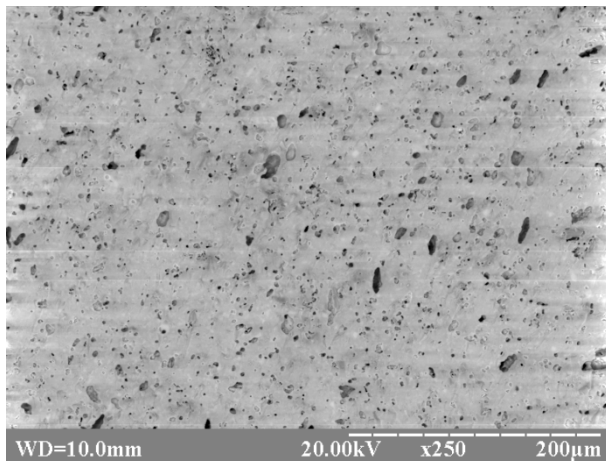


Рис. 3. Морфология поверхности керамических образцов

3. Результаты и обсуждение

Морфология пленки на поверхности торца керамической втулки, обращенного к катоду из хрома (источник А), представлена на рис. 4.

Покрытие на основе хрома неоднородно, имеются области сплошного покрытия с зеркальным блеском, расположенные ближе к центральной части керамической трубки.

На рис. 4 виден фрагмент такой области, расположенный вверху снимка.

В составе пленки много микрокапель, которые имеют в подавляющем большинстве сферическую форму и размеры порядка 1 мкм и менее. Элементный анализ микрокапель на хромовом покрытии

показывает, что микрокапли примерно поровну разделены на микрокапли из хрома и микрокапли из титана. Для примера на рис. 5 в группе из трех капель в центре снимка средняя состоит из хрома, большая и маленькая из титана.

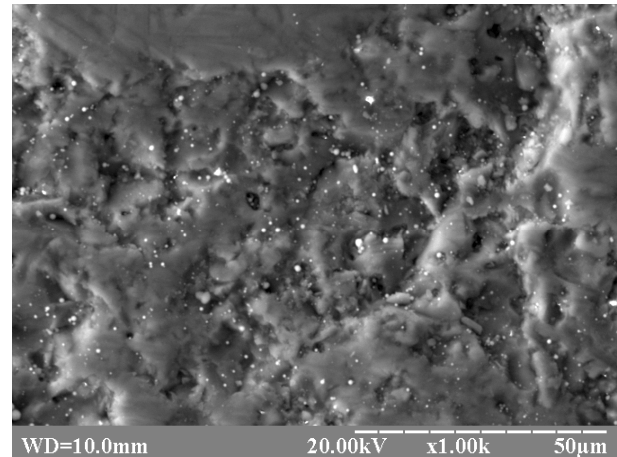


Рис. 4. Пленка на керамике, полученная в источнике с катодом из хрома

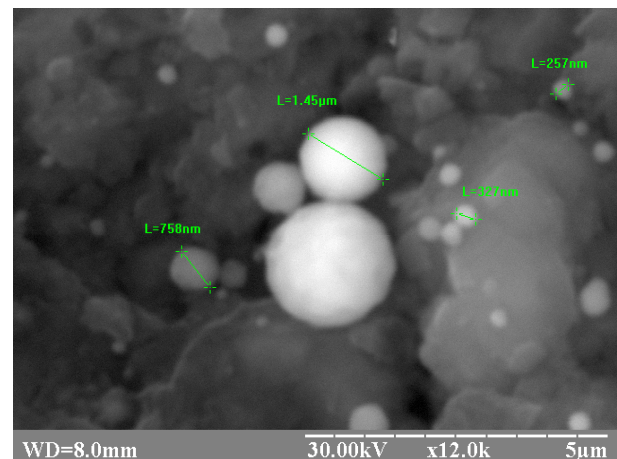


Рис. 5. Форма капель на поверхности пленки на основе хрома

Значительное количество микрокапель титана на поверхности пленки, формирующейся вблизи хромового катода, объясняется тем, что на последнем этапе технологического процесса работал только источник Б (катод – титан). Интересно отметить, что на пленке на противоположном торце керамической втулки микрокапель титана не обнаружено. Это может свидетельствовать о том, микрокапли, преодолев расстояние около одного метра, попадают на поверхность торца керамической трубки, расположенной вблизи катода, отразившись от боковой поверхности хромового катода.

Толщина пленки на основе хрома, замеренная на изломе керамики, в области сплошного покрытия ~ 2 мкм и менее, в остальной области порядка 1 мкм

(рис. 6), что соответствует скорости роста пленки, лежащей в диапазоне 1,7 ... 3,3 нм/с.

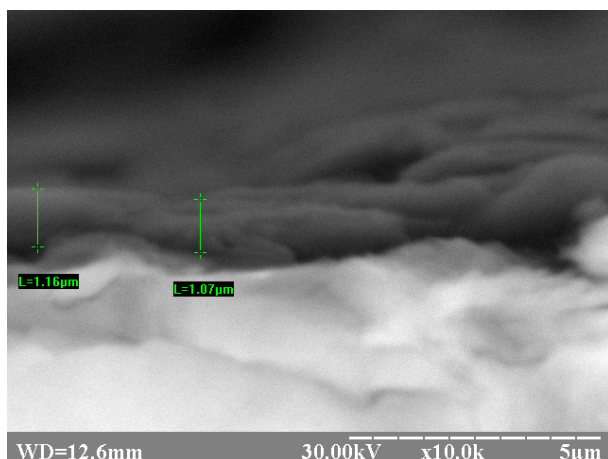


Рис. 6. Излом керамики с хромовым покрытием

Иная структура пленки, на поверхности образца, торцом обращенного к катоду из титана (источник Б), представлена на рис. 7. Покрытие в этом случае визуально сплошное матовое, местами с небольшим желтоватым оттенком. Оно является более неоднородным, с большим содержанием капельной фракции. Местами выделяются небольшие участки керамики, покрытые только тонким слоем титана.



Рис. 7. Пленка на керамике, полученная в источнике с катодом из титана

В отличие от хромового покрытия, на титановом покрытии много более крупных микрокапель, состоящих из титана и имеющих размеры 5 и более мкм и вытянутую форму. Микрокапли из хрома на титановом покрытии в чистом виде не встречаются. Из более ста измерений зафиксирована единичная зона с содержанием хрома на уровне 62%. Очевидно, это связано с тем, что микрокапли из хрома лежат под слоем титана. Это подтверждает и тот факт,

что следы хрома на уровне до нескольких процентов в покрытии фиксируются.

Толщина покрытия на этом образце, замеренная на изломе керамики (рис. 8), варьируется в пределах 1,3 ... 1,9 мкм, что соответствует скорости роста пленки, лежащей в диапазоне 1,1 ... 1,6 нм/с.

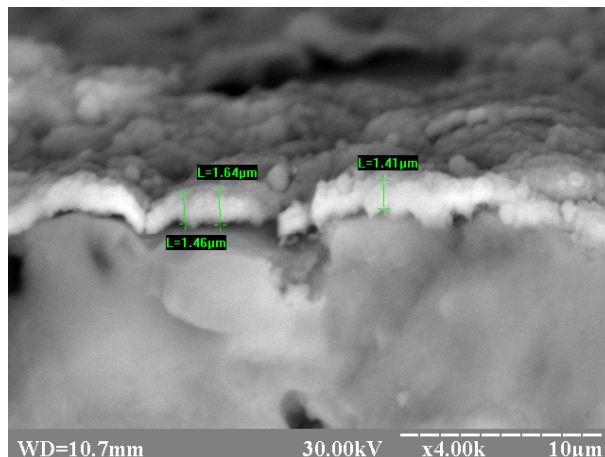


Рис. 8. Излом керамики с титановым покрытием

При близких значениях коэффициента электропереноса хрома и титана [13], наблюдается меньшая (порядка двух раз) скорость роста пленки на образце, установленном в источнике Б по сравнению с образцом в источнике А. По всей вероятности, причиной этого является то, что формирование пленки на образце, установленном в источнике Б происходит в основном при высоком давлении ($p = 10^{-1}$ Па), в то время как на образце в источнике А в основном при низком ($p = 10^{-3}$ Па).

Известно, что переход к сплошной пленке при ее осаждении начинается с толщин более 10 нм [14]. Для получения сплошной пленки в разрядном промежутке пускового инжектора при скоростях ее роста 1...3 нм/с, необходимо время между срабатываниями инжектора порядка 10 с. Однако на практике наблюдается устойчивая работа системы поджига при меньших временах формирования пленки (до нескольких сотен микросекунд). За это время на поверхности керамики инжектора успевает сформироваться только островковая структура. Пробой в этом случае происходит, по всей вероятности, за счет перераспределения напряжения импульса поджига между «островками» пленки и, возникшая в наиболее благоприятном месте, распространяется по разрядному промежутку инжектора.

Сопротивление пленок по радиусу керамической трубки (приблизительно по такому пути идет пробой разрядного промежутка пускового инжектора) для покрытий на основе хрома и титана приведено на рис. 9.

Пунктиром на графиках показано сопротивление проводника сечением 1 км^2 . Полученные значения для пленок на основе хрома удовлетворительно согласуются с данными для сопротивлений пленок микронной толщины [10].

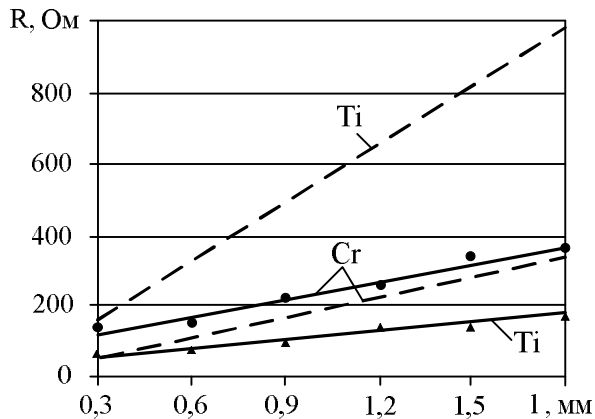


Рис. 9. Сопротивление пленок на основе хрома и на основе титана

Более низкое сопротивление пленки на основе титана по сравнению со сплошным титаном, очевидно, связано с наличием в покрытии хрома разных фракций, который имеет меньшее удельное сопротивление по сравнению с титаном.

При исследовании торцевой поверхности керамических образцов, расположенной вдали от катода (вне зоны прямой видимости с рабочей поверхности катода), были обнаружены микрокапли, состоящие из материала того катода, где был закреплен образец. Микрокапель из материала противоположного катода не наблюдалось.

На рис. 10 показана торцевая поверхность образца, размещенная в источнике плазмы А (рис. 1) вдали от катода, с микрокаплями из хрома.

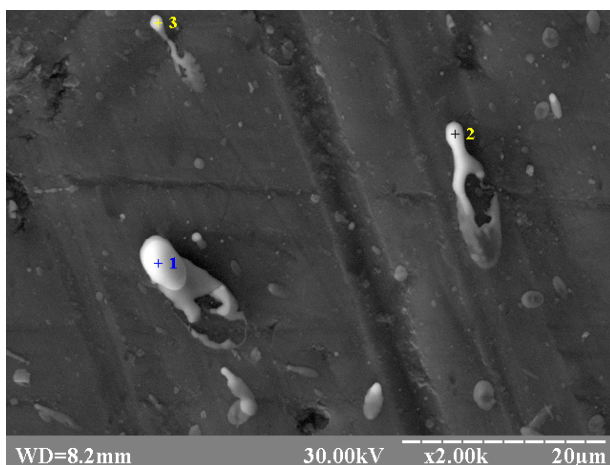


Рис. 10. Микрокапли на торце керамического образца, расположенного вдали от хромового катода: 1, 2, 3 — точки микроанализа

Вытянутая форма микрокапель свидетельствует о том, что они движутся под небольшим углом к поверхности осаждения и находятся в жидком состоянии.

Возможной причиной попадания капель на поверхность, находящуюся вне зоны прямой видимости с рабочей поверхности катода, где они возникают, может быть их взаимодействие с ионами, которые за счет создаваемого давления изменяют траекторию движения капель.

Выводы

В результате исследований формирования проводящей пленки на поверхности керамики, используемой для заполнения разрядного промежутка пусковых инжекторов вакуумно-дуговых источников плазмы, установлено следующее.

1. Рост пленки в разрядном промежутке пускового инжектора происходит со скоростью несколько нанометров в секунду. Получены значения скорости формирования пленки на образце вблизи хромового катода — $1,7 \dots 3,3 \text{ нм/с}$, на образце вблизи титанового катода — $1,1 \dots 1,6 \text{ нм/с}$. Разница в скоростях роста пленок, по всей вероятности, связана с формированием пленок при различных давлениях в камере, причем меньшему давлению соответствует большая скорость роста.

2. Сопротивление пленок, состоящих в основном из одного материала, примерно соответствуют сопротивлению пленок микронной толщины этого материала. При работе нескольких источников плазмы с катодами из разных материалов сопротивление пленок определяется соотношением фракций с разным удельным сопротивлением.

3. Покрытия, образующиеся на поверхности керамики пускового инжектора, содержат большое количество микрокапель из материалов катодов. Такая структура пленки, очевидно, будет определять особенности электрического взрыва проводящей пленки при срабатывании пускового инжектора.

Литература

1. Аксенов, И.И. Формирование потоков металлической плазмы: Обзор [Текст] / И.И. Аксенов, В.Г. Падалка, В.М. Хороших. — М.: ЦНИИатоминформ, 1984. — 83 с.
2. Гринвуд, А. Применение вакуумной дуги [Текст] / А. Гринвуд // Вакуумные дуги / под ред. Дж. Лафферти. — М.: Мир, 1982. — С. 385 — 426.
3. Авдеенко, А.А. Поверхностный пробой твердых диэлектриков в вакууме. II. Механизм поверхностного пробоя [Текст] / А.А. Авдеенко // ЖТФ. — 1977. — Т. 47, вып. 8. — С. 1708 — 1711.

4. Бугаев, С.П. Импульсный разряд по диэлектрику в вакууме [Текст] / С.П. Бугаев, Г.А. Месяц // Импульсный разряд в диэлектриках. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 4 – 42.

5. Месяц, Г.А. Импульсная энергетика и электроника [Текст] / Г.А. Месяц. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

6. Пусковое устройство вакуумного электродугового плазменного ускорителя [Текст] / И.И. Аксенов и др. // Источники и ускорители плазмы. – Х.: ХАИ, 1981. – С. 50 – 55.

7. Сысоев, Ю.А. К вопросу повышения надежности запуска вакуумно-дуговых технологических источников плазмы [Текст] / Ю.А. Сысоев // Вопросы проектирования и производства деталей конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(54). – Х., 2008. – С. 163 – 172.

8. Аксенов, И.И. Возбуждение вакуумной дуги в источниках металлической плазмы [Текст] / И.И. Аксенов, В.А. Белоус // ТВТ. – 1978. – Т.17, Вып.1. – С. 1 – 4.

9. А.с. 550943 СССР, МКИ H01 B7/00. Способ зажигания вакуумной дуги [Текст] / И.И. Аксенов и др. – № 2166629/25; заявл. 18.08.75; опубл. 25.08.78, Бюл. № 31. – 3 с.

10. Мартюшов, К.И. Технология производства резисторов [Текст] / К.И. Мартюшов, Ю.В. Зайцев. – М.: Высш. шк., 1972. – 312 с.

11. Бочкарев, Б.А. Керметные пленки [Текст] / Б.А. Бочкарев, В.А. Бочкарева. – Л.: Энергия, 1975. – 152 с.

12. Балкевич, В.Л. Техническая керамика [Текст] / В.Л. Балкевич. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.

13. Хороших, В.М. Эрозия катода и расход массы катодного материала в стационарной дуге низкого давления [Текст] / В.М. Хороших // ФИП ФИП PSE, 2004. – Т. 2, № 4. – С. 184 – 199.

14. Быков, Ю.А. О некоторых особенностях структуры и свойств металлических «тонких» пленок [Текст] / Ю.А. Быков, С.Д. Карпунин, Е.И. Газукина // МиТОМ. – 2000. – № 6. – С. 45 – 47.

Поступила в редакцию 05.04.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технология самолетостроения С.И. Планковский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ФОРМУВАННЯ ПРОВІДНОЇ ПЛІВКИ НА ПОВЕРХНІ ДІЕЛЕКТРИКА ПУСКОВОГО ІНЖЕКТОРА ДЖЕРЕЛА ПЛАЗМИ

Ю.О. Сисоєв

Наведено результати досліджень щодо формування провідникової плівки в розрядному проміжку пускового інжектора в процесі роботи вакуумно-дугового джерела плазми. Плівка осаджувалася на торцеву поверхню трубки з кераміки, яка застосовується для заповнення розрядного проміжку пускових інжекторів. Експерименти виконувалися в умовах реального технологічного процесу нанесення захисно-декоративних покриттів в джерелах плазми з магнітним утриманням катодної плями і катодами з хрому і титану. Встановлено вплив матеріалу катода і умов осадження покриттів на структуру і властивості плівок, одержуваних на кераміці складу $Al_2O_3-SiO_2-BaO_2$. Визначено швидкість росту плівок, яка варіюється в діапазоні 1,1 ... 3,3 нм/с.

Ключові слова: пусковий інжектор, пробій по поверхні кераміки, електричний вибух плівки, система підпалу, джерело плазми на основі вакуумно-дугового розряду.

CONDUCTING FILM GENERATION ON THE NON-CONDUCTOR SURFACE OF STARTING INJECTOR OF PLASMA SOURCES

Ju.A. Sysoiev

The results of researches on formation the conductive film on discharge gap of injector of triggering of plasma sources on base of vacuum arc are shown. The film was deposited on the end face of the tube made of ceramic, used for filling of the discharge gap of injector of triggering. The experiments were performed in the condition of real technological process of protective and decorative coating in the plasma source with magnetic confinement of the cathode spot and with the chromium and titanium cathodes. The influence of the cathode material and the conditions of deposition of coatings on the structure and properties of films obtained on ceramics of $Al_2O_3-SiO_2-BaO_2$ defined. A film growth rate, which varies in the range 1.1 ... 3.3 nm/sec, was defined.

Key words: injector of triggering, the breakdown on the surface of the ceramic, electric explosion film, ignition system, plasma sources on base of vacuum arc.

Сысоев Юрий Александрович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., докторант, доцент кафедры теоретической механики, машиноведения и работомеханических систем Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: JuriiS@ukr.net.