

металлические вкрапления, оказались окрашенными в различные цвета в зависимости от химического состава вкрапления.

Ключевые слова: плазменное покрытие, оксид алюминия, импульсная плазма, оптимизация процесса, структура покрытия, фазовый состав, баллистическая стойкость

Для цитирования: Формирование и исследование многослойных композиционных плазменных оксидных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 357–364

Formation and Research of Multi-Layer Composite Plasma Oxide Coatings Based on Elements of Screen Meteoroid Protection

V. A. Okovity¹, F. I. Panteleenko¹, O. G. Devoino¹, V. V. Okovity¹, V. M. Astashinsky², P. P. Hramtsov², M. Yu. Chernik², V. V. Uglov³, S. B. Sobolevsky⁴

¹Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

³Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),

⁴Republican Unitary Enterprise, Belarusian Research Institute of Transport “Transtekhnika” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents results of research for influence of plasma jet parameters (current, spraying distance, plasma-supporting nitrogen gas consumption), fractional composition of an initial powder and cooling degree by compressed air on characteristics of anti-meteorite coatings, subsequent processing modes by pulsed plasma. Properties of the obtained coatings and results of ballistic tests have been given in the paper. The proposed methodology has been based on complex metallographic, X-ray diffraction and electron microscopic investigations of anti-meteorite aluminum oxide coating. Optimization of air plasma spraying parameters for NiAl and Al₂O₃ materials has been carried out in the paper. The spraying parameters optimization has been executed on the basis of obtaining maximum materials utilization factor. Surface treatment of model screen elements with a double-layer composite coating (adhesive metal NiAl layer and hard ceramic oxide Al₂O₃ layer) has been fulfilled while using compression plasma stream. Nitrogen has been used as working gas. Composite hard ceramic oxide Al₂O₃ coating is represented by porous structure consisting of 10–15 μm-size fused Al₂O₃ particles. Metallic inclusions formed due to erosion of plasmatron electrodes have been observed in the space between the particles. Surface of bilayer composite coatings has been processed by a compression plasma stream and due to nonsteady processes of melting and recrystallization high strength polycrystalline layer has been formed on their surface. In this context, those areas of the polycrystalline layer which had metal inclusions have appeared to be painted in various colors depending on chemical composition of the inclusions.

Keywords: plasma coating, aluminum oxide, pulsed plasma, process optimization, coating structure, phase composition, ballistic resistance

For citation: Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. (2016) Formation and Research of Multi-Layer Composite Plasma Oxide Coatings Based on Elements of Screen Meteoroid Protection. *Science & Technique*. 15 (5), 357–364 (in Russian)

Введение

Эффективность защиты объектов от повреждений при высокоэнергетическом воздействии определяется противоударной стойкостью используемых материалов. Применительно к противометеорной защите космических аппаратов высокопрочные гомогенные и гетерогенные металлы и сплавы, металлокомпози́ты, пористо-волокнистые и другие материалы должны удовлетворять основным требованиям (минимальная плотность, высокие вязкопластичные свойства, твердость) [1–5].

Из общих физических характеристик следует, что эффективность защиты определяется уровнем поглощения кинетической энергии метеорных частиц материалом покрытия.

Не касаясь всех механизмов поглощения энергии, отметим, что значительная ее часть расходуется на упругую и пластическую деформацию материала покрытий. Высокие пластичность и вязкость являются существенным фактором увеличения стойкости. Повышение твердости резко снижает пластичность и вязкость, приводит к хрупкому разрушению. Типичные конструкционные материалы для противометеорных экранов – алюминиевые сплавы, титан, сталь. Еще большей противоударной стойкостью обладают многослойные структуры с твердым керамическим лицевым слоем и подслоем из вязкого металлического материала.

Во многих агрессивных средах, особенно при высоких температурах, оксиды значительно более стойки по сравнению с карбидами,

боридами и нитридами [6–8]. К специфическим свойствам оксидов следует отнести их низкие тепло- и электропроводность. Большинство оксидов, применяемых для напыления покрытий, имеют высокую температуру плавления. Многие из них обладают большой твердостью и износостойкостью. Оксиды, особенно высшие, являясь конечными продуктами окисления, инертны к окислительным средам. Оксидные покрытия наиболее универсальны в условиях эксплуатации и могут быть использованы как коррозионно-стойкие и жаростойкие, теплозащитные, электроизоляционные и износостойкие. Благодаря невысокой стоимости ряда промышленных оксидов и их универсальным эксплуатационным свойствам оксидная группа материалов получила особенно широкое применение в напыленных плазменных покрытиях [9–11]. Цель данной работы – разработка принципов формирования композиционных многослойных покрытий на моделях элементов экранов противометеорной защиты из порошков различного состава, высокотемпературная обработка образцов, исследование свойств покрытий и баллистические испытания полученных моделей.

Оптимизация процесса напыления покрытий на основе оксидной керамики

В процессе плазменного напыления действует большое число факторов, оказывающих влияние на свойства получаемых покрытий. Важнейшими из них, при прочих равных условиях, являются: расход плазмообразующего и транспортирующего газов, расход распыляемого порошка, ток электрической дуги (подводимая мощность), дистанция напыления, скорость перемещения подложки [11]. В качестве примера на рис. 1–6 представлены зависимости эффективности плазменного напыления при атмосферном давлении, характеризовать которые можно с помощью коэффициента использования порошка (распыляемого материала) (КИП), от перечисленных условий напыления. Предварительно выполненные эксперименты показали, что целесообразнее для наглядного анализа влияния технологических параметров использовать два порошка: NiAl – как наиболее типичный представитель металлических сплавов и Al_2O_3 – как представитель оксидных порошков (с различным фракционным составом).

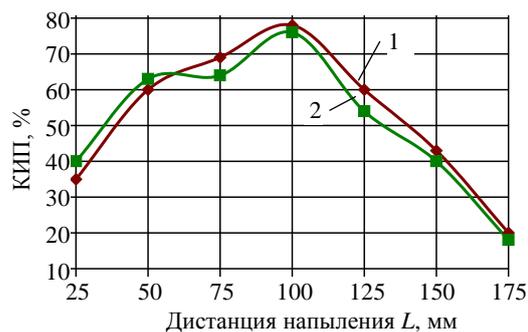


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления L для порошков NiAl:

1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $I = 500$ А; $R_N = 45$ л/мин; $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч

Fig. 1. Powder utilization factor dependence on spraying distance L for NiAl powder:

1 – with fraction of 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; $I = 500$ A; $R_N = 45$ l/min; $R_{\text{powder}} = 4.5$ kg/h

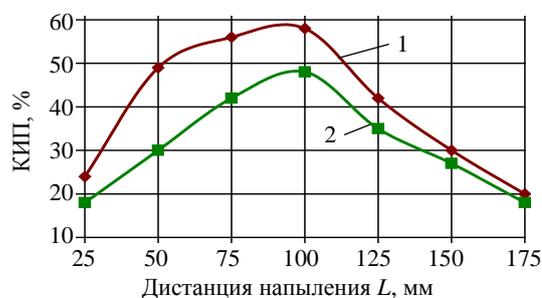


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления L для порошков Al_2O_3 :

1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $I = 500$ А; $R_N = 45$ л/мин; $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч

Fig. 2. Powder utilization factor dependence on spraying distance L for Al_2O_3 powder:

1 – with fraction of 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; $I = 500$ A; $R_N = 45$ l/min; $R_{\text{powder}} = 4.5$ kg/h

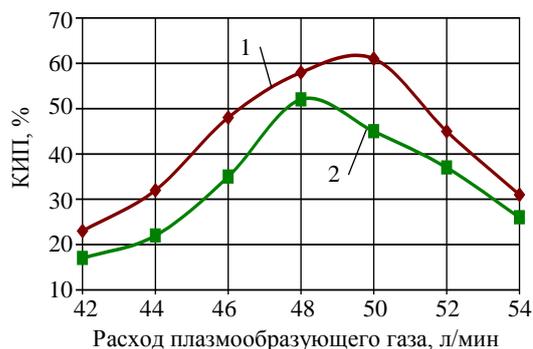


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования порошка от расхода плазмообразующего газа N_2 для порошков Al_2O_3 :

1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $L = 90$ мм; $I = 500$ А; $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч

Fig. 3. Powder utilization factor dependence on consumption of N_2 -plasma-forming gas for Al_2O_3 powder:

1 – with fraction of 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; $L = 90$ mm; $I = 500$ A; $R_{\text{powder}} = 4.5$ kg/h

Сравнительный анализ зависимости КИП данных материалов от дистанции напыления показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения КИП больше для порошка NiAl, что можно объяснить более высокой пластичностью последнего и соответственно меньшим отскоком соударяющихся с подложкой частиц.

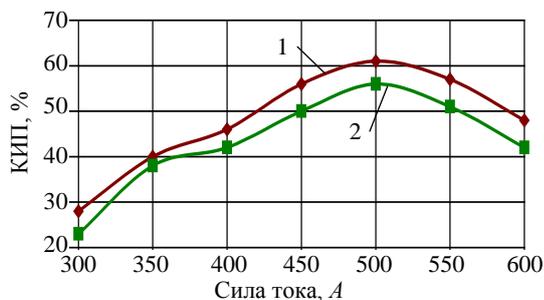


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования порошка от силы тока электрической дуги I для порошков Al_2O_3 : 1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $L = 90$ мм; $R_N = 50$ л/мин; $R_{пор} = 4,5$ кг/ч

Fig. 4. Powder utilization factor dependence on current strength of electric arc I for Al_2O_3 powder: 1 – with fraction of 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; $L = 90$ mm; $R_N = 50$ l/min; $R_{powder} = 4.5$ kg/h

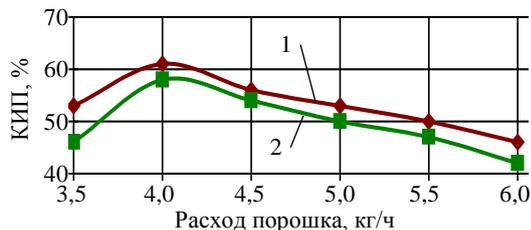


Рис. 5. Зависимость коэффициента использования порошка от расхода порошка $R_{пор}$ для порошков Al_2O_3 : 1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $L = 90$ мм; $I = 500$ А; $R_N = 50$ л/мин

Fig. 5. Powder utilization factor dependence on powder consumption R_{powder} for Al_2O_3 powder: 1 – with fraction of 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; $L = 90$ mm; $I = 500$ A; $R_N = 50$ l/min

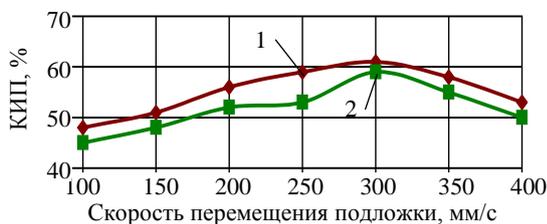


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования порошка от относительной скорости перемещения подложки $v_{п}$ для порошков Al_2O_3 : 1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $L = 90$ мм; $I = 500$ А; $R_N = 45$ л/мин

Fig. 6. Powder utilization factor dependence on relative speed of subsurface motion $v_{п}$ for Al_2O_3 powder: 1 – with fraction of 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; $L = 90$ mm; $I = 500$ A; $R_N = 45$ l/min

Обработка поверхности напыленного композиционного покрытия компрессионным плазменным потоком

Обработку поверхности модели элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием (вязкий металлический слой NiAl и слой из твердой оксидной керамики Al_2O_3) компрессионным плазменным потоком производили, во-первых, для того чтобы вызвать в поверхностном слое оксидной керамики нестационарные процессы плавления и перекристаллизации, приводящие к формированию высокопрочного поликристаллического слоя, во-вторых, чтобы в результате теплового импульсного воздействия улучшить характеристики сцепления вязкого металлического слоя NiAl и слоя из твердой оксидной керамики Al_2O_3 . С целью достижения достаточно высокой однородности воздействия компрессионного плазменного потока на технологическую поверхность выбирали оптимальное расстояние между установкой магнитоплазменного компрессора (МПК) и элементом противометеорной защиты в теплоотводящей оправке. В качестве рабочего газа использовали азот. Обработку поверхности модели элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием проводили на установке, представленной на рис. 7, при давлении остаточных газов в вакуумной камере 0,5 торр, емкость батареи конденсаторов МПК 600 мкФ. Напряжение на батарее конденсаторов МПК 7,3 кВ. Результаты фоторегистрации процесса взаимодействия компрессионного плазменного потока с поверхностью элемента противометеорной защиты показаны на рис. 8. Общий вид элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием – вязкий металлический слой NiAl и слой из твердой оксидной керамики Al_2O_3 – приведен на рис. 9, микрофотографии поверхности двухслойных композиционных покрытий – на рис. 10.

Как видно из рис. 10а, композиционное покрытие из твердой оксидной керамики Al_2O_3 представляет собой пористую структуру, состоящую из сплавленных частиц Al_2O_3 размерами 10–15 мкм. В пространстве между частицами наблюдаются металлические вкрапления, образовавшиеся в результате эрозии электродов плазмотрона.

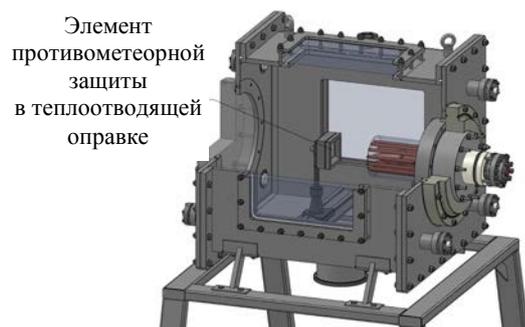


Рис. 7. Общий вид взаимного расположения установки магнитоплазменного компрессора и элемента противометеорной защиты в теплоотводящей оправке

Fig. 7. General view of plant with relative position of magnetic-plasma compressor and meteoroid protection element in heat-eliminating mandrel

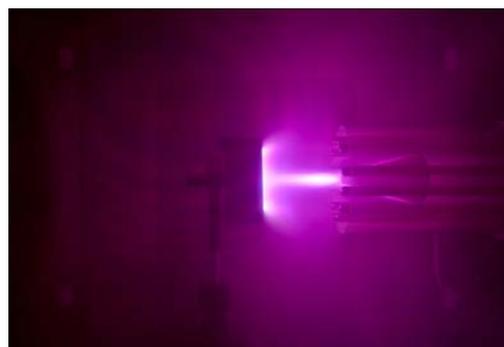


Рис. 8. Взаимодействие компрессионного плазменного потока с поверхностью элемента противометеорной защиты

Fig. 8. Interaction of compression plasma flow with surface of meteoroid protection element

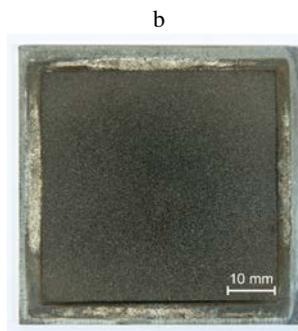
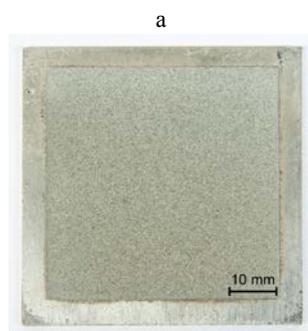


Рис. 9. Образцы элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием: а – до обработки; б – после обработки магнитоплазменным компрессором

Fig. 9. Specimens of elements for screens with bi-layer composite coating: a – prior to processing; b – after processing while using magnetic-plasma compressor

После обработки поверхности двухслойных композиционных покрытий компрессионным плазменным потоком на ней в результате нестационарных процессов плавления и перекристаллизации образуется высокопрочный поликристаллический слой. При этом те области поликристаллического слоя, где были металлические включения, оказались окрашенными в различные цвета в зависимости от химического состава вкрапления.

Результаты исследования микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, проведенные с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ), представлены на рис. 11а. Для увеличения площади поверхности анализируемого изображения шлиф поперечного сечения исходного образца был сделан под углом $\sim 60^\circ$ к нормали поверхности.

Толщина покрытий (с учетом наклона образца) составляет около 375 мкм. При этом внутри

самого покрытия присутствуют области, представляющие собой частицы оксида алюминия Al_2O_3 , а также светлые участки, в которых зафиксировано повышенное содержание металлических включений. Между сформированным покрытием на основе оксида алюминия и подложкой на поперечном сечении обнаружено присутствие подслоя, содержащего алюминий и никель. Сформированные покрытия подвергались воздействию компрессионных плазменных потоков. На рис. 11б представлены РЭМ-изображения участков центральной части покрытия на основе оксида алюминия после воздействия компрессионными плазменными потоками. Анализ поперечного сечения покрытий, подвергнутых воздействию компрессионных плазменных потоков, показал формирование проплавленного слоя толщиной около 6–7 мкм, в котором присутствуют частицы металлов, нерастворенные в расплаве оксида (рис. 12).

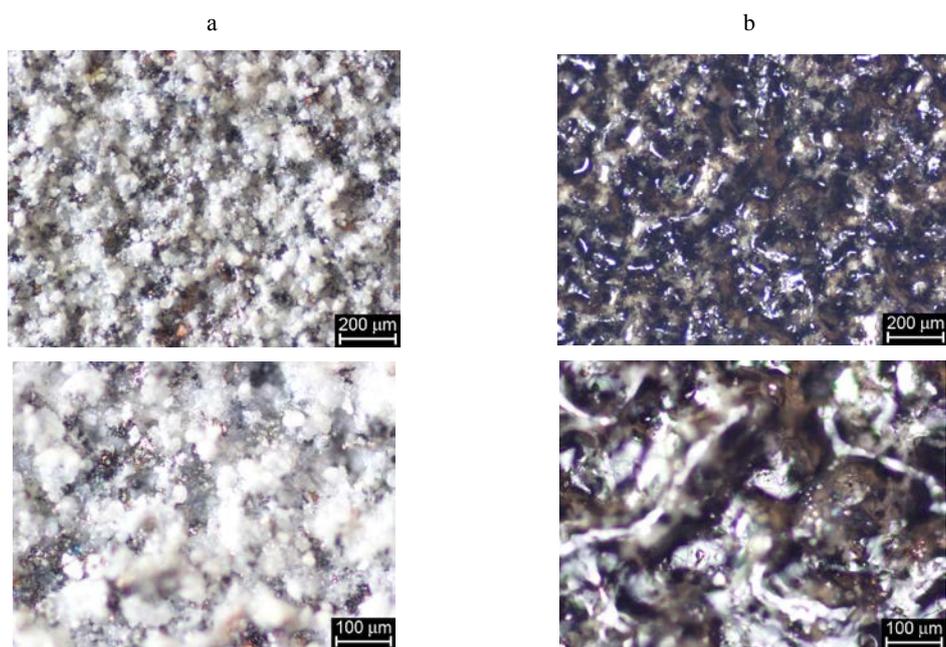


Рис. 10. Микрофотографии поверхности двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический слой NiAl и слой из твердой оксидной керамики Al_2O_3) на моделях элементов защитных экранов:

а – до технологической обработки поверхности элемента компрессионным плазменным потоком; б – после

Fig. 10. Microphotographies of bi-layer composite coating surface (adhesive metal layer NiAl and hard ceramic oxide Al_2O_3 layer) in prototypes of protective screen elements:

а – prior to technological processing of element surface by compression plasma flow; б – the same after processing

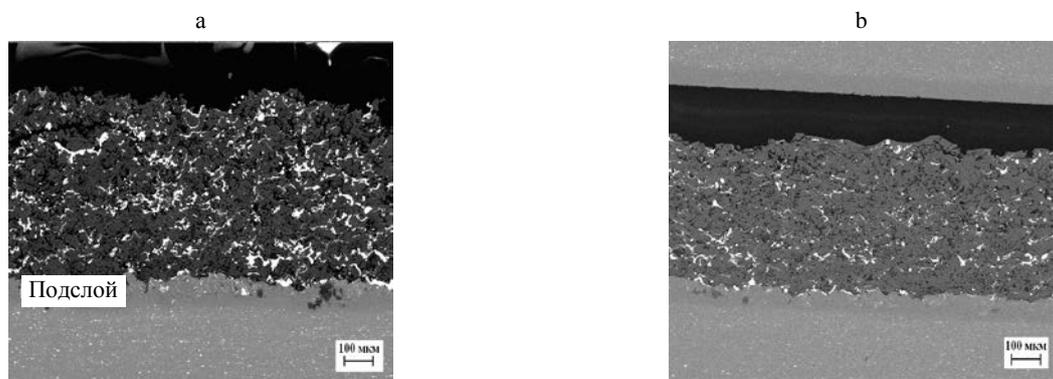


Рис. 11. Растровое электронное микроскопическое изображение поперечного сечения покрытия: а – до воздействия компрессионных плазменных потоков; б – после

Fig. 11. Scanning electronic microscope image of coating cross-section: а – prior to exposure to compression plasma flows; б – the same after exposure

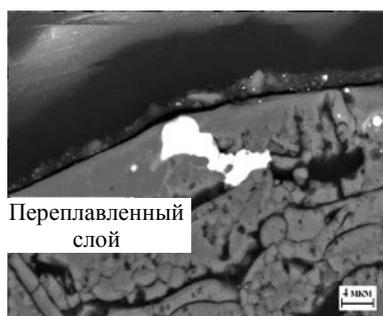


Рис. 12. Растровое электронное микроскопическое изображение поперечного сечения покрытия после воздействия компрессионных плазменных потоков при увеличении $\times 5000$

Fig. 12. Scanning electronic microscope image of coating cross-section after exposure to compression plasma flows with the following increasing $\times 5000$

Баллистические испытания образцов элемента экранной противометеорной защиты

Баллистические испытания описанного выше образца элемента экранной противометеорной защиты проводили на комбинированной легкогазовой установке МПК-7, принцип работы и параметры которой описаны в [12]. Результат воздействия ударника из пирографита на образец противометеорной защиты повышенной стойкости (после воздействия МПК) представлен на рис. 13. В качестве метаемой частицы использовался графитовый шарик диаметром 2,5 мм, скорость которого составляла 4,8 км/с.

В результате воздействия ударника на поверхности образца образовался кратер ($d \sim 4$ мм), при этом часть композиционного покрытия в окрестности кратера отслоилась.



Рис. 13. Фотографии элемента экранной противометеорной защиты повышенной стойкости после пробивания

Fig. 13. Photographies of screen meteoroid protection element of high resistance after punching

ВЫВОДЫ

1. Эффективность защиты объектов от повреждений при высокоэнергетическом воздействии определяется противоударной стойкостью используемых материалов. Применительно к противометеорной защите космических аппаратов высокопрочные материалы должны удовлетворять основным требованиям (минимальная плотность, высокие вязкопластичные свойства, твердость). Таким характеристикам соответствуют керамические плазменные покрытия.

2. Проведена оптимизация параметров APS (плазменного напыления на воздухе) процесса

для материалов NiAl и Al_2O_3 . Оптимизацию проводили на основании получения максимального коэффициента использования материала. На оптимальных режимах для NiAl (расход плазмообразующего газа азота $R_N = 45$ л/мин, ток $I = 500$ А, дистанция напыления $L = 100$ мм, фракция порошка 40–63 мкм, расход порошка $R_{пор} = 4,5$ кг/ч) получены покрытия с коэффициентом использования порошка 78 %. На оптимальных режимах для Al_2O_3 (расход плазмообразующего газа азота $R_N = 50$ л/мин, ток $I = 500$ А, дистанция напыления $L = 90$ мм, фракция порошка – 40–63 мкм, расход порошка $R_{пор} = 4,0$ кг/ч, относительная скорость перемещения подложки $v_{п} = 300$ мм/с) получены покрытия с коэффициентом использования порошка 61 %.

3. Проведена обработка поверхности модели элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием (вязкий металлический слой NiAl и слой из твердой оксидной керамики Al_2O_3) компрессионным плазменным потоком. В качестве рабочего газа использовали азот. Выполнены баллистические испытания образца элемента экранной противометеорной защиты с обработанным композиционным плазменным покрытием из твердой оксидной керамики Al_2O_3 на комбинированной легкогазовой установке МПК-7. В результате воздействия ударника на поверхности образца образовался кратер ($d \sim 4$ мм), при этом часть композиционного покрытия в окрестности кратера отслоилась.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акишин, А. И. Космическое материаловедение / А. И. Акишин. М.: НИИЯФ МГУ, 2007. 209 с.
2. Новые наукоемкие технологии в технике: энцикл.: в 24 т. / под ред. К. С. Касаева. Т. 16, 17: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: ЭНЦИТЕХ, 2001.
3. Akishin, A. I. Effects of Space Conditions on Materials / A. I. Akishin. New York: Nova Science Publ., 2001. 199 p.
4. Кудинов, В. В. Плазменные покрытия / В. В. Кудинов. М.: Наука, 1997. С. 184.
5. Кулик, А. Я. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин. Минск: Машиностроение, 1995. С. 200.
6. Кудинов, В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В. В. Кудинов. М.: Машиностроение, 1981. С. 192.

7. Хасуй, А. Техника напыления / А. Хасуй. М.: Машиностроение, 1975. С. 286.
8. Вяльцев, А. М. Синтез керамических материалов для высокоплотных покрытий / А. М. Вяльцев // Получение и исследование свойств новых материалов. Киев: ИПМ, 1988. С. 149–153.
9. Бузовкина, Т. Б. Исследование теплопроводности и физико-химических характеристик высокотемпературных напыленных покрытий на основе окиси алюминия / Т. Б. Бузовкина. Л., 1973. 21 с.
10. Ильющенко, А. Ф. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. Минск: Беспринт, 2005. С. 253.
11. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В. А. Оковитый [и др.] // Порошковая металлургия. 2008. Вып. 31. С. 156–162.
12. Физические принципы работы двухстадийной легкогазовой магнитоплазменной метательной установки для баллистических испытаний в условиях глубокого вакуума / П. П. Храмов [и др.] // ИФЖ. 2015. Т. 88, № 5. С. 1118–1126.

Поступила 03.12.2015

Подписана в печать 05.02.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Akishin A. I. (2007) *Space Materials Science*. Moscow, Skobel'syn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University. 209 (in Russian).
2. Kasaev K. S. [ed.] (2001) *State-of-the Art High Technologies in Engineering. Encyclopedia Vol. 16, 17. Impact of Space Environment on Materials and Equipment of Spacecrafts*. Moscow, Publishing House "ENTsITEKh". (in Russian).

3. Akishin A. I. (2001) *Effects of Space Conditions on Materials*. New York, Nova Science Publ. 199.
4. Kudinov V. V. (1997) *Plasma Coatings*. Moscow, Nauka. 184 (in Russian).
5. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnukhin A. S. (1995) *Gas Thermal Spraying of Composite Powders*. Minsk, Mashinostroyeniye. 200 (in Russian).
6. Kudinov V. V. (1981) *Plasma-Deposited Refractory Coatings*. Moscow, Mashinostroyeniye. 192 (in Russian).
7. Khasuy A. (1975) *Spray Coating Technology*. Moscow, Mashinostroyeniye. 286 (in Russian).
8. Vialtsev A. M. (1988) *Synthesis of Ceramic Materials for High-Density Coatings. Preparation and Property Investigation of New Materials*. Kiev: Institute for Problems in Materials Science [IPMS], 149–153 (in Russian).
9. Buzovkina T. B. (1973) *Investigation of Thermal Conductivity, Chemical and Physical Characteristics of High-Temperature Sprayed Coatings Based on Aluminum Oxide*. Leningrad. 21 (in Russian).
10. Ilyushchenko A. F., Okovity V. A., Shevtsov A. I. (2005) *Formation of Wear-Resistant Plasma Coatings Based on Composite Self-Lubricating Materials*. Minsk: Publishing House "Besprint". 253 (in Russian).
11. Okovity V. A. [et al.] (2008) *Preparation of Composite Ceramic Material for Wear-Resistant Coatings. Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdvdomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers], 31, 156–162 (in Russian).
12. Khramtsov P. P., Penyazkov O. G., Vasetskii V. A., Grishchenko V. M., Makhnach A. I., Shikh I. A. (2015). Physical Principles of Operation of a Two-Stage Light Gas Magnetoplasma Launcher for High-Vacuum Ballistic Tests. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 88 (5), 1154–1162. DOI: 10.1007/s10891-015-1295-2.

Received: 03.12.2015

Accepted: 05.02.2016

Published online: 26.09.2016