

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28

УДК 621.793.71

## Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический NiCr и твердый ZrO<sub>2</sub> слой)

Канд. техн. наук В. А. Оковитый<sup>1)</sup>,  
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко<sup>1)</sup>, инж. В. В. Оковитый<sup>1)</sup>,  
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский<sup>2)</sup>,  
докт. физ.-мат. наук П. П. Храмцов<sup>2)</sup>, канд. физ.-мат. наук М. Ю. Черник<sup>2)</sup>,  
докт. физ.-мат. наук, проф. В. В. Углов<sup>3)</sup>, кандидаты физ.-мат. наук В. И. Шиманский<sup>3)</sup>, Н. Н. Черенда<sup>3)</sup>,  
канд. техн. наук С. Б. Соболевский<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

<sup>3)</sup>Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>4)</sup>Государственное учреждение «Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** В статье приведены результаты исследования влияния параметров плазменной струи и фракционного состава исходного порошка на характеристики двухслойных композиционных покрытий на основе никель-хрома и диоксида циркония на элементах защитных экранов. Проведена оптимизация на основании получения максимального коэффициента использования порошка. Сравнительный анализ зависимости коэффициента использования порошка вязких металлических слоев никель-хрома и никель-алюминия от дистанции напыления показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения коэффициента использования порошка больше при оптимальных режимах для порошка никель-хрома. Это можно объяснить высокой пластичностью последнего и соответственно меньшим отскоком соударяющихся с подложкой частиц. Приведены результаты исследований микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, выполненных с использованием растровой электронной микроскопии. Рассмотрены микроструктуры поперечных сечений покрытия ZrO<sub>2</sub> и промежуточного слоя Ni-Cr. Из представленных данных видно, что в исходном состоянии покрытие характеризуется пористостью, причем средний размер пор составляет несколько микрометров и в некоторых областях достигает 20 мкм. Микроструктура слоя Ni-Cr характеризуется меньшей пористостью. Воздействие на напыленное покрытие компрессионных плазменных потоков приводит к формированию переплавленного слоя оксида толщиной 12–15 мкм, способствует сглаживанию рельефа поверхности и образованию на поверхности трещин, распространяющихся преимущественно в глубину покрытия. Обработка оксидных покрытий компрессионной плазмой приводит также к снижению их пористости.

**Ключевые слова:** плазменная струя, покрытия, элементы защитных экранов, коэффициент использования порошка, плазменные потоки, кубическая модификация, диоксид циркония

**Для цитирования:** Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический NiCr и твердый ZrO<sub>2</sub> слой) / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 1. С. 21–28. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28

### Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-93-71  
niil\_svarka@bntu.by

### Address for correspondence

Okovity Vjacheslav A.  
Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-93-71  
niil\_svarka@bntu.by

## Formation and Study of Plasma Spraying Double-Layer Composite Coatings (Viscous Metallic NiCr and Solid ZrO<sub>2</sub> Layer)

V. A. Okovity<sup>1</sup>, F. I. Panteleenko<sup>1</sup>, V. V. Okovity<sup>1</sup>, V. M. Astashinsky<sup>2</sup>, P. P. Hramtsov<sup>2</sup>, M. Y. Cernik<sup>2</sup>, V. V. Uglov<sup>3</sup>, V. I. Chimanskiy<sup>3</sup>, N. N. Cerenda<sup>3</sup>, S. B. Sobolewski<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2</sup>A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>3</sup>Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>4</sup>State Organization “Belarusian Institute of System Analysis and Information Support for Scientific and Technical Sphere” (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents results pertaining to investigations on influence of plasma jet parameters and fractional composition of initial powder on characteristics of two-layer composite coatings on the basis of nickel-chromium, and zirconium dioxide in the shielding elements. Optimization has been carried out on the basis of obtaining maximum powder use factor. A comparative analysis of dependence of the powder use factor in viscous metal layers of nickel-chrome and nickel-aluminum on spraying distance shows that while having similar character of curves for the presented dependencies an absolute value of powder use factor is higher for nickel-chromium powder. It can be explained by a higher ductility of the latter and correspondingly smaller rebound of particles which are colliding with substrate. The investigation results for cross section microstructure in the formed coatings while using scanning electron microscopy are given in the paper. The paper considers cross section microstructures for ZrO<sub>2</sub>-coating and intermediate Ni–Cr layer. The submitted data reveal that an initial stage of the coating is characterized by porosity and an average pore size is of several micrometers, and in some areas its size reaches 20 μm. The microstructure of a Ni–Cr layer is characterized by lower porosity. Impact of compression plasma flows on sprayed coating leads to formation of fused oxide layer with thickness of 12–15 μm and contributes to smoothing of surface relief and formation of cracks on the surface which are preferably propagating into coating depth. Processing of oxide coatings by compression plasma also results in reduction of their porosity.

**Keywords:** plasma jet, coatings, shielding elements, powder use factor, plasma flows, cubic modification, zirconium dioxide

**For citation:** Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Cernik M. Y., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. (2018) Formation and Study of Plasma Spraying Double-Layer Composite Coatings (Viscous Metallic NiCr and Solid ZrO<sub>2</sub> Layer). *Science and Technique*. 17 (1), 21–28. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28 (in Russian)

### Введение

Эффективность защиты объектов от повреждений при высокоэнергетическом воздействии определяется уровнем поглощения кинетической энергии метеорных частиц материалом покрытия. Не касаясь всех механизмов поглощения энергии, укажем, что значительная ее часть расходуется на упругую и пластическую деформацию материала покрытий. Высокая 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. В качестве материалов для керамического слоя антиметеоритных покрытий часто применяют композиции на основе оксидов, в том числе диокси-

да циркония [1–5]. Это обусловлено рядом его свойств: сравнительно высоким коэффициентом линейного термического расширения и возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики, в частности ударной вязкости. Для эффективной работы таких защитных элементов необходимо, чтобы они позволяли существенным образом снизить кинетическую энергию налетающих микрочастиц, сохраняя при этом стабильность своей структуры. В связи с этим предложено формировать композиционные покрытия на основе диоксида циркония с предварительным осаждением вязкого подслоя на основе переходных металлов, повышающего, во-первых, адгезионную прочность сформированного покрытия к подложке, а во-вторых, обладающего иными по сравнению с внешним покрытием вязко-пластическими свойствами [6–11], приводящими к значительному замедлению проходящих микрочастиц. В то же время для повышения прочности поверхностного слоя покрытия, кото-

рый в первую очередь взаимодействует с налетающей микрочастицей, предложено проводить его обработку компрессионными плазменными потоками с энергиями, обеспечивающими плавление приповерхностного слоя. В этом случае за счет процессов, связанных со скоростной кристаллизацией расплава, ожидается формирование мелкокристаллической структуры, обладающей повышенными механическими свойствами. Структурно-фазовое состояние приповерхностного модифицированного слоя может контролироваться также параметрами самого компрессионно-плазменного воздействия, в частности плотностью поглощенной энергии, давлением газа остаточной атмосферы, числом последовательных импульсов воздействия и др.

Для выявления особенностей перераспределения элементов в покрытии и изменения их фазового состава после воздействия компрессионными плазменными потоками использованы методы рентгеноспектрального микроанализа и рентгеноструктурного анализа. При исследовании микроструктуры покрытий после воздействия компрессионными плазменными потоками применялся метод растровой электронной микроскопии. Анализ механических свойств приповерхностных модифицированных слоев осуществлялся в результате трибологических испытаний.

### Оптимизация процесса напыления вязкого металлического слоя на основе никель-хрома

Оптимизация напыления NiCr проводилась по методике, описанной в [12]. На первом этапе выполнялась оптимизация на основании получения максимального коэффициента использования материала. Вначале коэффициент использования порошка (КИП) определяли при различных значениях тока  $I$  (300–650 А с интервалом 50 А) и расходах плазмообразующего газа  $R_{N_2}$  (45; 50; 55 л/мин), но с постоянной дистанцией напыления  $L = 110$  мм (рис. 1).

На следующем этапе оптимальные значения дистанции напыления определялись с постоянными значениями тока и расхода плазмообразующего газа ( $I = 550$  А;  $R_{N_2} = 50$  л/мин) для различных фракций порошка (рис. 2).

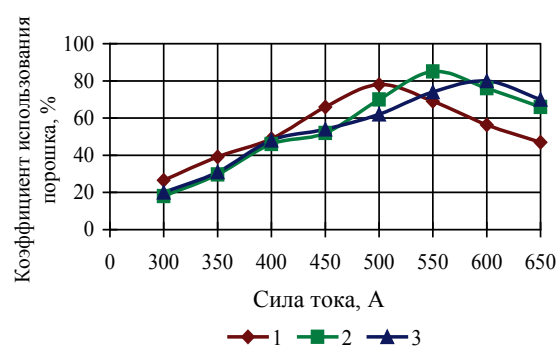


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования порошка от силы тока электрической дуги для порошков NiCr с различным расходом плазмообразующего газа  $R_{N_2}$ , л/мин: 1 – 55; 2 – 50; 3 – 45 ( $L = 110$  мм;  $R_{пор} = 4,5$  кг/ч; фракция порошка 40–63 мкм)

Fig. 1. Dependence of powder use factor on electric arc current strength for NiCr powders with various consumption of plasma gas  $R_{N_2}$ , l/min: 1 – 55; 2 – 50; 3 – 45 ( $L = 110$  mm;  $R_{пор} = 4.5$  kg/h; powder fraction 40–63  $\mu$ m)

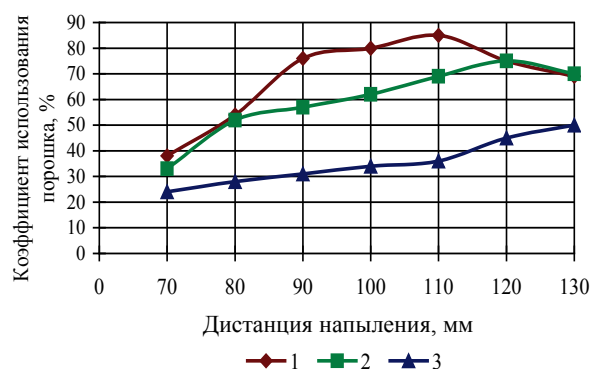


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления для порошков NiCr с фракцией, мкм: 1 – 40–63; 2 – 63–100; 3 – 100–160 ( $I = 550$  А;  $R_{N_2} = 50$  л/мин;  $R_{пор} = 4,5$  кг/ч)

Fig. 2. Dependence of powder use factor on spraying distance for NiCr powders having fraction,  $\mu$ m: 1 – 40–63; 2 – 63–100; 3 – 100–160 ( $I = 550$  A;  $R_{N_2} = 50$  l/min;  $R_{пор} = 4.5$  kg/h)

Увеличение тока и расхода плазмообразующего газа (рис. 1) до определенных значений приводит к повышению КИП, так как эти параметры влияют на степень проплавления порошка [1–4]. Дальнейший их рост ведет к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно, КИП уменьшается. При увеличении расхода  $N_2$  происходит уменьшение значений тока для максимального КИП. Для  $R_{N_2} = 55$  л/мин максимальный КИП = 78 % соответствует  $I = 500$  А, для  $R_{N_2} = 50$  л/мин максимальный КИП = 85 %

соответствует  $I = 550$  А, для  $R_{N_2} = 45$  л/мин максимальный КИП = 80 % соответствует  $I = 600$  А. Похожая тенденция сохраняется и при изменении дистанции напыления (рис. 2) при оптимизации значения расхода  $N_2$  и тока (в рассматриваемом случае  $R_{N_2} = 50$  л/мин,  $I = 550$  А). При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой ниже  $t_{пл}$ . В рассматриваемом случае КИП возрастает до  $L = 110$  мм, дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к тому, что частица из-за длительного нахождения в струе переплавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИП уменьшается [5].

На оптимальных режимах для NiCr (расход плазмообразующего газа азота 50 л/мин; ток 550 А; дистанция напыления 110 мм; фракция порошка 40–63 мкм; расход порошка 4,5 кг/ч) получены покрытия с КИП = 85 %.

Сравнительный анализ зависимости КИП NiCr и NiAl от дистанции напыления приведен на рис. 3. Этот анализ показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения КИП больше при оптимальных режимах для порошка NiCr, что можно объяснить более высокой пластичностью последнего и соответственно меньшим отскоком соударяющихся с подложкой частиц [2].

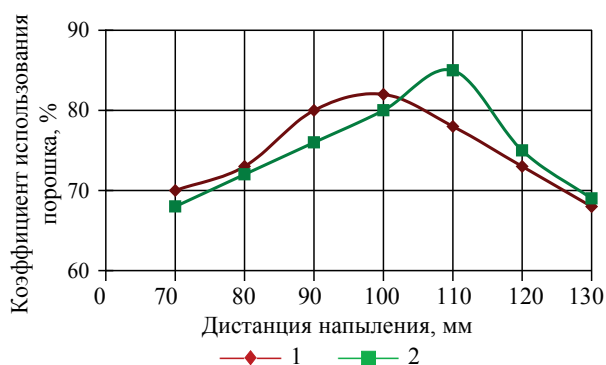


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления для порошков NiAl (1) и NiCr (2) с фракцией 40–63 мкм и расходом порошка 4,5 кг/ч (для NiAl:  $R_{N_2} = 45$  л/мин,  $I = 500$  А; для NiCr:  $R_{N_2} = 50$  л/мин,  $I = 550$  А)

Fig. 3. Dependence of powder use factor on spraying distance for NiAl (1) and NiCr (2) powder having fraction 40–63  $\mu$ m and powder consumption 4.5 kg/h (for NiAl:  $R_{N_2} = 45$  l/min,  $I = 500$  A; for NiCr:  $R_{N_2} = 50$  l/min,  $I = 550$  A)

### Оптимизация процесса нанесения твердого слоя на основе диоксида циркония

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 [12]. В качестве примера на рис. 4–8 представлен характер зависимостей эффективности плазменного напыления твердого комбинированного слоя на основе диоксида циркония на подслое из никель-хрома, характеризовать которые можно с помощью коэффициента использования распыляемого материала (порошка) КИП от перечисленных условий напыления. Зависимость КИП от дистанции напыления показана на рис. 4. При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой ниже  $t_{пл}$ .

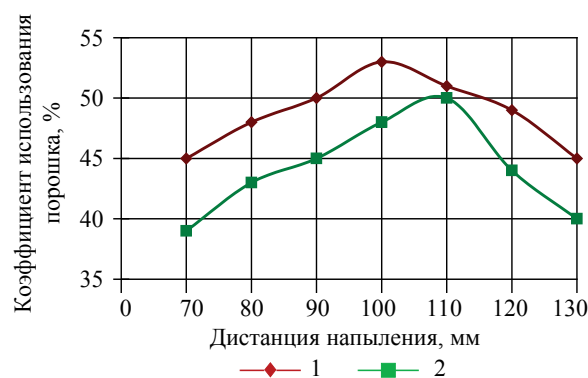


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления для порошков  $ZrO_2$  с фракцией, мкм: 1 – менее 50; 2 – 50–63 ( $I = 500$  А;  $R_{N_2} = 50$  л/мин;  $R_{пор} = 4,5$  кг/ч)

Fig. 4. Dependence of powder use factor on spraying distance for  $ZrO_2$  powder having fraction,  $\mu$ m: 1 – less than 50; 2 – 50–63 ( $I = 500$  A;  $R_{N_2} = 50$  l/min;  $R_{пор} = 4.5$  kg/h)

В рассматриваемом случае КИП возрастает до  $L = 100$  мм для порошков  $ZrO_2$  с фракцией менее 50 мкм и до  $L = 110$  мм с фракцией 50–63 мкм. Дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к тому, что частица из-за длительного нахождения в струе пере-

плавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИП уменьшается [5]. Увеличение тока и расхода плазмообразующего газа (рис. 5, 6) до определенных значений приводит к росту КИП, так как эти параметры влияют на степень проплавления порошка [1–4]. Дальнейший их рост приводит к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно, КИП уменьшается. При увеличении расхода  $N_2$  происходит уменьшение значений тока для максимального КИП. Для  $R_{N_2} = 55$  л/мин максимальный КИП = 56 % соответствует  $I = 600$  А, для  $R_{N_2} = 50$  л/мин максимальный КИП = 54 % соответствует  $I = 650$  А.

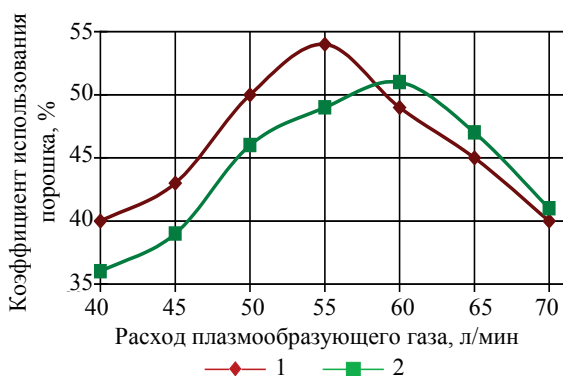


Рис. 5. Зависимость коэффициента использования порошка от расхода плазмообразующего газа  $N_2$  для порошков  $ZrO_2$  с фракцией, мкм: 1 – менее 50; 2 – 50–63 ( $L = 100$  мм;  $I = 500$  А;  $R_{пор} = 4,5$  кг/ч)

Fig. 5. Dependence of powder use factor on consumption of plasma gas  $N_2$  for  $ZrO_2$  having fraction,  $\mu m$ : 1 – not less than 50; 2 – 50–63 ( $L = 100$  mm;  $I = 500$  A;  $R_{пор} = 4.5$  kg/h)

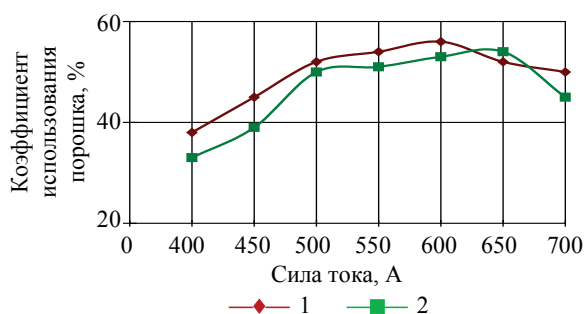


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования порошка от силы тока электрической дуги для порошков  $ZrO_2$  с  $R_{N_2}$ , л/мин: 1 – 55; 2 – 50 ( $L = 100$  мм;  $R_{пор} = 4,5$  кг/ч; фракция менее 50 мкм)

Fig. 6. Dependence of powder use factor on electric arc current strength for  $ZrO_2$  powder with  $R_{N_2}$ , l/min: 1 – 55; 2 – 50 ( $L = 100$  mm;  $R_{пор} = 4.5$  kg/h; fraction – not less than 50  $\mu m$ )

Влияние расхода подачи порошка на КИП показано на рис. 7. Так как в формировании покрытия принимают участие все частицы в плазменной струе, наилучшими свойствами будут обладать покрытия, отвечающие плазменным режимам, где доля расплавленных частиц в струе и их концентрация максимальны.

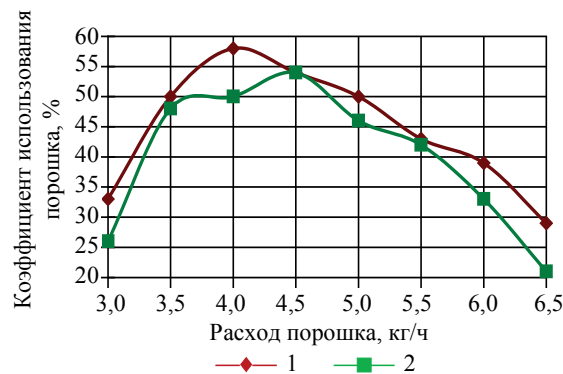


Рис. 7. Зависимость коэффициента использования порошка от расхода порошка для порошков  $ZrO_2$  с фракцией, мкм: 1 – менее 50; 2 – 50–63 ( $L = 100$  мм;  $I = 600$  А;  $R_{N_2} = 55$  л/мин)

Fig. 7. Dependence of powder use factor on powder consumption for  $ZrO_2$  powder having fraction,  $\mu m$ : 1 – less than 50; 2 – 50–63 ( $L = 100$  mm;  $I = 600$  A;  $R_{N_2} = 55$  l/min)

Для определенных выше оптимальных режимов максимальный КИП соответствует расходу порошка 4 кг/ч, при дальнейшем увеличении расхода КИП уменьшается, поскольку тепловой энергии плазменной струи не хватает для расплавления всех подаваемых в струю частиц. С увеличением степени охлаждения при одинаковых скоростях подачи порошка КИП уменьшается [1–5]. В результате проведенной оптимизации отработаны режимы напыления APS (плазменное напыление на воздухе) процесса для материалов  $ZrO_2$ . Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала. На оптимальных режимах для  $ZrO_2$  (расход плазмообразующего газа азота 55 л/мин; ток 600 А; дистанция напыления 100 мм; фракция порошка менее 50 мкм; расход порошка 4,0 кг/ч) получены покрытия с КИП = 58 %.

### Исследование микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий

Результаты исследования микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий

тий, проведенные с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ), представлены на рис. 8. Из приведенных данных видно, что толщина покрытия  $ZrO_2$  составляет примерно 800 мкм.

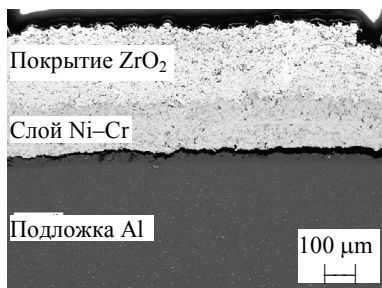


Рис. 8. Изображение с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ-изображение) поперечного сечения покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками

Fig. 8. Image of coating cross section prior to action of compression plasma flows while using scanning electronic microscopy (SEM-image)

Между покрытием на основе диоксида циркония  $ZrO_2$  на РЭМ-изображении обнаружено наличие промежуточного подслоя, толщина и элементный состав которого были исследованы с помощью рентгеноспектрального микроанализа. Результаты, представленные на рис. 9, указывают на то, что толщина подслоя составляет около 450 мкм.

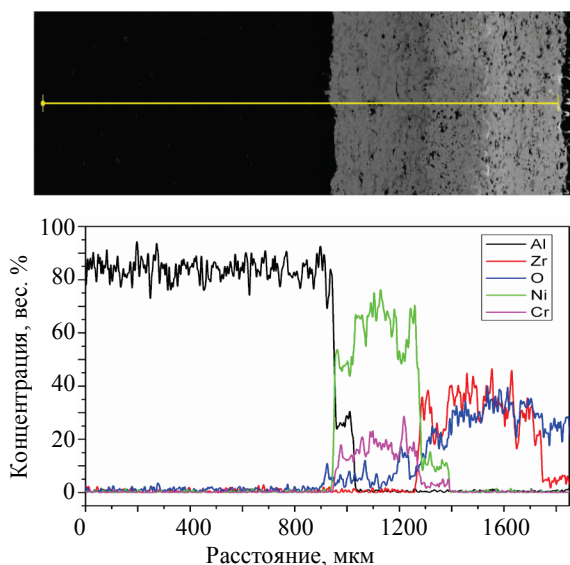


Рис. 9. РЭМ-изображение и распределение характеристического рентгеновского излучения элементов вдоль выделенной линии на поперечном шлифе покрытия

Fig. 9. SEM-image and distribution of characteristic element X-ray radiation along marked line on coating cross section

Элементный анализ позволил установить, что подслоем состоит из никеля и хрома. РЭМ-изображения микроструктуры поперечных сечений покрытия  $ZrO_2$  и промежуточного слоя Ni-Cr показаны на рис. 10. Из представленных данных видно, что в исходном состоянии покрытие характеризуется пористостью, причем средний размер пор составляет несколько микрометров и в некоторых областях достигает 20 мкм. Микроструктура слоя Ni-Cr характеризуется меньшей пористостью.

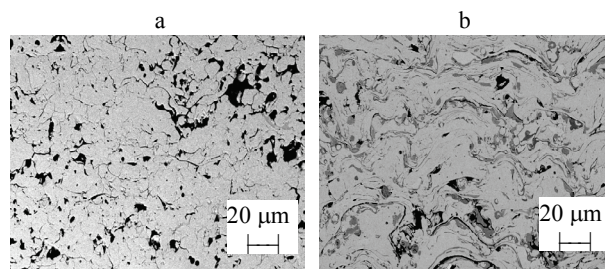


Рис. 10. РЭМ-изображение микроструктуры покрытия диоксида циркония (а) и промежуточного слоя Ni-Cr (b) на поперечном шлифе

Fig. 10. Microstructure SEM –image of zirconium dioxide coating (a) and Ni-Cr intermediate layer (b) on cross section

РЭМ-изображение поверхностного слоя покрытий, полученное на поперечном шлифе до воздействия компрессионных плазменных потоков, представлено на рис. 11. Видно, что в исходном состоянии приповерхностный слой характеризуется наличием большого количества микротрещин, распространяющихся как вдоль поверхности, так и в глубину.

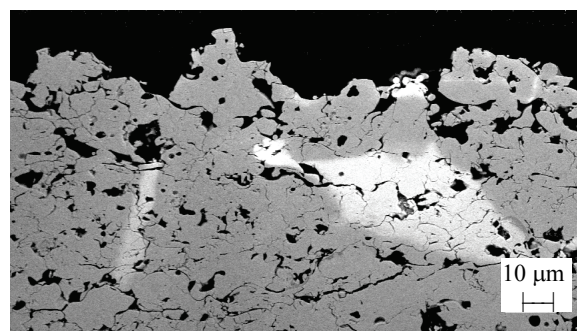


Рис. 11. РЭМ-изображение поверхностного слоя покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками (поперечный шлиф)

Fig. 11. SEM-image of coating surface layer prior to action of compression plasma flows (cross section)

После воздействия на покрытие компрессионных плазменных потоков происходит сглаживание поверхности, о чем свидетельствует РЭМ-изображение поперечного шлифа, представленное на рис. 12.

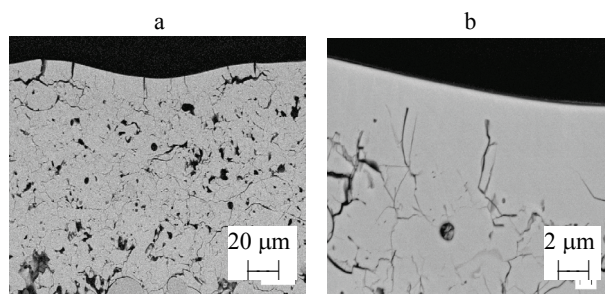


Рис. 12. РЭМ-изображение поперечного шлифа покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками при различных увеличениях: а – 20 мкм; б – 2 мкм

Fig. 12. SEM –image of coating cross section after action of compression plasma flows at various increasing process parameters: a – 20  $\mu\text{m}$ ; b – 2  $\mu\text{m}$

Анализ полученных РЭМ-изображений показал, что в приповерхностном модифицированном слое покрытий существенно уменьшается количество микротрещин и пор. Происходит это из-за плавления приповерхностного слоя и его кристаллизации из расплава. Тем не менее некоторое количество микротрещин присутствует вследствие скоростного охлаждения закристаллизовавшегося слоя. Однако данные микротрещины распространяются преимущественно в глубину покрытия, что может препятствовать отслоению частей покрытий в процессе механического воздействия.

По наличию трещин, распространяющихся в глубь образца, можно определить толщину расплавленного слоя, которая составляет 12–15 мкм.

## ВЫВОДЫ

1. Проведена оптимизация плазменного напыления двухслойных композиционных покрытий на основе никель-хрома и диоксида циркония на элементах защитных экранов на основании получения максимального коэффициента использования порошка. Исследовано влияние параметров плазменной струи (тока, дистанции напыления, расхода плазмообразу-

ющего газа азота) и фракционного состава исходного порошка на характеристики покрытий. Сравнительный анализ зависимости коэффициента использования порошка вязких металлических слоев никель-хрома и никель-алюминия от дистанции напыления показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения коэффициента использования порошка больше при оптимальных режимах для порошка никель-хрома. Это можно объяснить более высокой пластичностью последнего и соответственно меньшим отскоком соударяющихся с подложкой частиц.

2. Результаты исследований микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, проведенных с использованием растровой электронной микроскопии, показали, что напыленная структура представляет собой покрытие на основе диоксида циркония  $\text{ZrO}_2$  толщиной покрытия примерно 800 мкм. Между покрытием и подложкой из алюминиевого сплава присутствует переходный вязкий слой из переходных металлов Ni–Cr, толщина которого составляет 450 мкм. Воздействие на покрытие компрессионных плазменных потоков приводит к формированию переплавленного слоя оксида толщиной около 12–15 мкм, способствует сглаживанию рельефа поверхности и образованию на поверхности трещин, распространяющихся преимущественно в глубину покрытия. Обработка оксидных покрытий компрессионной плазмой приводит также к уменьшению их пористости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимизация процесса напыления керамических плазменных покрытий на модели элементов экранов противометеорной защиты / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Машиностроение и техносфера XXI в.: сб. трудов XXI Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 15–20 сент. 2014 г. Донецк: МСМ, 2014. С. 206–208.
2. Девойно, О. Г. Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью / О. Г. Девойно, В. В. Оковитый // Наука и техника. 2015. № 1. С. 35–39.
3. Разработка технологии нанесения плазменных композиционных покрытий на основе диоксида циркония

- для систем космических аппаратов / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Наука и техника. 2015. № 3. С. 5–9.
4. Оковитый, В. В. Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий аппаратов / В. В. Оковитый // Наука и техника. 2015. № 5. С. 26–32.
  5. Девойно, О. Г. Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий на основе диоксида циркония / О. Г. Девойно, В. В. Оковитый // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015): сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 23–25 сент. 2015 г. Кемерово: КузГТУ, 2015. С. 332–335.
  6. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. М.: Наука, 1990. 244 с.
  7. Анциферов, В. Н. Газотермические покрытия / В. Н. Анциферов [и др.]. Екатеринбург: Наука, 1994. 324 с.
  8. Куприянов, И. Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И. Л. Куприянов. Минск: Наука і тэхніка, 1990. 254 с.
  9. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. М., 1985. 261 с.
  10. Теплозащитные покрытия на основе ZrO<sub>2</sub> / А. Ф. Ильющенко [и др.]. Минск: Ремика, 1998. 128 с.
  11. Акишин, А. И. Космическое материаловедение / А. И. Акишин. М.: НИИЯФ МГУ, 2007. С. 209.
  12. 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. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364.
- Поступила 06.03.2017  
Подписана в печать 29.05.2017  
Опубликована онлайн 29.01.2018
- REFERENCES
1. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. A. (2014) Optimization of Deposition Process for Ceramic Plasma Coatings on Models of Meteoroid Protection Screen Elements. *Mashinostroenie i Tekhnosfera XXI Veka. Sbornik Trudov XXI Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii, Sevastopol' 15–20 Sentyabrya 2014 g.* [Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI Century. Collection of works International Scientific and Technical Conference, Sevastopol, September 15–20]. Donetsk, MCM Publ., 206–208 (in Russian).
  2. Devoino O. G., Okovity V. V. (2015) Plasma Thermal Barrier Coatings Based on Zirconium Dioxide with High Thermal Stability. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (1), 35–39 (in Russian).
  3. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Okovity V. V., Sobolevski S. B. (2015) Development of Technology for Application of Plasma Composite Coatings Based on Zirconium Dioxide for Spacecraft Systems. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (3), 5–9 (in Russian).
  4. Okovity V. V. (2015) Selection of Oxides for Stabilization of Zirconium Dioxide while Obtaining Thermal Barrier Coatings. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (5), 26–32 (in Russian).
  5. Devoino O. G., Okovity V. V. (2015) High-Energy Treatment of Plasma Coatings Based on Zirconium Dioxide. *Innovatsii v Mashinostroenii (InMash-2015): VII Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., 23–25 sent. 2015 g., Kemerovo: sb. tr.* [Innovations in Mechanical Engineering (InMash-2015): Proceedings of Scientific and Technical Conference, 23–25 sept. 2015 g., Kemerovo]. Kemerovo, Kuzbass State Technical University, 332–335 (in Russian).
  6. Kudinov V. V., Pekshev P. Yu., Belashchenko V. E., Kovalenko L. V. (1990) *Plasma Coating Deposition*. Moscow, Nauka Publ. 244 (in Russian).
  7. Antsiferov V. N., Shmakov A. M., Ageev S. S., Bulanov V. Ya. (1994) *Gas-Thermal Coatings*. Ekaterinburg, Nauka Publ. 324 (in Russian).
  8. Kupriyanov I. L. (1990) Gas-Thermal Coatings with High Adhesion Strength / I. L. Kupriyanov. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ. 254 (in Russian).
  9. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnukhin A. S., Nikitin M. D. (1985) *Gas-Thermal Spraying of Composite Powders*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 261 (in Russian).
  10. Il'yushchenko A. F., Ivashko V. S., Okovity V. A., Sobolevski S. B. (1998) *Thermal-Protective Coating Based on ZrO<sub>2</sub>*. Minsk, Publishing House "Remika". 128 (in Russian).
  11. Akishin A. I. (2007) *Space Material Science*. Moscow, Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics – Lomonosov Moscow State University. 209 (in Russian).
  12. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevski S. B. (2016) Formation and Research of Multi-Layer Composite Plasma Oxide Coatings Based on Elements of Screen Meteoroid Protection. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 15 (5), 357–364 (in Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364.
- Received: 06.03.2017  
Accepted: 29.05.2017  
Published online: 29.01.2018