

УДК 621.793.71

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ПОКРЫТИЙ ДИОКСИД ЦИРКОНИЯ - НИХРОМ**

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, доктор техн. наук, профессор,
Член-корреспондент НАН Беларуси
В.А. ОКОВИТЫЙ, канд. техн. наук
Е.Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО, канд. техн. наук, доцент
(БНТУ, г. Минск)

Пантелеенко Ф.И. – 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65
Белорусский национальный технический университет
e-mail: panteleyenkofi@tut.by

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 (КИП). Приведены результаты исследования микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, проведенные с использованием растровой электронной микроскопии. Рассмотрены микроструктуры поперечных сечений покрытия ZrO_2 и промежуточного слоя Ni-Cr.

Ключевые слова: плазменная струя, покрытия на элементах защитных экранов, коэффициент использования порошка, компрессионные плазменные потоки, кубическая модификация оксида циркония.

Введение

При рассмотрении эксплуатационных характеристик покрытий экранов, защищающих объекты от повреждений при высокоэнергетическом воздействии, одним из важнейших показателей является уровень 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. Значимыми факторами, влияющими на увеличение стойкости таких покрытий, являются высокая пластичность и вязкость. Повышение твердости резко снижает пластичность и вязкость, приводит к хрупкому разрушению. Наиболее часто применяемые конструкционные материалы для противометеорных экранов – это алюминиевые сплавы, титан, сталь. Более высокую противоударную стойкость проявляют многослойные структуры с твердым керамическим лицевым слоем и подслоем из вязкого металлического материала. Для получения лицевого керамического слоя антиметиоритных покрытий чаще всего используют оксидные композиции, в том числе на основе диоксида 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. Основное требование для обеспечения эффективной работы таких защитных элементов заключается в том, чтобы они позволяли существенным образом снизить кинетическую энергию налетающих микрочастиц, сохраняя при этом стабильность своей структуры. Исходя из этого, предложено формировать композиционные покрытия на основе оксида циркония с предварительным осаждением переходного вязкого подслоя на основе металлов, во-первых, повышающего адгезионную прочность сформированного покрытия к подложке, а во-вторых, обладающего иными по

сравнению с внешним покрытием вязко-пластическими свойствами [6-11], что приводит к значительному замедлению проходящих микрочастиц.

Методика

С целью повышения прочности поверхностного керамического слоя покрытия, который в первую очередь взаимодействует с налетающей микрочастицей, в работе предложено проводить его обработку компрессионными плазменными потоками с энергиями, обеспечивающими плавление приповерхностного слоя. Предполагается, что в результате такой модификации за счет процессов, связанных со скоростной кристаллизацией расплава, будет осуществляться формирование мелкокристаллической структуры, обладающей повышенными механическими свойствами. Структурно-фазовое состояние приповерхностного модифицированного слоя регулировалось параметрами самого компрессионно-плазменного воздействия, в частности, плотностью поглощенной энергии, давлением газа остаточной атмосферы, числом последовательных импульсов воздействия и др. Оптимизация напыления подслоя на основе NiCr проводилась по методике, описанной в источниках [12]. Исследования микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий проводили с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Результаты и обсуждение

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]. На первом этапе проводилась оптимизация процесса напыления вязкого металлического слоя на основе никель-хрома на основании получения максимального коэффициента использования материала. Вначале коэффициент использования порошка (КИП) определяли при различных значениях тока (300 – 650 А, с интервалом 50А) и расходах плазмообразующего газа (азота) 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 величины расхода плазмообразующего газа ($I=550$ А; $R_{N_2}=50$ л/мин) для различных фракций порошка (рис. 2). Очевидно, что увеличение силы тока и расхода плазмообразующего газа (рис. 1) до определенных значений приводят к увеличению КИП, т.к. эти параметры влияют на степень проплавления порошка [1-4]. Дальнейшее их увеличение 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. Похожая тенденция сохраняется и при изменении дистанции напыления (рис. 2) при оптимизации значения расхода N_2 и тока (в нашем случае $R_{N_2}=50$ л/мин, $I=550$ А). При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой $<t_{пл}$. Максимальный КИП наблюдается при $L=110$ 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 падает [5].

Таким образом, на оптимальных режимах для NiCr (расход плазмообразующего газа азота – 50 л/мин, сила тока – 550А, дистанция напыления -110 мм, фракция порошка 40-63 мкм, расход порошка 4,5 кг/час) получены покрытия с максимальным КИП – 85%.

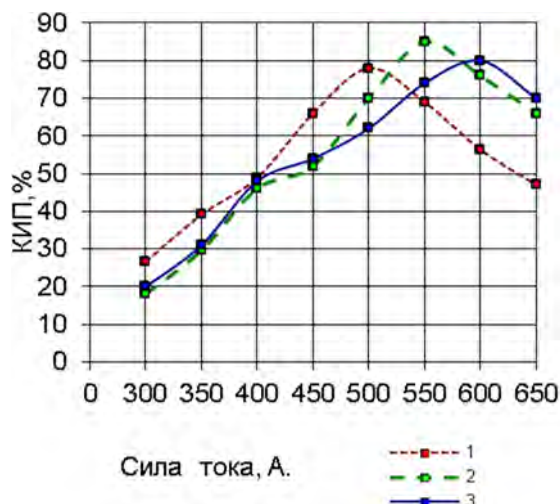


Рис. 1. Зависимость КИП, % от силы тока электрической дуги I , А для порошков NiCr с различными расходами плазмообразующего газа R_{N_2} : 1 – 55 л/мин.; 2 – 50 л/мин.; 3 – 45 л/мин.; ($L=110$ мм, $R_{пор.}=4,5$ кг/час, фракция порошка 40...63 мкм).

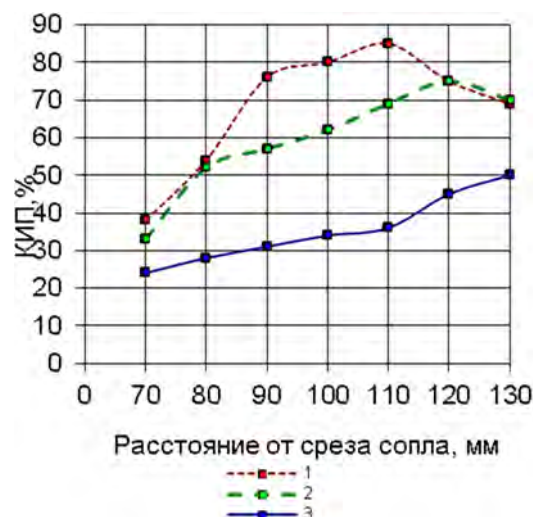


Рис. 2. Зависимость КИП, % от дистанции напыления L , мм для порошков NiCr: 1 – с фракцией 40...63 мкм; 2 – с фракцией 63...100 мкм; 3 – с фракцией 100...160 мкм; ($I=550$ А, $R_N=50$ л/мин, $R_{пор.}=4,5$ кг/час).

Следующим этапом являлась оптимизация процесса нанесения твердого слоя на основе диоксида циркония. На рисунках 3-4 представлены зависимости коэффициента использования распыляемого порошка (КИП, %) на основе диоксида циркония при плазменном напылении его на подслои из никельхрома от перечисленных выше условий напыления. Зависимость КИП, % от дистанции напыления показана на рисунке 3.

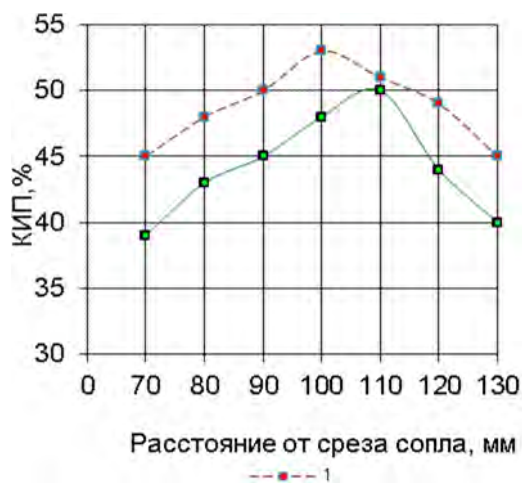


Рис. 3. Зависимость КИП, % от дистанции напыления L , мм для порошков ZrO_2 : 1- с фракцией < 50 мкм; 2- с фракцией 50–63 мкм; ($I=500$ А, $R_N=50$ л/мин, $R_{пор.}=4,5$ кг/час).

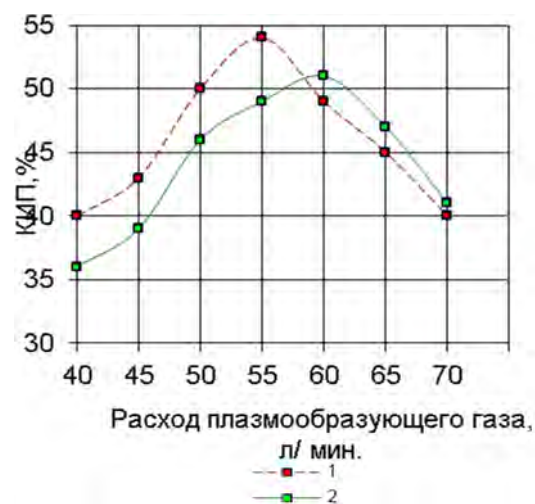


Рис. 4. Зависимость КИП, % от расхода плазмообразующего газа N_2 для порошков ZrO_2 : 1 – с фракцией < 50 мкм; 2 – с фракцией 50–63 мкм; ($L=100$ мм, $I=500$ А; $R_{пор.}=4,5$ кг/час).

При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой $<t_{пл.}$. В нашем случае возрастание КИП идет до $L=100$

мм для порошков ZrO_2 с фракцией < 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 переплавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИП падает [5]. Увеличение тока и расхода плазмообразующего газа до определенных значений (рисунок 4) приводят к увеличению КИП, т.к. эти параметры влияют на степень проплавления порошка [1-4]. Дальнейшее их увеличение приводит к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно, КИП уменьшается. При увеличении расхода N_2 происходит уменьшение значений силы 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.

Результаты исследования микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий представлены на рисунке 5. Из представленных данных видно, что толщина покрытия ZrO_2 составляет около 800 мкм. Между покрытием на основе оксида циркония ZrO_2 на изображении обнаружено наличие промежуточного подслоя, толщина и элементный состав которого были исследованы с помощью рентгеноспектрального микроанализа. Результаты, представленные на рисунке 6, указывают на то, что толщина подслоя составляет около 450 мкм. Элементный анализ позволил установить, что подслоем состоит из никеля и хрома. На рисунке 7 представлены РЭМ-изображения микроструктуры поперечных сечений покрытия ZrO_2 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.

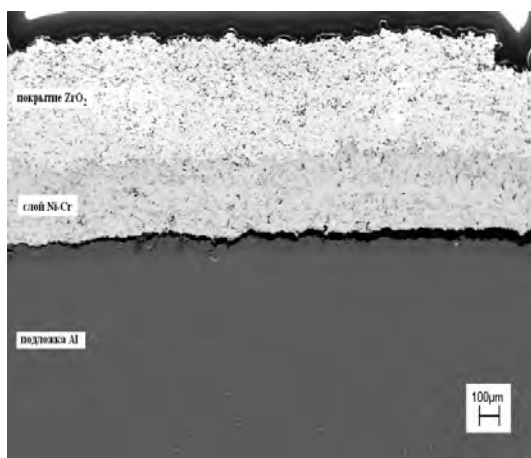


Рис. 5. РЭМ-изображение поперечного сечения покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками

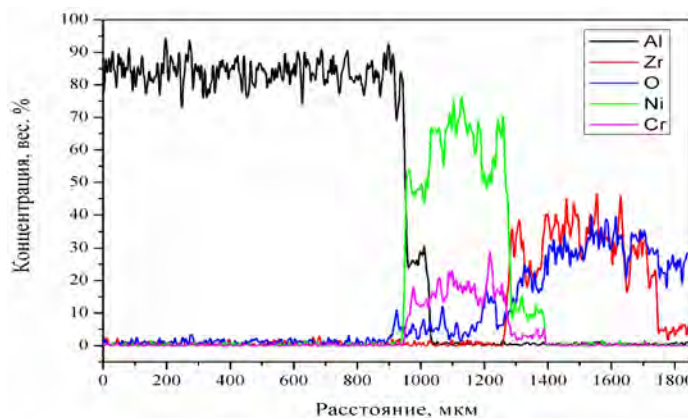


Рис. 6. РЭМ-изображение и распределение характеристического рентгеновского излучения элементов вдоль выделенной линии на поперечном шлифе покрытия

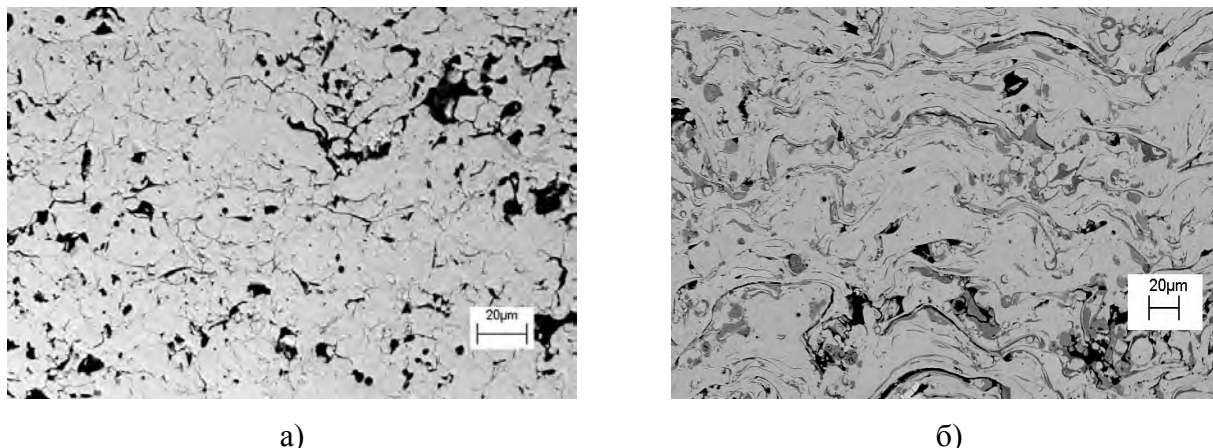


Рис. 7. РЭМ-изображение микроструктуры покрытия оксида циркония (а) и промежуточного слоя Ni-Cr (б) на поперечном шлифе

Выводы

Проведена оптимизация плазменного напыления двухслойных композиционных покрытий на основе никель-хрома и диоксида циркония на элементах защитных экранов с точки зрения получения максимального коэффициента использования порошка (КИП). Проведены исследования влияния параметров плазменной струи (ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка на характеристики покрытий. Результаты исследования микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, проведенные с использованием растровой электронной микроскопии показали, что напыленная структура представляет собой покрытие на основе оксида циркония ZrO_2 , толщиной покрытия ~ 800 мкм. Между покрытием и подложкой из алюминиевого сплава присутствует переходный вязкий слой из переходных металлов Ni-Cr, толщина которого составляет 450 мкм.

Список литературы

1. Оптимизация процесса напыления керамических плазменных покрытий на модели элементов экранов противометеорной защиты / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, В.А. Асташинский // Тезисы международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера 21 века», Севастополь, 15–20 сентября 2014 г. – Севастополь, 2014. – Т. 2. – С. 123–127.
2. Девойно О.Г., Оковитый В.В. Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью // Наука и техника. – Минск, 2014. – Вып. 6. – С. 3–10.
3. Разработка технологии нанесения плазменных композиционных покрытий на основе диоксида циркония для систем космических аппаратов / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, В.А. Асташинский, В.В. Оковитый, С.Б. Соболевский // Наука и техника. – Минск, 2015. – Вып. 3. – С. 5–9.
4. Оковитый В.В. Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий аппаратов // Наука и техника. – Минск, 2015. – Вып. 5. – С. 26–32.
5. Девойно О.Г., Оковитый В.В. Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий на основе диоксида циркония // Труды международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении». – Кемерово, 2015. – С. 332–335.

6. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко, О.П. Солоненко. – М.: Наука, 1990. – 244 с.
7. *Анциферов В.Н.* Газотермические покрытия. – Екатеринбург: Наука, 1994. – 324 с.
8. *Куприянов И.Л.* Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 254 с.
9. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М.Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 261 с.
10. Теплозащитные покрытия на основе ZrO_2 . / А.Ф. Ильющенко, В.С. Ивашко, В.А. Оковитый, С.Б. Соболевский. – Минск: Ремика, 1998. – 128 с.
11. *Акишин А.И.* Космическое материаловедение: методическое и учебное пособие. – М: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209 с.
12. Формирование и исследование многослойных композиционных оксидных плазменных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты для международного научно-технического журнала / В.А. Оковитый, Ф.И. Пантелеенко, О.Г. Девойно, В.В. Оковитый, В.М. Асташинский, П.П. Храмцов, М.Ю. Черник, В.В. Углов // Наука и техника. – Минск, 2016. – Вып. 5. – С. 357–364.

STUDY OF TWO-LAYER COMPOSITION ZIRCONIUM DIOXIDE-NICHROME PLASMA COATINGS

Panteleyenko F.I., D.Sc. (Engineering), Professor, Corresponding Member of National Academy of Sciences of the Republic of Belarus, e-mail: panteleyenkofi@tut.by

Okovity V.A., Ph.D. (Engineering), e-mail: vasil_ok@inbox.ru

Panteleyenko E.F., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: panteleyenko@inbox.ru

Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosty avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus

Abstract

The subject of this paper is the study results of the plasma jet parameters and the fractional composition of the initial powder influence on the characteristics of the two-layer composition coatings of the shielding elements, based on nickel-chromium and zirconium dioxide. Optimization based on obtaining the maximum rate of use of the powder (CIP) is carried out. The microstructure investigation results of the cross sections of coatings obtained are performed using scanning electron microscopy. The cross sections microstructure of ZrO_2 coating and intermediate Ni-Cr layer is examined.

Keywords

plasma jet, coatings on shielding elements, the ratio of powder use, compression plasma flows, cubic modification of zirconium oxide.