

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-5-10>

УДК 621.793.71

Плазматрон для нанесения покрытий

Канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾,

чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,

инж. В. В. Оковитый¹⁾,

чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В статье проанализированы причины применения для напыления жаростойких подслоев теплозащитных покрытий специальных конструкций плазматронов, способствующих минимальному содержанию кислорода в зоне напыления. Подробно описана разработанная авторами конструкция плазматрона с насадкой, позволяющая улучшить защиту плазменного потока от воздействия атмосферы. Внутрь насадки вдоль ее стенок через систему отверстий в концевой части насадки подается нагретый инертный газ (Ar). Воздух вокруг плазменной струи вытесняется, происходит дополнительное сжатие плазмы, в результате чего в покрытии уменьшается содержание кислорода и повышается эффективность осаждения материала. Дополнительное применение вольфрамовой вставки в электронном узле позволит создать пару вольфрам – вольфрам в электродном узле, что за счет высокой эрозионной стойкости, электропроводности, теплопроводности и достаточной прочности увеличит ресурс электродного узла в 2–2,5 раза при повышении производительности напыления из-за ужесточения режимов. Приведены результаты испытаний разработанного плазматрона и аналога на длительность непрерывной работы и интенсивность при токе 500 А, напряжении 70 В, расходе азота 45 л/мин (стандартный режим напыления оксидной керамики). На плазматронах при одинаковых параметрах напыления получены покрытия из порошка никель–хром–алюминий–иттрий и проведен сравнительный анализ технологических свойств. Разработанный плазматрон имеет более качественные характеристики плазменных подслоевых покрытий: увеличение прочности сцепления – в 1,4 раза, коэффициента использования материала – в 1,3 раза, микротвердости – в 1,3 раза, уменьшение пористости – в 2,3 раза.

Ключевые слова: плазменная струя, плазматрон, межэлектродная область, интенсивное окисление, покрытия, насадка, коэффициент использования порошка, прочность сцепления

Для цитирования: Плазматрон для нанесения покрытий / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 1. С. 5–10. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-5-10>

Plasmatron for Coatings

V. A. Okovity¹⁾, F. I. Panteleenko¹⁾, V. V. Okovity¹⁾, V. M. Astashinsky²⁾

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

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

Abstract. The paper analyzes reasons for application of plasma torches of special design for deposition of heat-resistant layers of thermal barrier coatings that contribute to minimum oxygen content in the zone of spraying. It contains detailed description of design for a plasma torch with a nozzle that allows better protection of a plasma stream against atmospheric exposure.

Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
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
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

Heated inert gas (Ar) is fed inside the nozzle along its walls through holes in its end part. Air around a plasma jet is displaced, additional compression of the plasma occurs and due to this oxygen content is decreased in a coating and efficiency of material deposition is increased. An additional use of a tungsten insert in an electronic node makes it possible to create a pair of tungsten – tungsten in an electrode assembly and the life of the electrode assembly will be increased due to high erosion resistance, electrical conductivity, thermal conductivity and sufficient strength in 2–2.5 times while increasing spray performance through toughening regimes. The paper presents testing results of the developed plasma torch and its prototype for duration of continuous operation and intensity at 500 A current, 70 V voltage, nitrogen flow rate of 45 l/min (standard mode for deposition of oxide ceramics). Coatings from nickel–chromium–aluminum–yttrium powder have been obtained while using plasma torches with the same parameters of deposition and a comparative analysis of the technological properties have been made in the paper. The developed plasma torch has more qualitative characteristics of subsurface plasma coatings: increase in adhesive strength – by 1.4 times, material utilization ratio – by 1.3 times, micro-hardness – by 1.3 times, porosity decrease – by 2.3 times.

Keywords: plasma jet, plasma torch, inter-electrode region, intensive oxidation, coating, nozzle, powder utilization ratio, adhesive strength

For citation: Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2019) Plasmatron for Coatings. *Science and Technique*. 18 (1), 5–10. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-5-10> (in Russian)

Введение

К недостаткам большинства современных плазмотронов для нанесения покрытий можно отнести: интенсивное турбулентное перемешивание потока плазмы с окружающим холодным газом, что приводит к уменьшению скорости и снижению температуры частиц напыляемого материала. В результате возрастает вероятность появления недогретых и окисленных частиц в зоне формирования покрытия. Это недопустимо при напылении жаростойких подслоев на основе М-кролей (металл–хром–алюминий–иттрий (Me–Cr–Al–Y), где Me – (Ni, Co, Fe)) [1–5].

При напылении теплозащитных покрытий (ТЗП) вначале необходимо нанести жаростойкий подслон на основе М-кролей (Me–Cr–Al–Y (Yb, Ce, Hf)). Влияние реактивных элементов (Y – иттрия, Yb – иттербия, Ce – церия, Hf – гафния) на жаростойкость рассматриваемых сплавов обусловлено модифицирующим их воздействием на защитную оксидную пленку, а также изменением диффузионной подвижности атомов в сплаве. Для реализации защитных свойств оксидная пленка должна иметь:

1) низкую проницаемость для компонентов среды и сплава, что обеспечивает медленный рост ее толщины;

2) высокие физико-механические свойства, согласованные со свойствами металла-подложки, что необходимо для сохранения адгезии пленки в условиях частых теплосмен [5].

Характерной особенностью окисления жаростойких сплавов металл–хром–алюминий является встречная диффузия через оксидную пленку алюминия по направлению к внешней границе пленки и кислорода в сплав. В результате образование новых зерен оксидов происходит как на поверхности пленки, так и внутри

нее, т. е. на границах зерен уже существующих оксидов и на границе пленка – сплав. Наиболее значительным следствием внутреннего окисления в рассматриваемой пленке на жаростойких сплавах является увеличение ее объема, которое приводит к образованию сжимающих напряжений (главным образом, на границе раздела пленка – сплав) и несплошностей на границе раздела [6]. Именно эти несплошности инициируют отслаивание пленки при последующих теплосменах.

Увеличение жаростойкости сплавов при введении небольших добавок реактивных элементов – иттрия, иттербия, церия, гафния – связывают в первую очередь с резким ростом адгезионной прочности оксидной пленки при термоциклировании [4]. Однако увеличение концентрации реактивного элемента ограничено процессами охрупчивания сплава и ростом скорости диффузии кислорода [7–10]. Поэтому большинство MeCrAlY-сплавов имеют ограничения по содержанию кислорода до 0,05 %, и в качестве основных методов нанесения покрытий представляется целесообразным использовать вакуумные методы – напыление в динамическом вакууме (VPS) или электронно-лучевое физическое осаждение в вакууме (PVD) [5, 11–13]. Но поскольку это очень дорогое и редкое оборудование, для отработки технологий нанесения ТЗП в лабораторных условиях мы предлагаем использовать специальную насадку с контролируемой атмосферой, применение которой при напылении жаростойких подслоев способствует минимальному содержанию кислорода в зоне напыления.

Конструкция плазмотрона

Общий недостаток плазмотронов – интенсивное турбулентное перемешивание потока плазмы с окружающим холодным газом, что приводит к уменьшению скорости и сниже-

нию температуры частиц напыляемого материала [6, 7]. В результате возрастает вероятность появления недогретых частиц в зоне формирования покрытия, а также протекания неконтролируемых химических реакций с воздухом. Разработанная авторами конструкция плазмотрона с насадкой позволяет улучшить защиту плазменного потока от воздействия атмосферы [14–16], создать определенную систему подачи газа, позволяющую снизить содержание кислорода в плазменной струе и повысить эффективность нанесения покрытия.

В межэлектродной области происходят важнейшие физические процессы, которые оказывают большое влияние на общую характеристику сжатой дуги. Вследствие высокой температуры сжатой дуги и большой плотности тока электроды работают в очень тяжелых термических условиях. Температура поверхности электродов в местах локального контакта с плазмой может достигать 4000 К и выше. Поэтому материалы электродов должны обладать высокой эрозионной стойкостью, электропроводимостью, теплопроводностью и достаточной прочностью. Наиболее стойкими оказываются электроды, изготовленные из тугоплавких материалов (вольфрама, молибдена и др.) с присадками тория или лантана. Такие электроды имеют малую работу выхода, с них удается снимать большие плотности тока в течение длительного времени без заметной эрозии.

Причина износа медных сопел заключается в том, что на электродах опорное пятно дуги перемещается скачкообразно, т. е. в течение некоторого времени остается неподвижным (10^{-4} – 10^{-5} с). Это время определяется скоростью смещения приэлектродного участка дуги относительно неподвижного пятна и процессом шунтирования промежутка дуга – электрод. Глубина проникновения температурного поля для меди при времени 10^{-4} с составляет 0,30 мм, а для вольфрама – 0,19 мм [6, 7]. Поэтому применение вольфрамовой вставки позволит создать пару вольфрам – вольфрам в электродном узле и за счет высокой эрозионной стойкости, электропроводимости, теплопроводности и достаточной прочности повысить ресурс электродного узла в 2–2,5 раза при увеличении производительности напыления из-за ужесточения режимов (рост значений тока и напряжения на 20–30 % по сравнению с электродной парой вольфрам – медь).

Сущность разработанного плазмотрона поясняется на рис. 1. Плазмотрон для нанесения покрытия содержит катодный 1 и анодный 2 узлы, разделенные изолятором 3. Катодный узел состоит из катода 4, который с помощью цанги 5, закрепленной в цангодержателе 6, крепится в корпусе катодного узла. С помощью цанги производится регулировка зазора между катодом и соплом-анодом 7 в процессе эксплуатации плазмотрона по мере износа катода.

Анодный узел состоит из сопла-анода и корпуса анода 8, вставки в виде вольфрамовой втулки 9, на корпусе анода крепится гайка 10. В сопле-аноде и гайке 10 выполнено отверстие 11, в которое через инжектор 12 подается порошок, а к корпусу анода через гайку 10 прикреплена на резьбе насадка 13 для подачи нагретого инертного газа вдоль ее стенок через систему отверстий 14 в ее концевой части.

Работа плазмотрона происходит следующим образом. При подаче напряжения на электроды между соплом-анодом и катодом возникает электрическая дуга. Плазмообразующий газ азот через трубку 15 и канал 16 в корпусе катодного узла подается в разрядную камеру 17 плазмотрона, образованную катодом, изолятором 18 и соплом-анодом с вольфрамовой втулкой, ионизируется и с большой скоростью выходит из сопла-анода, образуя струю плазмы, в которую подается порошковый материал через инжектор, расположенный в канале сопла-анода и втулки 9. Для охлаждения плазмотрона используется дистиллированная вода, которая через штуцер 19 и трубку 20 попадает в полость корпуса катодного узла через отверстие в изоляторе 3, проходит в полости 21 корпуса анода и охлаждает сопло-анод. Затем через трубку 22 и штуцер 23 происходит слив нагретой воды. Внутри насадки вдоль ее стенок через систему отверстий в концевой части насадки подается нагретый инертный газ (Ar) через штуцер 24. Воздух вокруг плазменной струи вытесняется, происходит дополнительное сжатие плазмы, в результате чего в покрытии уменьшается содержание кислорода и повышается эффективность осаждения материала. В случае напыления подслоя порошков на основе никеля они равномерно распределяются по сечению плазменной струи и формируют качественное покрытие.

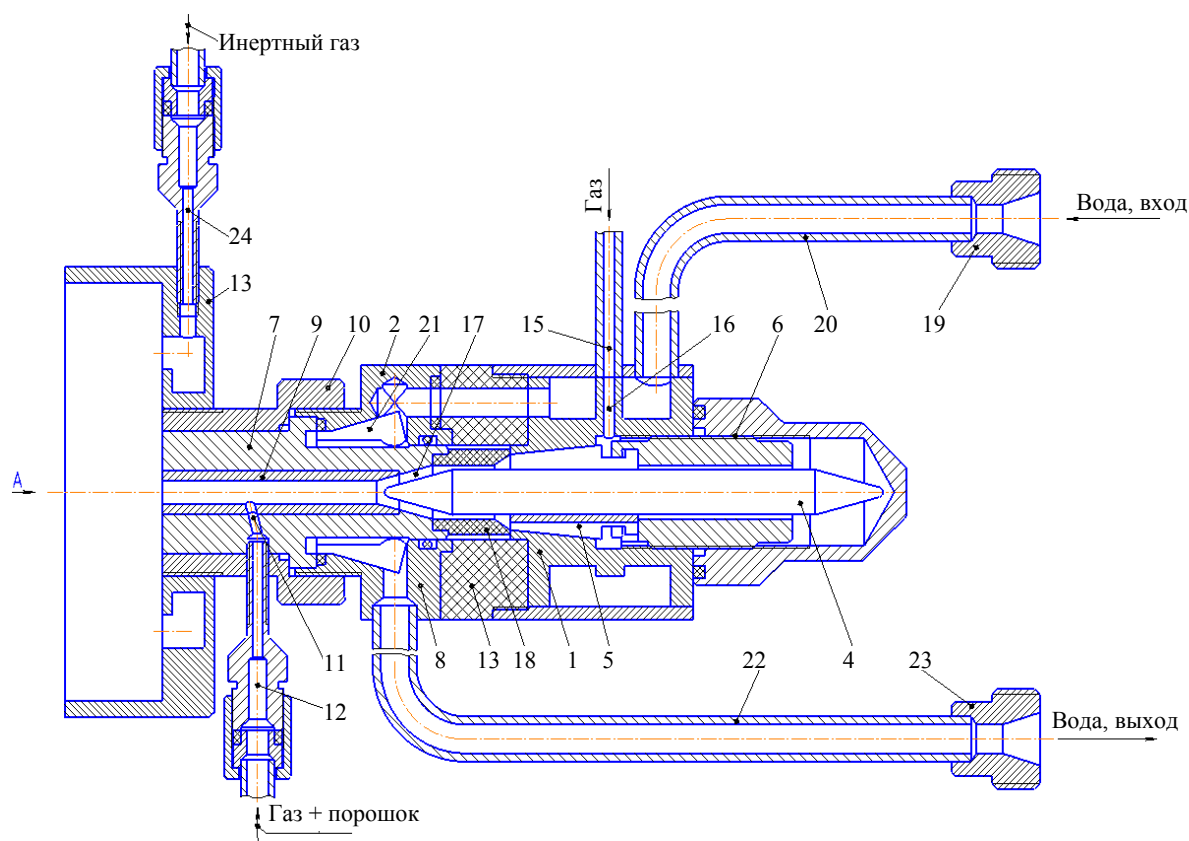


Рис. 1. Плазматрон для нанесения покрытий
 Fig. 1. Plasmatron for coatings

Работа плазматрона

На установке УПУ-3Д стандартной комплектации с порошковым питателем TWIN-10 производили испытания стандартного плазматрона и плазматрона, разработанного авторами. В качестве рабочего газа использовали азот. Обобщенную количественную информацию о пористости плазменных покрытий получали с помощью полуавтоматического анализатора изображения (MOP-AM03, Auto Scan). Замеры микротвердости (ГОСТ 9450-76) выполняли в пяти поясах по длине поперечного сечения покрытия толщиной 0,5–0,6 мм. Применяли микротвердомер Micromet 2 фирмы Bühler (Швейцария) с нагрузкой 100 г на индентор. Прочность сцепления определяли на отрывной машине Instron. Количественные оценки параметров получали как усредненные по пяти измерениям. Коэффициент использования материала определяли на стальных образцах размерами 30×30×2 мм, прошедших струйно-абразивную подготовку и имеющих в цен-

тре четко обозначенную зону для напыления (15×15 мм).

На первом этапе плазматроны испытывали на длительность непрерывной работы при токе 500 А, напряжении 70 В, расходе азота 45 л/мин (стандартный режим напыления оксидной керамики). Оба плазматрона работали непрерывно 25 ч (испытания прервали после интенсивных пульсаций параметров тока и напряжения плазматрона-прототипа). После разборки были выявлены существенные изменения в геометрии катодно-анодного узла плазматрона: значительное оплавление и вырывы внутри медного сопла-анода. Все это приводит к изменению заглубления электрода-катода в сопле и соответственно – к пульсации параметров плазматрона. В геометрии катодно-анодного узла разработанного плазматрона заметные изменения не были выявлены.

На втором этапе на тех же режимах плазматроны работали по схеме: работа в течение 30 мин, отключение, включение и т. д. (обычно 30 мин – технологическое время для напыления под-

слоя теплозащитного покрытия на турбинные лопатки). Плазматрон-прототип вышел из строя через 7 ч работы (14 технологических циклов) – не происходил поджиг электрической дуги за счет сильного износа медного сопла-анода. Испытания разработанного плазмотрона прекратили после 14 ч работы (28 технологических циклов).

На третьем этапе испытания плазмотронов проводили на коэффициент использования материала при следующих параметрах: ток 500 А; напряжение 72 В; расход азота 45 л/мин; дистанция напыления 110 мм; фракция порошка 40–63 мкм; расход порошка 4 кг/ч (стандартный режим напыления подслоя порошка никель–хром–алюминий–иттрий). Характеристики покрытий из порошка никель–хром–алюминий–иттрий, напыленных на плазматроне-прототипе и разработанном плазмотроне, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристики покрытий
из порошка никель–хром–алюминий–иттрий**
**Characteristics of coatings
from nickel-chrome-aluminium-yttrium powder**

Плазматрон	Прочность сцепления, МПа	Пористость, %	Коэффициент использования материала, %	Микротвердость, МПа
Стандартный	38,1	2,5	68,0	4680
Разработанный	54,4	1,1	88,0	6084

ВЫВОДЫ

1. Общий недостаток плазмотронов – интенсивное турбулентное перемешивание потока плазмы с окружающим холодным газом, что приводит к уменьшению скорости и снижению температуры частиц напыляемого материала. В результате возрастает вероятность появления недогретых частиц в зоне формирования покрытия и протекания неконтролируемых химических реакций с воздухом, что недопустимо при напылении жаростойких подслоев на основе М-кролей (металл–хром–алюминий–иттрий (Me–Cr–Al–Y), где Me – (Ni, Co, Fe)).

2. Разработанный авторами плазматрон с насадкой позволяет улучшить защиту плазмен-

ного потока от воздействия атмосферы. Внутрь насадки вдоль ее стенок через систему отверстий в концевой части насадки подается нагретый инертный газ (Ar). Воздух вокруг плазменной струи вытесняется, происходит дополнительное сжатие плазмы, в результате чего в покрытии уменьшается содержание кислорода и повышается эффективность осаждения материала.

3. Как видно из проведенных экспериментов, разработанный плазматрон имеет более качественные характеристики плазменных подслоевых покрытий: увеличение прочности сцепления – в 1,4 раза, коэффициента использования материала – в 1,3 раза, микротвердости – в 1,3 раза, уменьшение пористости – в 2,3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. М.: Наука, 1990. 406 с.
2. Газотермические покрытия / В. Н. Анциферов [и др.]. Екатеринбург: Наука, 1994. 317 с.
3. Куприянов, И. Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И. Л. Куприянов, М. А. Геллер. Минск: Наука і техника, 1990. 175 с.
4. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. Ленинград: Машиностроение, 1985. 199 с.
5. Теплозащитные покрытия на основе ZrO₂ / А. Ф. Ильющенко [и др.]. Минск: Ремика, 1998. 128 с.
6. Акишин, А. И. Космическое материаловедение / А. И. Акишин. М.: НИИЯФ МГУ, 2007. С. 209.
7. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справ. / Ю. С. Борисов [и др.]. Киев: Наук. думка, 1987. 544 с.
8. Оптимизация процесса напыления керамических плазменных покрытий на модели элементов экранов противометеорной защиты / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XXI Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 15–20 сент. 2014 г. Донецк, 2014. Т. 2. С. 123–127.
9. 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.
10. 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. 3–9.
11. 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.
12. Девойно, О. Г. Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий на основе диоксида циркония /

- О. Г. Девойно, В. В. Оковитый // Инновации в машиностроении: труды Междунар. науч.-техн. конф. Кемерово, 2015. С. 332–335.
13. 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. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364>.
 14. Плазматрон для нанесения покрытий: пат. 14906 Респ. Беларусь, МПК С23С4/04 / В. А. Оковитый, А. И. Шевцов, О. Г. Девойно, В. В. Оковитый. Опубл.: 30.10.10.
 15. Плазматрон для нанесения покрытия: пат. на полезную модель 9423 Респ. Беларусь, МПК Н 05Н 1/00 / В. В. Оковитый. Опубл.: 30.08.2013.
 16. Плазматрон для нанесения покрытий: пат. 21914 Респ. Беларусь, МПК Н 05Н 1/00 / В. В. Оковитый, О. Г. Девойно, В. А. Оковитый, В. М. Асташинский. Опубл.: 30.06.2018.
- Поступила 02.04.2018
Подписана в печать 04.06.2018
Опубликована онлайн 30.01.2019
- REFERENCES
1. Kudinov V. V., Pekshev P. Yu., Belashchenko V. E., Solonenko O. P., Safiullin V. A. (1990) *Plasma Coating*. Moscow, Nauka Publ. 406 (in Russian).
 2. Antsiferov V. N., Shmakov A. M., Ageev S. S., Bulanov V. Ya. (1994) *Thermal Spray Coatings*. Ekaterinburg, Nauka Publ. 317 (in Russian).
 3. Kupriyanov I. L., Geller M. A. (1990) *Thermal Spray Coatings with Enhanced Bond Strength*. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ. 175 (in Russian).
 4. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnukhin A. S., Nikitin M. D. (1985) *Thermal Spraying of Composite Powders*. Leningrad, Mashinostroenie. 199 (in Russian).
 5. Pyushchenko A. F., Ivashko V. S., Okovityi V. A., Sobolevskii S. B. (1998) *Heat-Shielding Coatings Based on ZrO₂*. Minsk, Remika Publ. 128 (in Russian).
 6. Akishin A. I. (2007) *Materials Science in Space*. Moscow, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics at Lomonosov Moscow State University. 209 (in Russian).
 7. Borisov Yu. S., Kharlamov Yu. A., Sidorenko S. L., Ardatovskaya E. N., Trefilov V. I. (1987) *Thermal Spray Coatings from Powder Materials*. Kiev, Naukova Dumka. 544 (in Russian).
 8. Panteleenko F. I., Okovityi V. A., Devoino O. G., Astashinskii V. A. (2014) Optimization of Process Pertaining to Deposition of Ceramic Coatings on Model of Anti-Meteor Protection Screen Elements. *Mashinostroenie i Tekhnosfera XXI Veka: Tezisy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., 15–20 Sent. 2014 g., g. Sevastopol'. T. 2* [Mechanical Engineering and Technosphere of the 21st Century: Abstracts of International Scientific and Technical Conference, September 15–20, 2014, Sevastopol. Vol. 2]. Donetsk, 123–127 (in Russian).
 9. Devoino O. G., Okovity V. V. (2015) Plasma Thermal Barrier Coatings Based on Zirconium Dioxide with High Thermal Stability. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (1), 35–39 (in Russian).
 10. 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 & Technique*, (3), 3–9 (in Russian).
 11. Okovity V. V. (2015) Selection of Oxides for Stabilization of Zirconium Dioxide while Obtaining Thermal Barrier Coatings. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 26–32 (in Russian).
 12. Devoino O. G., Okovity V. V. (2015) High-Energy Treatment of Plasma Coatings Based on Zirconium Dioxide. *Innovatsii v Mashinostroenii: Tr. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Innovations in Mechanical Engineering: Proceedings of International Scientific and Technical Conference]. Kemerovo, 332–335 (in Russian).
 13. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Y., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. Formation and Research of Multi-Layer Composite Plasma Oxide Coatings Based on Elements of Screen Meteoroid Protection. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (5), 357–364 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364>.
 14. Okovity V. A., Shevtsov A. I., Devoino O. G., Okovity V. V. (2010) *Plasmatron for Coating*. Patent No 14906 Republic of Belarus (in Russian).
 15. Okovity V. V. (2013) *Plasmatron for Coating*. Utility Model Patent No 9423 Republic of Belarus (in Russian).
 16. Okovity V. V., Devoino O. G., Okovity V. A., Astashynsky V. M. (2018) *Plasmatron for Coating*. Patent No 21914 Republic of Belarus (in Russian).

Received: 02.04.2018

Accepted: 04.06.2018

Published online: 30.01.2019