

УДК 621.793.71

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

*Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО<sup>1</sup>, доктор техн. наук, профессор,  
В. А. ОКОВИТЫЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
О. Г. ДЕВОЙНО<sup>1</sup>, доктор техн. наук, профессор,  
В. М. АСТАШИНСКИЙ<sup>2</sup>, доктор техн. наук, профессор,  
В. В. ОКОВИТЫЙ<sup>1</sup>, аспирант  
(<sup>1</sup>БНТУ, г. Минск, Беларусь, <sup>2</sup>ИТМО, г. Минск, Беларусь)*

Пантелеенко Ф.И. - 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65,  
Белорусский национальный технический университет  
e-mail: panteleyenkofi@mail.ru

**Аннотация:** В работе рассматривается процесс последующей высокоэнергетической обработки плазменных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики. При варьировании технологических параметров импульсно – плазменной обработки изменяли дистанцию воздействий импульсами и их суммарное количество. Эти технологические параметры оказывают влияние на толщину обработанных слоев покрытия. Для износостойких покрытий, являющихся объектом исследований, необходимы повышенные когезионная и адгезионная прочности. Поэтому суммарное количество импульсов должно обеспечить оплавление и уплотнение покрытий по всей толщине, что будет в полном объеме способствовать получению упрочненных структур. Покрытия обрабатывали импульсами плазменной струи, полученными с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнито-плазменный компрессор.

**Ключевые слова:** Плазменное напыление, импульсно – плазменная обработка, многофункциональная оксидная керамика, технологические параметры, износостойкие покрытия.

### Введение

Критерием оптимизации импульсно – плазменной обработки покрытий,  $Al_2O_3$ -30%  $Cr_2O_3$ -12,5%  $MoS_2$ , полученного методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием выбрана максимальная степень их оплавления и уплотнения, что достигается увеличением энергетического уровня теплового и ударно – волнового воздействия импульса при уменьшении дистанции воздействия до минимального значения. Вместе с тем уменьшение дистанции ограничивается появлением признаков разрушения покрытий (например, развиваются трещины). Импульсно – плазменную обработку напыленных покрытий проводили с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнито-плазменный компрессор (МПК). Преимуществом МПК по сравнению с другими типами ускорителей является высокая устойчивость генерируемого им компрессионного потока, возможность управления его составом, размерами и параметрами плазмы при длительности разряда, достаточной для практических применений [1,2]. Установка для получения компрессионных плазменных импульсов, генерируемых МПК

компактной геометрии, состоит из вакуумного блока, включающего камеру с системами откачки и напуска рабочего газа, разрядного устройства ускорителя, емкостного накопителя энергии, а также диагностического комплекса. Амплитудное значение разрядного тока МПК изменялось от 70 до 100 кА при увеличении начального напряжения накопителя энергии с 3 до 5 кВ. Длительность разряда при этом составляла ~ 150 мкс. Плотность энергии импульсных воздействий составляла  $(2 - 3) \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Плазменное напыление покрытий для последующей импульсно – плазменной обработки выполняли в воздушной атмосфере на установке УПУ - 3Д с порошковым питателем TWIN - 10. Толщина покрытий составляла 0,5 - 0,6 мм.

### Теория

При варьировании технологических параметров импульсно – плазменной обработки изменяли дистанцию воздействий импульсами и их суммарное количество [3-5]. Последний технологический параметр оказывает влияние на толщину обработанных слоев покрытия. Для износостойких покрытий, являющихся объектом исследований, необходимы повышенные когезионная и адгезионная прочности. Поэтому

суммарное количество импульсов должно обеспечить оплавление и уплотнение покрытий по всей толщине, что будет в полном объеме способствовать получению упрочненных структур. Покрытия обрабатывали импульсами плазменной струи, полученными с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор (МПК). Дистанцию обработки и суммарное количество импульсов варьировали с их оптимизацией по принятым критериям.

#### Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены результаты оптимизации дистанции обработки. Согласно данных таблицы 1, оптимальные дистанции импульсно-плазменной обработки покрытий для  $Al_2O_3$ -30%  $Cr_2O_3$ -12,5%MoS<sub>2</sub> - 0,07м. Об этом свидетельствует стабилизация пористости, желаемого уменьшения которой по критерию оптимизации при дистанциях ниже 0,06 м практически не происходит, что, объясняется кратковременностью тепловых и динамических импульсных воздействий (~ 200 мкс), а также значительным содержанием в покрытиях тугоплавкой фазы, препятствующей возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. Кроме

того, при дистанциях 0,05 м для  $Al_2O_3$ -30%  $Cr_2O_3$ -12,5%MoS<sub>2</sub> наблюдается разрушение покрытий с развитием макротрещин. Наряду с дистанцией обработки для формирования полностью оплавленных по всей толщине покрытий оптимизировали суммарное количество импульсов плазмы. Установлено, что необходимое и достаточное количество импульсов для полной обработки покрытий для,  $Al_2O_3$ -30%  $Cr_2O_3$ -12,5%MoS<sub>2</sub> полученными методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием 12 - 13 воздействий. Дополнительные импульсы нецелесообразны, так как их многократное повторение ухудшает геометрию поверхности покрытия и усложняет его заключительную механическую обработку. Микроструктура покрытия, полученного на оптимизированных режимах обработки, показана на рисунке 1. Как видно, слои покрытий представляют собой оплавленный металл - керамический материал. Имеет место достаточно равномерное распределение структурных элементов. Это способствует увеличению износостойкости нанесенных композиций. Заметны следы частиц твердых смазок, образующих покрытия.

Таблица 1 – Результаты исследований по оптимизации дистанции обработки

Покрытие	Дистанция импульсно-плазменной обработки, м	Показатель пористости, %
$Al_2O_3$ -30% $Cr_2O_3$ -12,5%MoS <sub>2</sub> (агломер.)	0,09	4,5 – 5,9
	0,08	3,8 – 5,1
	0,07	3,4 – 4,8
	0,06	3,1-4,7
	0,05	Разрушение покрытия

Указанный элементы структуры наблюдается в виде характерных непротравленных (светлых) оболочек. Сохранение после полета структуры распыляемых композиционных частиц в плазменной струе, соударения их с подложкой и после воздействий импульсами плазмы свидетельствует о том, что состав исходных

порошков не претерпевает существенных изменений при формировании покрытий. Это важно для получения необходимых эксплуатационных свойств наносимых материалов, которые дополнительно улучшаются за счет применения импульсно – плазменной обработки покрытий.

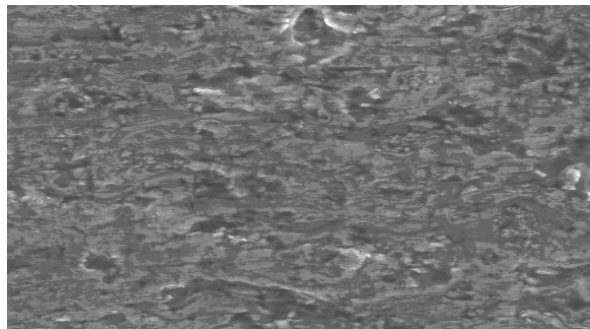


Рисунок 1 – Микроструктура покрытия  $Al_2O_3$ -30%  $Cr_2O_3$ -12,5%MoS<sub>2</sub>, полученного на оптимизированных режимах обработки

К особенностям структуры нанесенных композиций относится усложнение травления ее элементов. Увеличение количества непротравленных участков свидетельствует о наличии упрочненных аморфных или близких к ним нанокристаллических структур с высокой коррозионной стойкостью, практически нерастворимых в кислотных травителях. В соответствии с методическим подходом при изучении свойств покрытий анализировали изменение усредненной микротвердости нанесенных композиций. Согласно рис. 2 микротвердость напыленных материалов после применения импульсно – плазменной обработки

возросла в 1,15-1,23 раза, что объясняется более эффективным формированием фаз повышенной прочности с аморфной или близкой к ней нанокристаллической структурой. Эффективность обеспечивается локальным оплавлением и уплотнением слоев покрытий толщиной 30 – 40 мкм при их сверхбыстром охлаждении, а также отсутствием нежелательной рекристаллизации, что обусловлено развитием процессов импульсно - плазменной обработки вглубь покрытия (предыдущие уплотненные слои со сниженной пористостью и возросшей теплопроводностью не нагреваются до критических температур).

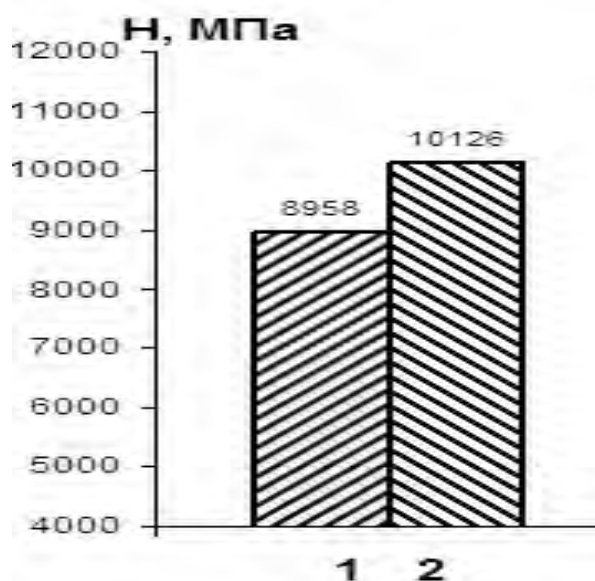


Рисунок 2 – Микротвердость покрытий  $Al_2O_3-30\%Cr_2O_3-12,5\%MoS_2$ :  
1– после плазменного напыления; 2– после импульсно – плазменной обработки напыленных материалов

**Выводы.** Проведены исследования и оптимизированы технологические параметры упрочняющей высокоэнергетической обработки напыленных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики с включениями твердой смазки, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием. Оптимизация выполнена при исследовании процессов структурообразования с оплавлением, уплотнением и высокоскоростным охлаждением покрытий. Критерием оптимизации режимов служила максимальная степень локального оплавления и уплотнения напыленных композиций в отсутствие признаков разрушения покрытий от воздействий импульсами плазмы. Энергия воздействий генерировалась с применением газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор (МПК) и твердотельного квазистационарного лазерного излучателя. Установлено, что оптимальные

дистанции импульсно-плазменной обработки покрытий для для  $Al_2O_3-30\% Cr_2O_3-12,5\%MoS_2$  - 0,07м. Об этом свидетельствует стабилизация пористости, желаемого уменьшения которой по критерию оптимизации при дистанциях ниже 0,06 м практически не происходит, что, объясняется кратковременностью тепловых и динамических импульсных воздействий (~ 200 мкс), а также значительным содержанием в покрытиях тугоплавкой фазы, препятствующей возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. Кроме того, при дистанциях 0,05 м для  $Al_2O_3-30\% Cr_2O_3-12,5\%Mo$  наблюдается разрушение покрытий с развитием макротрещин. Оптимальные плотности мощности излучения (W) при обработке композиций для  $Al_2O_3-30\%Cr_2O_3-12,5\%MoS_2$ , полученными методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием - в пределах  $(5,0 - 7,0) \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Об этом свидетельствует динамика возрастания степени оплавления,

уплотнения обработанных композиций и соответствующего изменения пористости, желаемого уменьшения которой (по критерию оптимизации) при  $W$  больше  $6,0$  и  $7,0 \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> практически не происходит. Снижение эффективности теплоотдачи объясняется значительным содержанием в покрытиях

тугоплавкой и твердой оксидной фазы (более 80%), препятствующей возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. Кроме того, при дальнейшем увеличении  $W$  наблюдается нежелательное тепловое разрушение поверхностей обрабатываемых материалов.

### Список литературы

1. Оковитый В.А. Модификация плазменных износостойких покрытий импульсным лазером / Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., Шевцов А.И., Девойно О.Г., Пантелеенко А.Ф., Оковитый В.В. // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. - Брест, 2009. - Вып.4(58). - С.49-53.

2. Оковитый В.А. Исследование процессов модификации плазменных износостойких плазменных покрытий импульсно-плазменной обработкой / Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., Ильюшенко А.Ф., Шевцов А.И., Асташинский В.М., Пантелеенко А.Ф., Оковитый В.В., // Вестник Белорусского национального технического университета. БНТУ - Минск, 2009. - Вып.5. - С 38-43.

3. Оковитый В.А. Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки / Оковитый В.А. // Сварочное производство-М., 2002. - №6. - С.41-43

4. Okovity V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant / Okovity V // J. Welding International. - 2003. - vol.16, № 11. - P. 918-920.

5. Оковитый В.А. Триботехнические испытания образцов аморфизированных плазменных композиционных покрытий с включением твердой смазки / Оковитый В.А., Шевцов А.И., Ильюшенко А.Ф., Девойно О.Г., Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.В. // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. - Брест, 2008. - Вып. - С.2-6.

## RESEARCH OF PROCESSES AND OPTIMIZATION THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PULSE-PLASMA TREATMENT PLASMA COATINGS OF MULTIFUNCTIONAL MATERIALS BASED ON OXIDE CERAMICS

Panteleenko F. I.<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), First Vice-Rector, e-mail: panteleyenkofi@mail.ru  
Okovity V. A.<sup>1</sup>, C.Sc. (Engineering), e-mail: okovas@gmail.com  
Devoino O. G.<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: [scvmed@bntu.by](mailto:scvmed@bntu.by)  
Astashinsky V. M.<sup>2</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: [ast@telegraf.by](mailto:ast@telegraf.by)  
Okovity V. V.<sup>1</sup>, e-mail: [vasil\\_ok@inbox.ru](mailto:vasil_ok@inbox.ru)

<sup>1</sup>Belarussian National Technical University, 65, avenue Nezavisimosty, Minsk, 220013, Belarus

<sup>2</sup>Heat And Mass Transfer Institute, 15, P. Brovka Str., Minsk 220072, Belarus

Abstract: The paper deals with the process followed by the high-energy plasma treatment of coating materials based on multi-functional oxide ceramics. By varying the process parameters of impulse - plasma treatment varied influences distance pulses and their total number. These process parameters affect the thickness of the treated coating layers. For wear resistant coatings, which are the subject of studies needed increased cohesive strength and adhesion. Therefore, the total number of pulses should provide reflow and seal the entire coating thickness, which will facilitate obtaining fully hardened structures. Coatings treated plasma jet pulses, obtained by the quasi-stationary gas-discharge type accelerator magneto-plasma compressor.

Keywords: plasma spraying, impulse - plasma treatment, multifunctional oxide ceramics, process parameters, wear - resistant coating.