

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474>

УДК 621.793.71

Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием

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, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В статье представлены исследования по влиянию технологических параметров высокоэнергетической обработки на эксплуатационные свойства порошковых покрытий из металлокерамики. Как пример высокоэнергетической модификации покрытий рассматривается применение импульсно-плазменной обработки. В качестве использованных порошковых материалов покрытий выбраны различные варианты карбидосодержащей керамики с добавлением твердой смазки на железной основе. Покрытия из карбидосодержащей керамики с добавлением твердой смазки в металлической матрице на железной основе разрабатываются для замены аналогичных с матрицей на никелевой основе. Такие факторы, как трещиностойкость, износостойкость, обрабатываемость, хрупкость, а также экономические составляющие, часто ограничивают применение порошковых материалов на основе карбидной керамики с добавлением твердой смазки в матрице на никелевой основе. Когда определяющим эксплуатационным ресурсом детали является только процесс изнашивания, такие порошковые материалы необходимо заменять на более дешевые порошковые материалы на основе карбидной керамики с добавлением твердой смазки в матрице на основе железа. Предлагаемые разработки повышают износостойкость плазменного покрытия благодаря введению в материал высокохромистой стали и молибдена. Формируется оптимальная пористость в исходной порошковой шихте при синтезе композиционных материалов FeCrMo–MoS₂–TiC, происходит улучшение технологических параметров порошковых материалов, возрастает их коэффициент использования при плазменном напылении, удешевляется технология нанесения износостойких плазменных покрытий. Добавка элемента Mo в связующее FeCr повышает смачивание расплавом связующего карбидов титана при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе разрабатываемого композиционного порошка. Последующая послойная обработка напыленных плазмой покрытий из порошков разработанной керамики с применением повторяющихся импульсов плазменных потоков с различными уровнями энергии дает возможность сконструировать строго определенные структуры при необходимой и регулируемой пористости, уменьшающейся в определенной последовательности от наружных обработанных слоев до основы. Такой тип обработки приводит к заметному увеличению износостойкости у обработанных поверхностей трения, повышает маслоудерживающую способность, к тому же формируется значительная адгезионная и соответственно когезионная прочность сформированных слоев, граничных с основой. В соответствии с методическими разработками при изменении технологических характеристик импульсно-плазменных воздействий варьировали дистанции обработки, общее количество воздействий. Общее количество импульсов плазмы влияет на создаваемую толщину слоев плазменного покрытия после обработки и способствует оплавлению с уплотнением полученных обработкой плазмой покрытий и созданию структуры с упрочненными характеристиками.

Ключевые слова: высокоэнергетическая обработка, плазменное напыление, материалы на основе металлокерамики, оптимизация процесса, модифицирование под воздействием компрессионных потоков, ударно-волновое воздействие импульса, степень оплавления и уплотнения, морфология, структура покрытия

Для цитирования: Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 6. С. 469–474. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474>

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

Formation of Plasma Powder Coatings from Cermet with Subsequent High-Energy Modification

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

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

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

Abstract. The paper presents research on the effect of technological parameters of high-energy processing on the performance properties of powder coatings made of cermet. The use of pulse-plasma treatment is considered as an example of high-energy modification of coatings. As used powder coating materials, various versions of carbide-containing ceramics with the addition of a solid lubricant in an iron-based metal matrix have been selected in the paper. Coatings of carbide-containing ceramics with the addition of a solid lubricant in an iron-based metal matrix are being developed to replace those of a nickel-based matrix. Such factors as crack resistance, wear resistance, workability, brittleness, as well as economic components often limit the use of powder materials based on carbide ceramics with the addition of solid lubricant in the matrix based on nickel. When only the wear process determines the service life of a part, such powder materials should be replaced with cheaper powder materials based on carbide ceramics with the addition of solid lubricant in an iron-based matrix. The proposed developments increase the wear resistance of the plasma coating due to the introduction of high-chromium steel and molybdenum into the material. Optimum porosity is formed in the initial powder mixture during the synthesis of FeCrMo–MoS₂–TiC composite materials, there is an improvement in the technological parameters of powder materials, their utilization rate in plasma spraying increases, and the technology of applying wear-resistant plasma coatings becomes cheaper. The addition of the Mo element to the FeCr binder increases the wetting of titanium carbides by the binder melt during self-propagating high-temperature synthesis of the developed composite powder. Subsequent layer-by-layer processing of plasma-sprayed coatings from powders of the developed ceramics using repetitive pulses of plasma flows using different energy levels makes it possible to create strictly defined structures with necessary and controlled porosity, which decreases in a certain sequence from the outer treated layers to the base. Such treatment contributes to a significant increase in the wear resistance of the treated friction surfaces, increases the oil holding capacity, in addition, an increased adhesive and cohesive strength of the formed layers bordering the substrate is formed. Processing distances, the total number of impacts have been varied in accordance with the methodological developments, when changing the applied technological characteristics of pulse-plasma effects. The total number of plasma pulses influences on the created thickness of the plasma coating layers after treatment and contributes to the melting with compaction of the coatings obtained by the plasma treatment and the creation of a structure with hardened characteristics.

Keywords: high-energy processing, plasma deposition, cermet-based materials, process optimization, modification under the influence of compression flows, shock-wave action of the pulse, degree of melting and compaction, morphology, coating structure

For citation: Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2020) Formation of Plasma Powder Coatings from Cermet with Subsequent High-Energy Modification. *Science and Technique*. 19 (6), 469–474. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474> (in Russian)

Введение

Одна из важнейших причин выхода из строя деталей с плазменными покрытиями – термомеханические напряжения, которые возникают из-за рассогласования коэффициентов термического расширения металла основы детали и керамического напыленного слоя, а также из-за неравномерности при распределении температурного поля в плазменном покрытии [1–3]. В результате напыления исходных порошковых материалов высокотемпературная струя плазмы оказывает значительное влияние на химический состав наносимых композиционных порошковых частиц, что существенно снижает адгезионную и когезионную прочности покрытия, тем самым ухудшая эксплуатационные ха-

рактеристики. Следовательно, для получения качественных плазменных покрытий необходима разработка последующих технологических приемов для их упрочнения [4–6]. Уплотнение напыленных плазмой материалов с помощью высококонцентрированных потоков энергии (импульсов компрессионных плазменных потоков) будет способствовать повышению их качественных характеристик [7–9]. Последующая послойная обработка напыленных плазменных покрытий из порошков разработанной керамики повторяющимися импульсами плазмы при различных используемых уровнях энергии позволяет сконструировать в покрытии необходимые структуры при строго контролируемой пористости, уменьшая ее последовательно от наружных слоев к основе

у сконструированного плазменного покрытия [10, 11]. Это приводит к увеличению износостойкости, повышает маслоудерживающую способность полученных поверхностей трения и обеспечивает рост когезионной и адгезионной прочностей. Для реализации качественной высокоэнергетической обработки необходимо решить ряд задач:

- получить оптимальные технологические режимы от воздействий импульсов компрессионных плазменных потоков на сконструированные плазменные покрытия;
- проконтролировать формирование структуры и свойств у слоев, полученных плазменным напылением износостойких покрытий в процессе их модификации;
- создать технологически обоснованные рекомендации для повышения параметров износостойкости, главным образом, за счет использования различных уровней энергии при получении упрочненных структур.

Методика исследований импульсно-плазменной обработки

Полученная методика оптимизации параметров обработки при импульсно-плазменном воздействии основана на необходимости формирования в разрабатываемом покрытии упрочненно-износостойких структур при высокоэнергетическом воздействии. В случае однократного теплового воздействия импульсом происходит сверхбыстрое охлаждение участка покрытия из-за теплоотвода в основу (подложку) и переплав слоя плазменного покрытия порядка 30 мкм. Степень кратковременности оплавления композиции влияет на количество центров кристаллизации у материала. При сверхбыстром охлаждении оно способствует получению упрочненных структур. Последующее уплотнение и пластическая деформация сформированного износостойкого слоя могут получаться из-за ударно-волнового воздействия. Из [1–3] известно, что пластическое течение в кристаллах способствует приобретению полученным материалом характеристик, свойственных аморфным, и формированию специальных структур диссипации, в которых происходят изменение ближнего порядка атомов и их перераспределение. Возможность формирова-

ния таких структур напрямую связана со степенью пластической деформации и уплотнения. Чем больше степень, тем больше структур диссипации. На этом основании критерием при оптимизации импульсно-плазменной обработки выбрана максимальная степень уплотнения износостойких покрытий из карбидосодержащей керамики с добавлением твердой смазки на железной основе. Это достигается за счет изменения дистанции воздействия до минимальных значений, что приводит к увеличению энергетического уровня при ударно-волновом и тепловом воздействиях импульса [11–13]. Однако разрушение плазменных покрытий (деградация) ограничивает уменьшение дистанции воздействия.

Исследования проводили на анализаторе изображения (MOP-AM03, AutoScan) и на металлографическом микроскопе MeF-3 (Reichert, Австрия). Измеряли микротвердость полученных покрытий как основного показателя, характеризующего формирование фаз с повышенной прочностью. Обработку компрессионной плазмой осуществляли при помощи магнитоплазменного компрессора (МПК), работающего в режиме «остаточного газа». В вакуумную камеру, предварительно откачанную, добавляли рабочий газ (азот) до заданного уровня давления. Его применение способствует образованию соединений типа MeV/MeN, а они, в свою очередь, повышают твердость и износостойкость полученной структуры. Характеристики процесса: плотность подводимой энергии при осуществляемых импульсных воздействиях порядка $(2-3) \cdot 10^5$ Вт/см²; значения амплитуды разрядного тока у магнитоплазменного компрессора – от 70 до 100 кА; необходимая длительность при разряде – 150 мкс. Процесс напыления осуществляли на универсальной плазменной установке УПУ-3Д, для подачи напыляемого материала использовали пистолет TWIN-10.

Обсуждение полученных результатов импульсно-плазменных воздействий на покрытия из металлокерамики

Варьировали количество импульсов, изменяющих толщину износостойких слоев покрытия после обработки, и дистанцию воздействия

импульсами при изменении технологических характеристик импульсно-плазменной обработки. Необходимость высоких характеристик когезионной и адгезионной прочности является основным требованием для износостойких плазменных покрытий. Поэтому для оплавления и уплотнения покрытий по всей толщине необходимо строго определенное количество импульсов.

В табл. 1 приведены результаты, полученные при оптимизации дистанции высокоэнергетического модифицирования.

Таблица 1

Данные оптимизации дистанции высокоэнергетической обработки

Optimization data of high-energy processing distance

Получаемое износостойкое покрытие	Расстояние при компрессионной плазменной обработке, м	Пористость, полученная в результате напыления, %
FeCr30Mo3 – 12 % (MoS ₂) – 30 % (TiC)	0,09	3,2–3,9
	0,08	2,4–3,0
	0,07	2,1–2,8
	0,06	2,0–2,6
	0,05	Деградация покрытия
FeCr30Mo3 – 12 % (MoS ₂) – 50 % (TiC)	0,09	4,1–4,5
	0,08	3,0–3,4
	0,07	2,7–3,3
	0,06	Появление трещин
FeCr30Mo3 – 12 % (MoS ₂) – 70 % (TiC)	0,09	4,6–5,4
	0,08	4,0–4,7
	0,07	3,6–4,5
	0,06	Появление трещин

Оптимальным для импульсно-плазменных воздействий на материалы FeCr30Mo3 – 12 % (MoS₂) – 50 % (TiC) (и 70 % (TiC)) было расстояние (дистанция обработки) в пределах 0,08 м. Это подтверждает стабилизация эксплуатационной характеристики пористости, значительного уменьшения которой при расстояниях менее 0,08 м уже не происходит. Такая ситуация объясняется мгновенностью при динамическом и тепловом воздействиях импульса плазмы и наличием тугоплавких карбидных фаз (50 и 70 %) в получаемых покрытиях, многократно препятствующих возрастанию степени оплавления у исследуемых покрытий. При дистанциях ≤0,06 м отмечены заметное

разрушение исследуемых покрытий и образование макротрещин. Оптимальное расстояние импульсно-плазменной обработки 0,07 м свойственно покрытиям из порошкового материала FeCr30Mo3 – 12 % (MoS₂) – 30 % (TiC). Для того, чтобы получить полностью оплавленное покрытие, оптимизировали общее суммарное количество импульсов плазмы при высокоэнергетической обработке. Для оплавления без ухудшения геометрии поверхности покрытия для FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 30 % TiC необходимо 11–12 воздействий, для FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC – 13–14 воздействий, для FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 70 % TiC – 14–15 воздействий.

Технологические характеристики оптимизированных износостойких плазменных покрытий

Приведенная на рис. 1 микроструктура свойственна плазменному покрытию, сформированному при оптимизированных режимах высокоэнергетической обработки. Заметно, что слои полученных плазменных покрытий после высокоэнергетической обработки состоят из модифицированного металлокерамического материала. Достаточно равномерное распределение в покрытии структурных составляющих способствует повышению характеристик износостойкости нанесенных композиционных материалов. На рис. 1 исследуемой микроструктуры заметны следы расплавленных частичек, из которых сформировано модифицированное покрытие. Состав у сложных порошковых соединений карбидов, свойственный исходным материалам и полученный после высокоэнергетической обработки износостойких покрытий, значительно не меняется. Это важно при конструировании необходимых технологических свойств у нанесенных плазменным напылением износостойких порошковых композиций. Увеличение в покрытии количества нетравленных участков говорит о наличии упрочненных структурных составляющих с необходимой коррозионной стойкостью, практически не растворимых в кислотных травителях.

Проводили анализ усредненной микротвердости полученных износостойких композиций. После обработки импульсной плазмой микротвердость материалов увеличилась на 1040–1320 МПа (рис. 2).

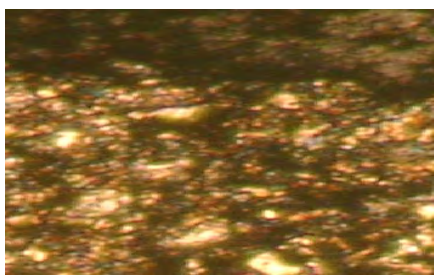


Рис. 1. Микроструктура FeCr30Mo3 – 12 % (MoS₂) – 50 % (TiC) покрытия после импульсно-плазменной обработки, ×500

Fig. 1. Microstructure of FeCr30Mo3 – 12 % (MoS₂) – 50 % (TiC) coating after pulse plasma treatment, ×500

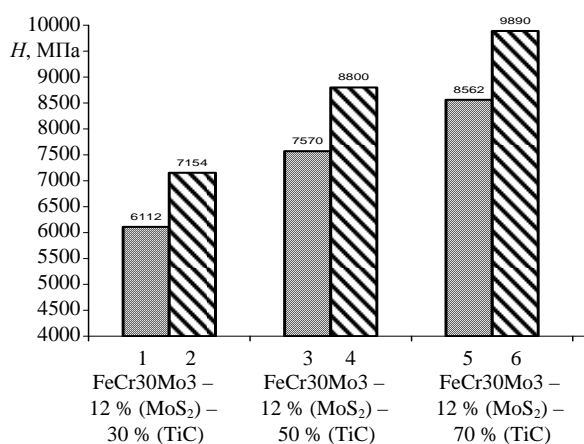


Рис. 2. Значения микротвердости износостойких покрытий из порошков металлокерамики:

1, 3, 5 – плазменное напыление;
2, 4, 6 – импульсно-плазменная обработка материалов
Fig. 2. Values of micro-hardness of wear-resistant coatings from cermet powders: 1, 3, 5 – plasma spraying;
2, 4, 6 – pulse-plasma treatment of materials

Такое можно объяснить эффективным формированием фазовых составляющих с повышенной прочностью. Рекристаллизация отсутствует, поскольку идет развитие процессов импульсно-плазменных воздействий вглубь полученного износостойкого покрытия. Предыдущие обработанные слои после уплотнения имеют пониженную общую пористость, что способствует повышению теплопроводности, поэтому они не смогут нагреться до высоких критических температур. Необходимая эффективность процесса высокоэнергетической обработки обеспечивается характером очень локального уплотнения (оплавления) у полученных износостойких слоев плазменных покрытий толщиной порядка 40–50 мкм, связанного с их последующим сверхбыстрым охлаждением.

ВЫВОДЫ

1. Осуществлена оптимизация важнейших технологических параметров высокоэнергетической модификации полученных износостойких покрытий, для чего использовались воздействия импульсов компрессионной плазмы. Износостойкие покрытия формировались порошковыми материалами FeCr30Mo3 – 12 % (MoS₂) – 30 % (TiC), FeCr30Mo3 – 12 % (MoS₂) – 50 % (TiC), FeCr30Mo3 – 12 % (MoS₂) – 70 % (TiC). В соответствии с разработанным методологическим подходом в качестве необходимых критериев при оптимизации режимов обработки выбрана максимальная степень локального уплотнения (оплавления) у напыленных порошковых композиций при полном отсутствии характерных признаков, подтверждающих факторы разрушения покрытия в случае воздействия компрессионной плазмы. Увеличение числа нетравленных участков свидетельствует о наличии упрочненных аморфных или нанокристаллических фаз.

2. При изменении технологических характеристик импульсно-плазменной обработки варьировали суммарное количество импульсов плазмы, влияющих на толщину износостойких слоев покрытия после обработки, и дистанцию при воздействиях импульсами плазмы. Износостойкие плазменные покрытия должны иметь высокие прочностные характеристики (когезионные и адгезионные). Следовательно, суммарное количество импульсов при обработке должно способствовать оплавлению (уплотнению) плазменных износостойких покрытий по всей толщине создаваемого слоя. Наиболее оптимальные дистанции при обработке импульсами компрессионной плазмы сконструированных износостойких покрытий – 0,07–0,08 м, а необходимое количество импульсов для полной обработки износостойких покрытий по всей толщине составляет 11–15. В структурах обработанного износостойкого покрытия достаточно равномерное распределение элементов, способствующих увеличению износостойкости сконструированных плазменных структур.

3. Параметр микротвердости у сконструированных материалов после компрессионной плазменной модификации увеличился до 1040–1320 МПа, чему в значительной мере поспособствовало формирование специальных аморфных фаз, обладающих повышенной прочностью.

ЛИТЕРАТУРА

- Газотермические покрытия / В. Н. Анциферов [и др.]. Екатеринбург: Наука, Урал. издат. фирма, 1994. 324 с.
 - Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. М.: Наука, 1990. 244 с.
 - Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. М.: Машиностроение, 1985. 261 с.
 - Разработка композиционного материала на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки для газотермического напыления / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Наука и техника. 2012. № 4. С. 17–21.
 - Исследование структуры плазменных износостойких покрытий на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Наука и техника. 2013. № 6. С. 15–21.
 - Исследование процессов обработки импульсами лазерного излучения плазменных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2014. № 4. С. 3–10.
 - Влияния температурного режима в системе покрытия-основание на формирование элементов неравновесных структур плазменных покрытий / В. А. Оковитый [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. тр. 2017. Т. 59, № 4. С. 43–47.
 - Пантелеенко, Ф. И. Анализ и выбор возможных вариантов напыления композиционных многослойных покрытий из порошков оксидной керамики на модели элементов экранов противометеорной защиты / Ф. И. Пантелеенко, В. В. Оковитый, В. А. Асташинский // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе, 11–17 сент. 2017 г. Донецк: ДонНТУ, 2017. С. 185–190.
 - Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический NiCr и твердый ZrO₂ слой) / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28>.
 - Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 3. С. 183–189. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-183-189>.
 - Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 5. С. 378–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389>.
 - Способ получения композиционного керамического материала: пат. Респ. Беларусь № 21217 / В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, Ф. А. Пантелеенко, В. В. Оковитый. Оpubл. 30.08.2017.
 - Способ получения композиционного керамического материала: пат. Респ. Беларусь № 21829 / В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, В. В. Оковитый, В. М. Асташинский. Оpubл. 30.04.2018.
- Поступила 01.07.2019
Подписана в печать 24.03.2020
Опубликована онлайн 30.11.2020
- Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnuhkhin A. S., Nikitin M. D. (1985) *Gas-Thermal Spraying of Composite Powders*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 261 (in Russian).
 - Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V. (2012) Creation of Composite Material on Basis of Oxide Ceramics with Inclusion of Solid Lubricant for Gas-Thermal Spraying. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (4), 17–21. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2012-04-78-82> (in Russian).
 - Panteleenko F. I., Okovity V. A., Talako T. L., Devoino O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V. (2013) Investigation of Plasma Wear Resistance Coating Structure on Basis of Oxide Ceramics with Inclusions of Solid Lubrication. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (6), 15–21 (in Russian).
 - Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V. (2014) Investigation of Processes on Treatment of Plasma Coatings Made of Materials Based on Multifunctional Oxide Ceramics with Laser Irradiation Impulses. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (4), 3–10 (in Russian).
 - Okovity A. V., Panteleenko F. I., Astashinsky V. M., Okovity V. V. (2017) Influence of Temperature Regime in the Coating-Basis System for Forming Elements of Non-Equilibrium Structures of Plasma Coatings. *Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering: International Collection of Scientific Papers*. Donetsk, Donetsk National Technical University, 59 (4), 43–47 (in Russian).
 - Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. Analysis and Selection of Possible Options for Spraying Composite Multilayer Coatings of Oxide Ceramics Powders on the Model of Elements of Anti-Meteor Protection Screens. *Mashinostroenie i Tekhnosfera XXI Veka: Sbornik Trudov XXIV Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. v g. Sevastopole, 11–17 Sentyabr. 2017 g.* [Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI Century, Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference in Sevastopol, Sept. 12–17, 2017]. Donetsk, 185–190 (in Russian).
 - Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Shimansky V. I., Cherenda N. N., Sobolevsky S. B. (2018) Formation and Study of Plasma Spraying Double-Layer Composite Coatings (Viscous Metallic NiCr and Solid ZrO₂ Layer). *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (1), 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28> (in Russian).
 - Okovity V. A., Panteleenko F. I., Astashinsky V. M., Okovity V. V. (2018) Technological Specific Features on Formation of Plasma Powder Coatings from Ceramics with Non-Equilibrium Structure. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (3), 183–189. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-183-189> (in Russian).
 - Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V., Shimansky V. I., Cherenda N. N. (2018) Formation and Investigation of Plasma Powder Coatings Made of Oxide Ceramics Modified with High-Energy Effects. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (5), 378–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389> (in Russian).
 - Okovity V. A., Devoino O. G., Panteleenko F. A., Okovity V. V. (2017) *Method for Producing Composite Ceramic Material*. Patent Republic of Belarus No 21217 (in Russian).
 - Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2018) *Method for Producing a Composite Ceramic Material*. Patent Republic of Belarus No 21829 (in Russian).

Received: 01.07.2019

Accepted: 24.03.2020

Published online: 30.11.2020

REFERENCES

- Antsiferov V. N., Shmakov A. M., Ageev S. S., Bulanov V. Ya. (1994) *Gas-Thermal Coatings*. Yekaterinburg, Nauka, Ural Publishing Company. 324 (in Russian).
- Kudinov V. V., Pekshev P. Yu., Belashchenko V. E., Solonenko O. P., Safiullin V. A. (1990) *Plasma Coating*. Moscow, Nauka Publ. 244 (in Russian).