

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

*В.А. ОКОВИТЫЙ, канд. техн. наук
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, доктор техн. наук,
чл.-корр. НАН Беларуси
Т.Л. ТАЛАКО, канд. техн. наук
А.Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО, науч. сотруд.,
(БНТУ, г. Минск)*

Поступила 6 апреля 2015
Рецензирование 6 мая 2015
Принята к печати 15 мая 2015

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

Описан синтез композиционных СВС-порошков с компонентами твердой смазки. Проведены исследования порошков следующего состава: $Al_2O_3+30\%TiO_2+12,5\%MoS_2$; $Al_2O_3+30\%TiO_2+12,5\%CaF_2$. Синтез композиций осуществлялся в реакторе в режиме самораспространения без подвода энергии от внешнего источника, в азотно-кислородной среде при содержании кислорода от 10 до 25 мас.% и давлении 0,1...0,9 МПа, которая необходима для проведения реакции окисления порошка титана. Для сфероидизации частицы полученного композиционного порошка вводили в плазменную струю и производили их распыление в стальной цилиндр длиной 1 м, заполненный аргоном. Степень сфероидизации определяли по форм-фактору частиц методом оптической металлографии. Мощность плазменной струи изменяли от 30 до 40 кВт. Полученные порошки характеризуются сложной геометрической формой и развитым поверхностным рельефом частиц.

Ключевые слова: композиционные порошки, твердая смазка, синтез, сфероидизация частиц, плазменная струя, исследования порошков.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-39-45

Введение

Разработка и создание композиционных керамических материалов обусловлено необходимостью улучшения свойств износостойких плазменных покрытий, так как в отличие от механических смесей порошков только в композиционных порошках могут одновременно находиться в заданном состоянии разнородные по физическому и химическому составу вещества, элементы, соединения, что дает возможность достигать новых эффектов при использовании таких материалов для нанесения покрытий. Необходимо также отметить, что применяемая технология изготовления композиционного порошка должна также обеспечивать придание

частицам свойств, способствующих формированию заданной структуры покрытий [1–5]. Применение СВС-порошков для нанесения на изнашиваемые поверхности деталей путем плазменного напыления и последующей обработки высококонцентрированными потоками энергии должно обеспечить регулирование структурообразования и получение износостойких поверхностных слоев покрытий в сочетании с повышенной когезионной и адгезионной прочностью напыленного материала. Для этого при разработке научных основ и технологических принципов нанесения таких покрытий должны учитываться процессы и механизм синтеза исходных композиционных порошков, процессы и механизм формирования покрытий при плаз-

менном напылении композиций и последующем воздействии на них высококонцентрированными потоками энергии [6–8]. Успешные предварительные эксперименты по синтезу композиционных порошков показывают, что имеется принципиальная возможность получения таких порошков при соответствующей отработке технологии СВС [9–11]. Наиболее широкое применение для нанесения керамических покрытий, в том числе из материалов на основе оксида алюминия-оксида титана, получил метод плазменного напыления. Покрытия на основе оксида алюминия-оксида титана с добавками твердых смазок отличаются от покрытий из чистых оксидов лучшей пластичностью и повышенной стойкостью по отношению к ударным нагрузкам, а также обладают меньшими значениями пористости, равномерностью структуры и изотропностью свойств [12–15]. Снижение пористости покрытий системы объясняется тем, что при введении в высокотемпературную газовую струю композиционного материала в первую очередь плавится твердая смазка и обволакивает зерна оксида. Так как температура плавления твердых смазок меньше температуры плавления оксидов, то такое распределение компонентов в частице способствует лучшему «заплавлению» пор между частицами оксидов в покрытии, вследствие чего пористость покрытий уменьшается. Физико-механические свойства оксидных двух- и более компонентных покрытий существенно зависят от распределения компонентов в исходном порошке и формы частиц порошка.

Цель исследований – оптимизация процесса получения материала на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки для газотермического напыления методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Методика получения композиционного материала

Для проверки возможности получения СВС-порошков с компонентами твердой смазки осуществлен синтез композиций, содержащих MoS_2 , CaF_2 . Проведены исследования порошков следующего состава: $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12,5\%\text{MoS}_2$;

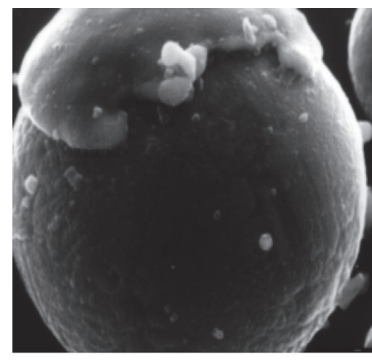
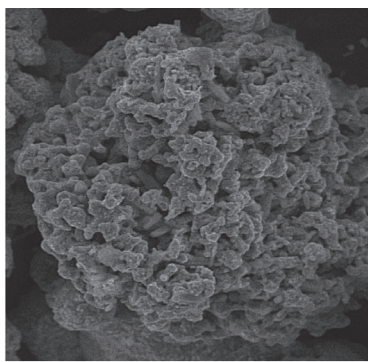
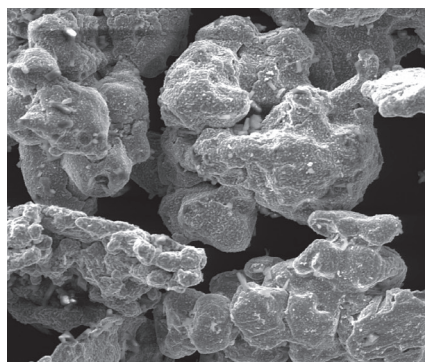
$\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12,5\%\text{CaF}_2$. Для получения указанных композиций использовались следующие дисперсные материалы: титан марки ПТМ, оксид алюминия марки ЭБМ-40, дисульфид молибдена MoS_2 или фтористый кальций CaF_2 , взятые в соотношении 57,5 : 30 : 12,5. Смешивание исходных компонентов выполнялось в шаровой мельнице при соотношении шаров и шихты 25 : 1 и времени мехактивации в течение 2–4 часов. Синтез композиций осуществлялся в реакторе в режиме самораспространения без подвода энергии от внешнего источника, в азотно-кислородной среде при содержании кислорода от 10 до 25 мас.% и давлении 0,1...0,9 МПа, которая необходима для проведения реакции окисления порошка титана. Реактор оснащен токоподводами с вольфрамовой спиралью для инициирования процесса. Использование при синтезе азотно-кислородной среды при содержании кислорода от 10 до 25 мас.% необходимо для проведения реакции окисления порошка титана. При содержании кислорода менее 10 мас.% и давлении менее 0,1 МПа не происходит полное окисление порошка и достаточное проникновение газа – реагента в слой шихты. При содержании кислорода более 25 мас.% и давлении более 0,9 МПа температура горения поднимается настолько, что происходит плавление частиц с образованием барьерного слоя, препятствующего проникновению газа реагента в слой шихты. Измельчение продуктов синтеза производили в щековой дробилке до получения фракции 0,050...0,063 мм, обеспечивающей напыление покрытий из оксидной керамики с максимальным коэффициентом использования материала. Операцию термохимической обработки в воздушной среде при температуре 500...800 °С в течение 4–6 часов проводят с целью доокисления частиц композиционного порошка. При температуре термохимической обработки менее 500 °С и времени менее четырех часов полного доокисления частиц не происходит, а проведение операции при температуре более 800 °С и времени более пяти часов приводит к увеличению энергозатрат и частичному спеканию частиц между собой [9, 10]. Для сфероидизации частицы полученного композиционного порошка вводили в плазменную струю и производили их распыление в стальной цилиндр, длиной 1 м, заполненный аргоном. Степень сфероидиза-

ции определяли по форм-фактору частиц (степень несферичности, значение 1 – соответствует сфере) методом оптической металлографии. Мощность плазменной струи изменяли от 30 до 40 кВт. При мощности плазменной струи менее 30 кВт более 50 % частиц имели форм-фактор менее 0,7, при мощности плазменной струи 40 кВт более 90 % частиц имеют форм-фактор 0,9...1. При повышении мощности плазменной струи свыше 40 кВт повышение значения форм-фактора частиц незначительно. Нанесение тонкопленочной оболочки из металла на частицы порошков $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12,5\%\text{MoS}_2$; $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12,5\%\text{CaF}_2$ осуществляли химическим никелированием. При выполнении основной операции использовался раствор следующего состава: никель хлористый – 28 г/л; гипофосфит натрия – 30 г/л; натрий лимоннокислый – 10 г/л; кислота уксусная – 10 мл/л. Температура раствора поддерживалась в пределах 363...368 К, pH составляла 9,0...9,5. Для получения равномерного покрытия частиц раствор с порошком в ванне подвергался принудительному перемешиванию, оптимальная продолжительность никелирования составляет 10–12 ч. За это время на частицах формируется тонкопленочная оболочка из Ni толщиной 6–7 мкм, которая является необходимой и достаточной по принятому критерию оптимизации плакирования порошков для плазменного напыления покрытий.

Результаты и обсуждение

Анализ размеров частиц, формы и рельефа поверхности синтезированных композиционных порошков осуществляли с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Изучение структуры частиц композиционных порошков производили путем металлофизического анализа шлифов их поперечного сечения на микроскопах «Unimet» (Япония) и MeF-3 (Австрия). Результаты металлографического анализа также учитывали при изучении размеров и формы частиц. Согласно данным металлографического анализа основными составляющими композиционных частиц являются оксидные фазы и включения твердой смазки в виде дисульфида молибдена или фтористого кальция (см. рисунок, а). Наличие упомянутых составляющих частиц порошков создает предпосылки получения из них износостойких покрытий, которые эффективны при молекулярно-механическом и абразивном изнашивании в неблагоприятных условиях трения (граничная смазка или отсутствие смазочного материала, повышенные температурные воздействия) [12, 13]. Рассматриваемые порошки характеризуются сложной геометрической формой и развитым поверхностным рельефом частиц. Склонность к образованию комков снижает «текучесть» порошковых материалов и их технологичность при плазменном напылении покрытий. Поэтому для улучшения технологических параметров порошков была осуществлена их сфероидизация [10] посредством введения частиц порошка в плазменную струю мощностью 30...40 кВт и распылением в среде аргона (см. рисунок, б) последующим плакированием (см. рисунок, в). Согласно рисунку, в на поверхностях частиц при плакировании порошков формируется сплошное покрытие (отдельные его микроучастки выкрошились при подготовке шлифов). Массовое содержание Ni-P в виде плакирующей оболочки составляет 30–40 %.



Микроструктура композиционного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12,5\%\text{MoS}_2$, полученных методом СВС:

а – после дробления ($\times 200$); б – после сфероидизации ($\times 400$); в – после плакирования ($\times 400$)

Покрyтия наносили на установке плазменно-го напыления на воздухе APS фирмы «Плазма-Техник АГ» на режимах, приведенных в табл. 1. Испытания на трение и износ проводились на машине трения СМЦ-2 по схеме: колодки с покрытием – чугунный ролик (СЧ24-44), колодки с покрытием – азотированная сталь (38ХЮА).

Триботехнические испытания проводились в условиях трения со смазкой и в отсутствие смазочного материала при нагрузке в паре трения 5 МПа в течение 10 часов. Данные параметров трения и износа покрытий из стандартных порошков и полученных по разработанному способу приведены в табл. 2.

Таблица 1

Режимы плазменного напыления

Распыляемый материал	Режимы напыления				
	Ток дуги плазмo-трона, А	Напря-жение дуга, В	Дис-танция напы-ления, мм	Расход плазмo-образующего газа (водород), л/мин	Расход распыляемого порошка, кг/ч
Ni80Cr20+12,5%MoS ₂ +55%TiC	400	75	120	10	3,0
Ni80Cr20+12,5%CaF ₂ +55%TiC	400	75	120	10	3,0
Al ₂ O ₃ +30%TiO ₂ +12,5%MoS ₂	450	80	110	12	3,5
Al ₂ O ₃ +30%TiO ₂ +12,5%CaF ₂	450	80	110	12	3,5

Расход плазмoобразующего газа (аргон) 50 л/мин.

Таблица 2

Трение и износ покрытий по чугуну и стали

Способ получения материала	Трение по чугуну				Трение по 38ХЮА Ст45			
	Трение со смазкой		Сухое трение		Трение со смазкой		Сухое трение	
	Износ покры-тия, мкм	Коэф-фициент трения	Износ покры-тия, мкм	Наг-рузка задира, кг	Износ покры-тия, мкм	Коэф-фициент трения	Износ покры-тия, мкм	Наг-рузка задира, кг
Ni80Cr20+12,5% MoS ₂ +55%TiC	1,2	0,011	10,2	5,8	1,9	0,03	6,1	6,9
Al ₂ O ₃ +30%TiO ₂ +12,5%MoS ₂	0,9	0,008	7,9	6,9	1,6	0,02	4,9	8,1

Выводы

Применение СВС-порошков для нанесения на изнашиваемые поверхности деталей путем плазменного напыления обеспечивает регулирование структурообразования и получение износостойких поверхностных слоев покрытий в сочетании с повышенной когезионной и адгезионной прочностью напыленного материала. Разработана технология получения композиционного материала на основе многофунк-

циональной оксидной керамики с включениями твердой смазки, который обладает хорошими технологическими характеристиками, устойчив к поддержанию химического состава в процессе плазменного напыления и способен формировать покрытия с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения. Плазменные покрытия, полученные из порошка Al₂O₃-30%TiO₂-12,5%MoS₂, изготовленного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, имеют в 1,2 раза больше износостой-

кость при трении со смазкой и в 1,3 раза – при сухом трении по чугуно и стали, чем покрытие, полученное из порошка $\text{Ni80Cr20-12,5\%MoS}_2\text{-55\%Ti}$. Таким образом, предложенный способ изготовления композиционного порошка на основе многофункциональной оксидной керамики позволяет повысить износостойкость покрытий.

Список литературы

1. Амелин Д.В., Рымов Е.В. Новые способы восстановления и упрочнения деталей машин. – М.: Агропромиздат, 1987. – 151 с.
2. Цеев Н.А., Козелкин В.В., Гуров А.А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме: справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 188 с.
3. Брейтуэйт Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия / пер. с англ. С.Д. Ключнев; под ред. В.В. Сеницына. – М.: Химия, 1967. – 320 с.
4. Crankshaft repaired at 30 % saving // *Welding Journal*. – 1999. – Vol. 58, № 2. – P. 710–715.
5. Горик П.Н., Норов В.А., Rogov H.A. Плазменное напыление износостойких и антифрикционных покрытий // Автоматизация проектирования и производства изделий в машиностроении: тезисы докладов V международной научно-практической конференции, 14–17 мая 1996 г. – Луганск: Изд-во ВУГУ, 1996. – С. 196–206.
6. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Шевцов А.И. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов. – Минск: Беспринт, 2005. – 253 с.
7. Оковитый В.А. Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки // Сварочное производство. – 2002. – № 6. – С. 41–43.
8. Okovityi V.A. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant // *Welding International*. – 2002. – Vol. 16, iss. 11. – P. 918–920. – doi 10.1080/09507110209549638.
9. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В.А. Оковитый, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, Ф.И. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2008. – Вып. 31. – С. 156–162.
10. Керамический материал системы «оксид титана – оксид алюминия – твердая смазка» / В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 1. – С. 16–20.
11. Роль адгезии смазочного масла при граничной смазке / А.И. Шевцов, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко, В.М. Изоитко, К.В. Буйкус // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 3. – С. 350–354.
12. Исследование процессов трения и изнашивания газотермических композиционных покрытий, обработанных импульсами плазменной струи / А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, Ю.С. Фень, А.С. Козорез // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Тонпик, 2006. – Вып. 29. – С. 243–248.
13. Исследование параметров обработки импульсным лазером плазменных износостойких покрытий из плакированных композиционных порошков / А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.Н. Чумаков, Н.А. Босак // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2009. – Вып. 32. – С. 194–199.
14. Aspects of friction surfaces failure and prospects of strengthening of tribocouplings by gas-thermal spraying of composite self-lubricating coatings / A. Ilyuschenko, A. Shevtsov, I. Smurov, M. Ignatiev, E. Kovaliov // Proceedings of the 10th International Baltic Conference “Materials Engineering & Balttrib’2001”, 27–28 September 2001, Jūrmala, Latvia. – Riga, 2001. – P. 142–147.
15. К вопросу оптимизации технологических параметров газотермического напыления защитных покрытий / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, Г.Ф. Громыко // Сборник докладов 8 международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка», Минск, 10–12 апреля 2013 г.: в 2 ч. – Минск: Беларуская навука, 2013. – Ч. 2. – С. 239–245.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 39–45

The technology of producing a composite material based on a multifunctional oxide ceramics

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

Panteleenko F.I., D.Sc. (Engineering), Professor, Corresponding Member, National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: panteleyenkovfi@mail.ru

Talako T.L., Ph.D. (Engineering), Leading Researcher, e-mail: talako@tut.by

Panteleenko A.F., Scientific Associate, e-mail: alex_1895@mail.ru

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

Abstract

The synthesis of composite SHS powders with components of solid lubricant is described. The powders of the following composition: $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12.5\%\text{MoS}_2$; $\text{Al}_2\text{O}_3+30\%\text{TiO}_2+12.5\%\text{CaF}_2$ were investigated. The synthesis of compositions was carried out in a reactor using self-propagation mode without supply of energy from an external source in a nitrogen-oxygen atmosphere with an oxygen content of 10...25 wt.% and a pressure of 0.1...0.9 MPa. Such atmosphere is needed for the oxidation reaction of titanium powder. For spheroidization particles of the composite powder were added into the plasma jet and sprayed into a steel cylinder with a length of 1 m filled with argon. The degree of spheroidization was determined using the form factor of the particles by optical metallography. The power of the plasma jet was varied from 30 to 40 kW. The resulting powders are characterized by a complex geometric shape and the development of surface relief of the particles. Application of SHS powders, in contrast to the agglomerates, allows forming high-density coating of eutectic composition promoting improvement physical and mechanical properties. Parameters of friction and wear coatings consisting of carbide ceramic powders and ceramic oxide powders obtained by self-propagating high-temperature synthesis are investigated. The coatings obtained of powder $\text{Al}_2\text{O}_3-30\% \text{TiO}_2-12.5\% \text{MoS}_2$; produced by self-propagating high-temperature synthesis, are 1.2 times more wear-resistant with the lubricant and 1.3 times - under dry friction for cast iron and steel than the coating obtained from the powder $\text{Ni80Cr20-12.5\% MoS}_2-55\% \text{TiC}$.

Keywords:

composite powders, solid lubricant, synthesis, spheroidization of particles, plasma jet, powders investigation.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-39-45

References

1. Amelin D.V., Rymorov E.V. *Novye sposoby vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin* [The new methods of reducing and hardening of machine components]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 151 p.
2. Tseev N.A., Kozelkin V.V., Gurov A.A. *Materialy dlya uzlov sukhogo treniya, rabotayushchikh v vakuume. Spravochnik* [The materials for dry friction units that operated in vacuum. Reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 188 p.
3. Braithwaite E.R. *Solid Lubricants and Surfaces*. 1st ed. Oxford, Pergamon Press, 1964. 296 p. ISBN-10: 1483124398, ISBN-13: 978-1483124391 (Russ. ed. Breitueit E.R. *Tverdye smazochnye materialy i antifriktsionnye pokrytiya*. Translated from English S.D. Klyushnev. Ed. by V.V. Sinitsyna. Moscow, Khimiya Publ., 1967. 320 p.).
4. Crankshaft repaired at 30 % saving. *Welding Journal*, 1999, vol. 58, no. 2, pp. 710–715.
5. Gorik P.N., Norov V.A., Rogov N.A. [The plasma spraying of wear-resistant and antifriction coatings]. *Tezisy dokladov 5 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Avtomatizatsiya proektirovaniya i proizvodstva izdelii v mashinostroenii"* [Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference "The automation of design and producing of product in mechanical engineering"]. Lugansk, VUGU Publ., 1996, pp. 196–206. (In Russian)
6. Ilyuschenko A.F., Okovity V.A., Shevtsov A.I. *Formirovanie iznosostoikikh plazmennyykh pokrytii na osnove kompozitsionnykh samosmazyvayushchikhsya materialov* [The creation of wear-resistant plasma coatings on the base of composite self-lubricating materials]. Minsk, Besprint Publ., 2005. 253 p.

7. Okovity V.A. Plazmennye iznosostoikie pokrytiya s vklucheniem tverdoi smazki [Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant]. *Svarochnoe Proizvodstvo – Welding International*, 2002, vol. 49, iss. 6, pp. 41–43. (In Russian)

8. Okovityi V.A. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant. *Welding International*, 2002, vol. 16, iss. 11, pp. 918–920. doi: 10.1080/09507110209549638

9. Okovity V.A., Il'yushchenko A.F., Shevtsov A.I., Panteleenko F.I., Okovity V.A. [The production of composite ceramic material for wear-resistant coatings deposition]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2008, iss. 31, pp. 156–162. (In Russian)

10. Okovity V.A., Devoino O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. Keramicheskii material sistemy «oksid titana – oksid alyuminiya – tverdaya smazka» [The ceramic material system "titanium oxide – aluminum oxide – solid lubricant"]. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2011, no. 1, pp. 16–20.

11. Shevtsov A.I., Ivashko V.S., Ilyuschenko A.Ph., Izoitko V.M., Buykus K.V. Rol' adgezii smazochного masla pri granichnoi smazke [Role of adhesion of lubricating oil during friction at boundary lubrication]. *Trenie i iznos – Journal of Friction and Wear*, 1998, vol. 19, no. 3, pp. 350–354. (In Russian)

12. Shevtsov A.I., Ilyuschenko A.F., Okovity V.A., Fen' Yu.S., Kozorez A.S. [The study of friction and wear of gas-thermal composite coatings treated with pulses of plasma jet]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 2006, iss. 29, pp. 243–248. (In Russian)

13. Shevtsov A.I., Ilyuschenko A.F., Devoino O.G., Okovity V.A., Chumakov A.N., Bosak N.A. [Investigation of pulsed laser parameters when processing plasma wear-resistant coatings made of the clad composite powders]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov NAN Belarusi "Poroshkovaya metallurgiya"* [The Republican Interdepartmental Proceedings of NASB "Powder Metallurgy"], 2009, iss. 32, pp. 194–199. (In Russian)

14. Ilyuschenko A., Shevtsov A., Smurov I., Ignatiev M., Kovaliov E. Aspects of friction surfaces failure and prospects of strengthening of tribocouplings by gas-thermal spraying of composite self-lubricating coatings. *Proceedings of the 10th International Baltic Conference "Materials Engineering & Balttrib'2001"*, 27–28 September 2001, Jūrmala, Latvia. Riga, 2001, pp. 142–147.

15. Ilyuschenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.A., Gromyko G.F. [On the question of optimization of process parameters of thermal spraying coatings]. *Sbornik dokladov 8-go mezhdunarodnogo simpoziuma "Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka"*. V 2 ch. [Proceedings of 8th International Symposium "Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding", Minsk, April 10–12, 2013]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2013, pt. 2, pp. 239–245. (In Russian)

Received 6 April 2015

Revised 6 May 2015

Accepted 15 May 2015