

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

*В.А. ОКОВИТЫЙ, канд. техн. наук,
А.Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО, науч. сотрудник
(БНТУ, г. Минск)*

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

Пантелеенко А.Ф. – 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65,
Белорусский национальный технический университет,
e-mail: alex_1895@mail.ru

Проведена оптимизация параметров APS процесса для материалов $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$, $Al_2O_3-TiO_2-12\%(CaF_2-Ni)$, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Напыление износостойких покрытий из порошков оксид алюминия – оксид титана – твердая смазка, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза проводилось на установке плазменного напыления на воздухе. Такие покрытия характеризуются повышенной пластичностью, коррозионной стойкостью и стойкостью по отношению к ударным нагрузкам, а также обладают меньшими значениями пористости, равномерностью стальной структуры и изотропностью свойств. Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала и минимальной пористости покрытия.

Ключевые слова: износостойкие покрытия, оксидная керамика, твердая смазка, плазменное напыление, оптимизация параметров, коэффициент использования материала, пористость покрытия.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-46-54

Введение

Очевидно, что повышение надежности и долговечности деталей машин – это важнейшие факторы, обеспечивающие устойчивую работу машин и механизмов. Однако изготавливать детали полностью из материалов, обладающих высокой износостойкостью, прочностью, сложно и трудоемко, а в ряде случаев экономически или технологически нецелесообразно. В связи с этим за последнее время в технике значительное развитие получили методы нанесения покрытий, позволяющие создавать на поверхности детали покрытия (слои) с заданным комплексом физико-механических свойств, защищающих поверх-

ность детали от внешних факторов [1–4]. Разработка и создание композиционных керамических материалов обусловлены 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, спо-

собствующих формированию заданной структуры покрытий. Наиболее широкое применение для нанесения керамических покрытий, в том числе из материалов на основе оксида алюминия-оксида титана, получил метод плазменного напыления [3–6].

Покрытия на основе оксида алюминия-оксида титана с добавками твердой смазки 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 [7–11]. 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 [12]. Работоспособность нанесенных материалов определяется их структурой. Последняя в значительной степени зависит от оптимизации технологических параметров напыления и последующей обработки покрытий [13–15].

Цель нашего исследования – проведение оптимизации параметров плазменного напыления на воздухе износостойких покрытий на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на основании получения максимального коэффициента использования материала и минимальной пористости покрытия.

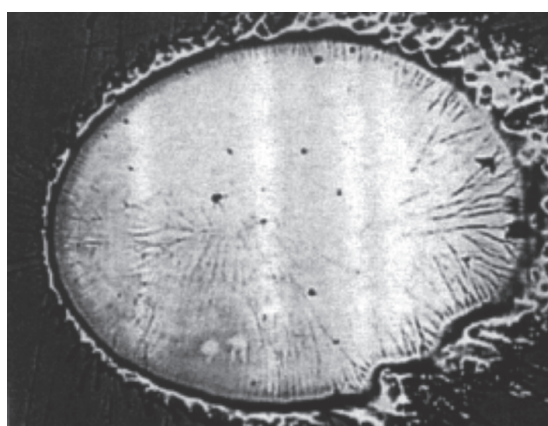
Результаты и обсуждение

Для повышения антифрикционных характеристик керамических износостойких плазменных покрытий в условиях высокотемпературной коррозии необходимо использование оксидной керамики, в частности композиционного керамического материала на основе оксид алюминия – оксид титана – плакированная никелем твердая

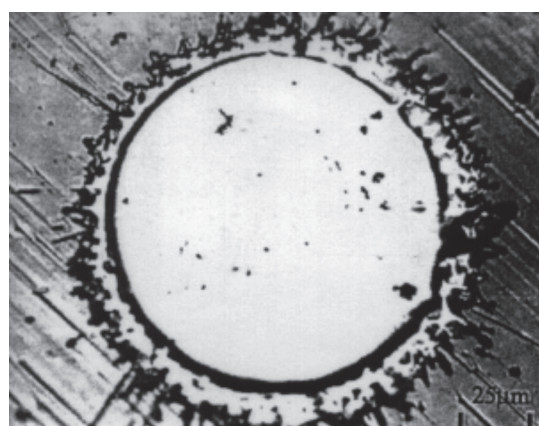
смазка [6–8]. Такие покрытия характеризуются повышенной пластичностью, коррозионной стойкостью и стойкостью по отношению к ударным нагрузкам, а также обладают меньшими значениями пористости, равномерностью структуры и изотропностью свойств. Необходимо также отметить, что применяемая технология изготовления композиционного порошка должна также обеспечивать придание частицам свойств, способствующих формированию заданной структуры покрытий. Содержание аморфной фазы в плазменных керамических покрытиях можно существенно изменить параметрами напыления или последующей термической обработкой. Повышенная прочность достигается усилением когезионных и адгезионных связей покрытия. Проводили плазменное напыление на основу из углеродистой стали, подвергнутую струйно-абразивной обработке, износостойких покрытий из порошков оксидной керамики с введением плакированной твердой смазки следующих составов: композиция $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$; композиция $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{CaF}_2\text{-Ni})$. Для плазменного напыления использовали порошки фракции $-100...+50$ мкм. Напыление износостойких покрытий из порошков оксид алюминия – оксид титана – твердая смазка, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) проводилось на установке плазменного напыления УПУ-3Д. Поверхность, подлежащая напылению, предварительно обрабатывалась электрокорундом циркониевым с размером зерен $0,1...0,2$ мм. Толщина слоя $0,5...0,6$ мм, расход порошка $3,5$ кг/ч. Исследовалось влияние величины тока (I), дистанции напыления и дисперсности порошков на свойства напыленных покрытий и коэффициент использования материала (КИМ). Оптимизация параметров APS процесса проводилась для материалов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. На первом этапе оптимизация проводилась плазменным напылением покрытий на полированные пластины металла с большой скоростью передвижения плазмотрона («сплэт-тест»),

в результате на подложке оказываются одиночные частицы материала (рис. 1). При рассмотрении в микроскоп можно заметить расплавленные, нерасплавленные или перегретые частицы. Затем на основании результатов были выбраны предварительные режимы напыления. Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала и минимальной пористости покрытия. КИМ и пористость определялись при различных значениях тока (400, 450, 500, 550 А), на постоянной дистанции напыления ($L = 100$ мм)

(рис. 2 и 3). Затем при постоянных значениях силы тока ($I = 400$ А) и значении расхода плазмообразующего газа азота для СВС-порошков 55 л/мин, для агломерированных порошков 50 л/мин, изменялось значение дистанции напыления L ($L = 80, 90, 100, 110, 120$ мм) (рис. 4). Для выявления влияния гранулометрического состава на свойства износостойких покрытий (твердость, прочность сцепления, коэффициент использования материала, пористость) были напылены серии образцов композиционными порошками фракциями $<50, 50 \dots 100, 100 \dots 200, >200$ (рис. 6–9).



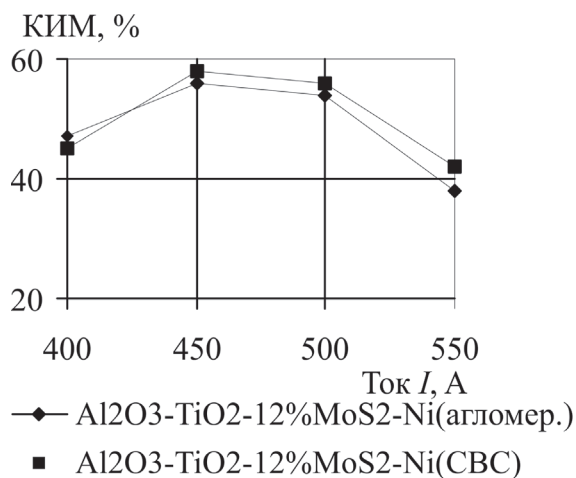
а



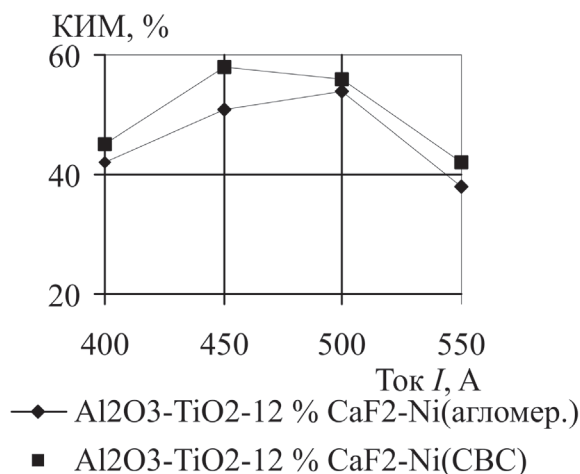
б

Рис. 1. «Сплэт-тест» порошков:

а – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-}12\%(\text{MoS}_2\text{-Ni})$, полученный методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием; б – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-}12\%(\text{MoS}_2\text{-Ni})$, полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза



а



б

Рис. 2. Влияние тока I на величину КИМ при дистанции напыления $L = 100$ мм:

а – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-}12\%(\text{MoS}_2\text{-Ni})$; б – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-}12\%(\text{CaF}_2\text{-Ni})$

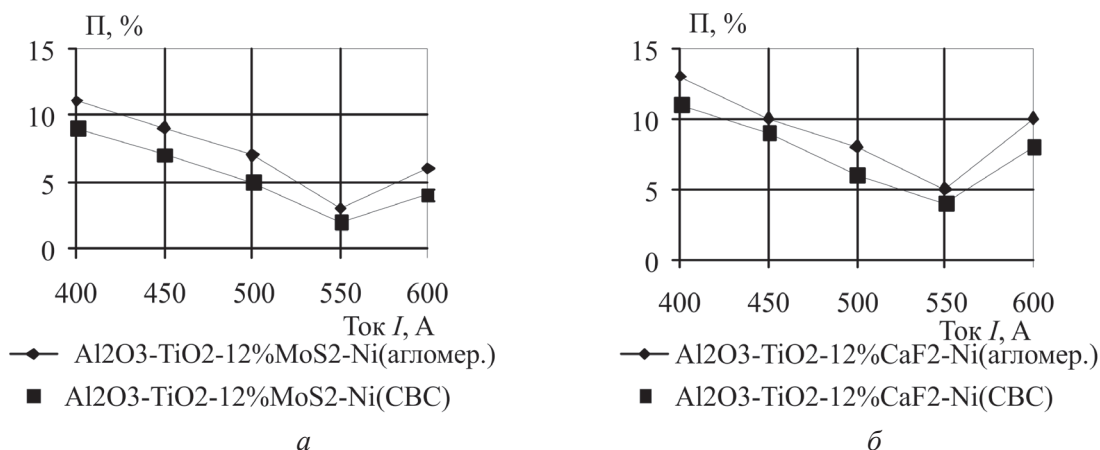


Рис. 3. Влияние тока I на пористость покрытия при дистанции напыления $L = 100$ мм:

$a - \text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$; $b - \text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{CaF}_2\text{-Ni})$

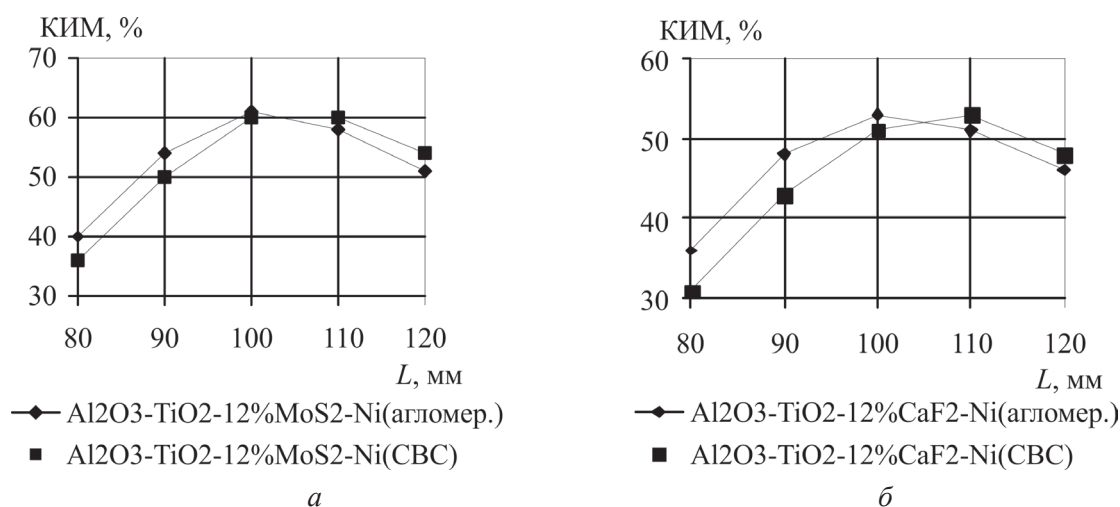


Рис. 4. Влияние дистанции напыления на величину КИМ ($I = 500$ А, расход плазмообразующего газа азота для CBC-порошков 55 л/мин, для агломерированных порошков 50 л/мин):

$a - \text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$; $b - \text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{CaF}_2\text{-Ni})$

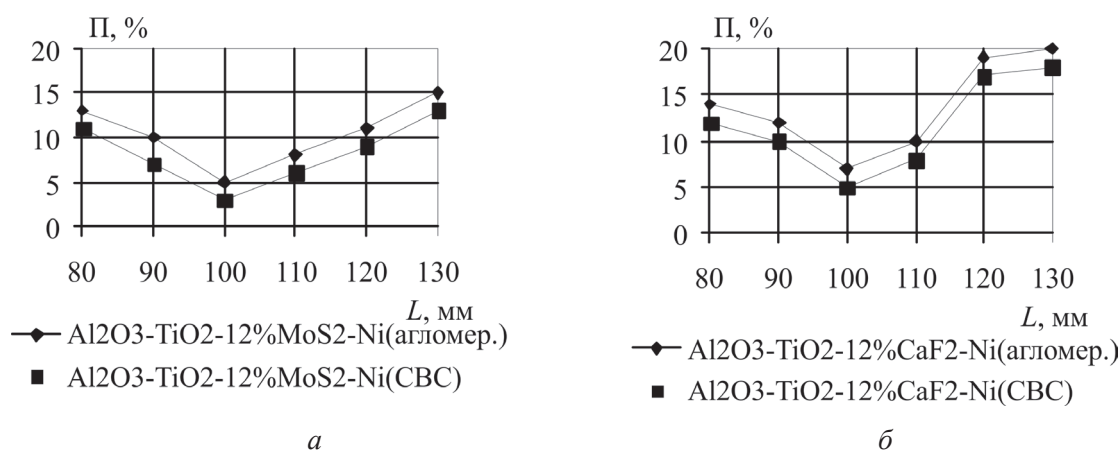


Рис. 5. Влияние дистанции напыления на величину пористости ($I = 500$ А, расход плазмообразующего газа азота для CBC-порошков 55 л/мин, для агломерированных порошков 50 л/мин):

$a - \text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$; $b - \text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{CaF}_2\text{-Ni})$

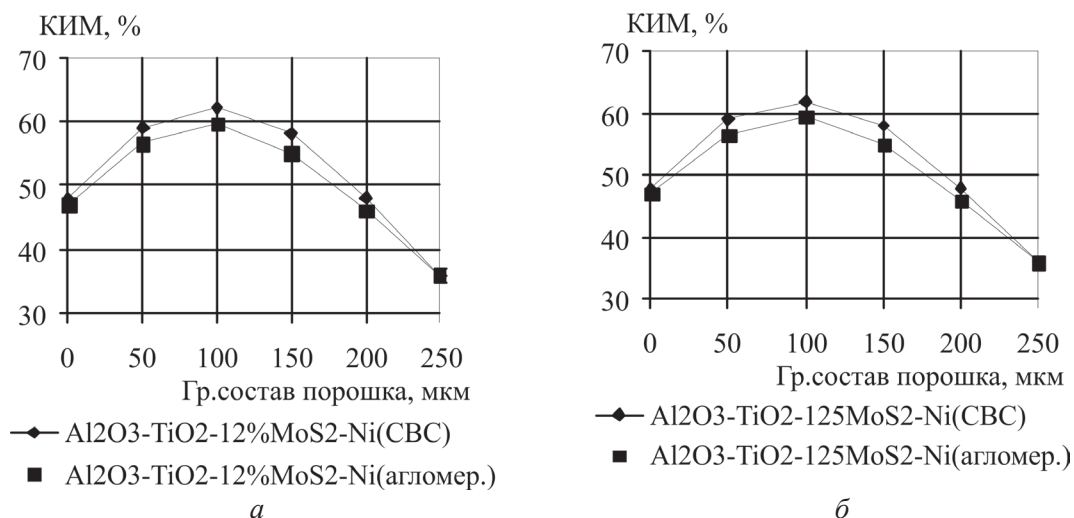


Рис. 6. Влияние гранулометрического состава порошка на коэффициент использования материала:

а – Al₂O₃-TiO₂-12%(MoS₂-Ni); б – Al₂O₃-TiO₂-12%(CaF₂-Ni)

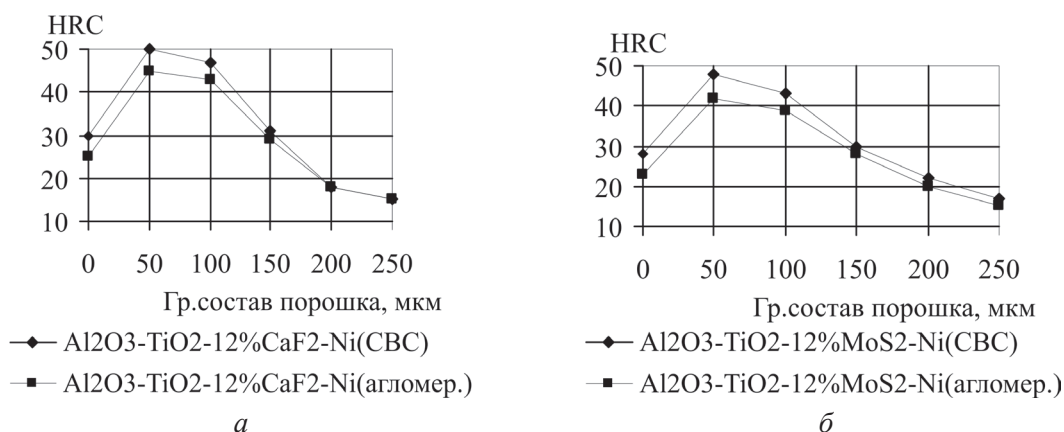


Рис. 7. Влияние гранулометрического состава порошка на твердость покрытия:

а – Al₂O₃-TiO₂-12%(MoS₂-Ni); б – Al₂O₃-TiO₂-12%(CaF₂-Ni)

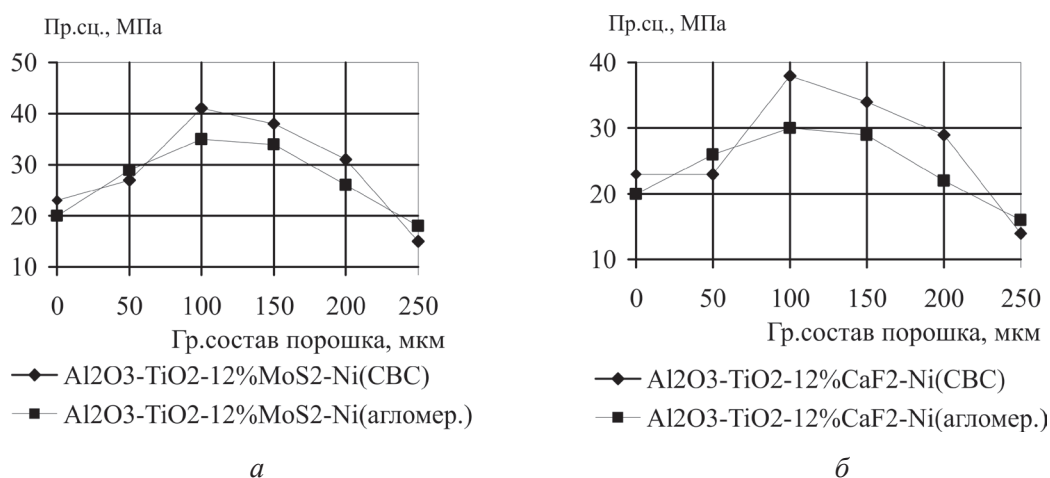


Рис. 8. Влияние гранулометрического состава порошка на прочность сцепления покрытия с основой:

а – Al₂O₃-TiO₂-12%(MoS₂-Ni); б – Al₂O₃-TiO₂-12%(CaF₂-Ni)

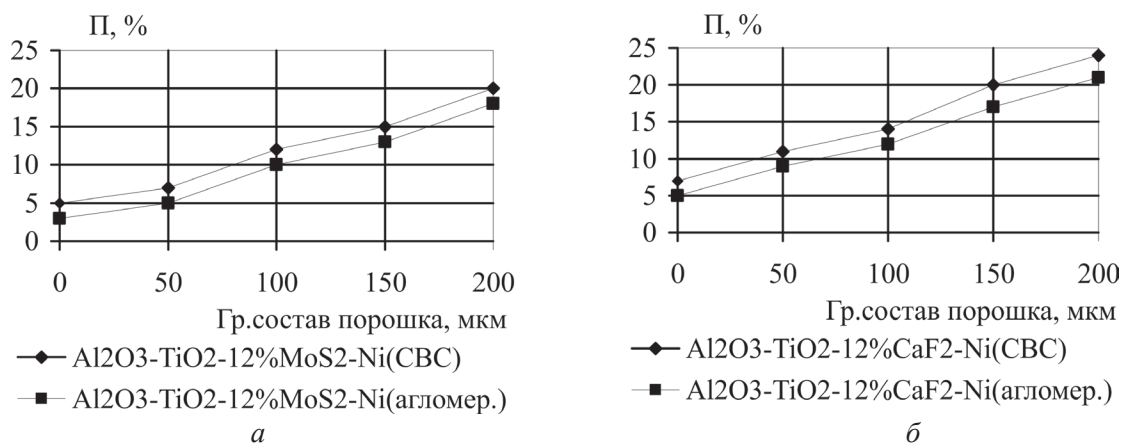


Рис. 9. Влияние гранулометрического состава порошка на пористость покрытия:

а – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$; б – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{CaF}_2\text{-Ni})$

Выводы

Для повышения антифрикционных характеристик керамических износостойких плазменных покрытий в условиях высокотемпературной коррозии необходимо использование многофункциональной оксидной керамики, в частности, композиционного керамического материала на основе оксид алюминия – оксид титана – плакированная никелем твердая смазка. Такие покрытия характеризуются повышенной пластичностью, коррозионной стойкостью и стойкостью по отношению к ударным нагрузкам, а также обладают меньшими значениями пористости, равномерностью стальной структуры и изотропностью свойств. Необходимо также отметить, что применяемая технология изготовления композиционного порошка должна также обеспечивать придание частицам свойств, способствующих формированию заданной структуры покрытий. Содержание аморфной фазы в плазменных керамических покрытиях можно существенно изменить параметрами напыления или последующей термической обработкой. Проведена оптимизация параметров APS процесса для материалов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием и методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала и минимальной пористости покрытия. На оптимальных режимах (расход плазмообразующего газа азота для СВС-порошков

55 л/мин, для агломерированных порошков 50 л/мин, ток 550 А, дистанция напыления 100 мм, фракция порошка 50...100 мкм, расход порошка 3,5 кг/ч, получены покрытия с КИМ 60 %, пористостью 3 %, прочностью сцепления 42 МПа, твердостью 50 HRC.

Список литературы

1. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Шевцов А.И. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов. – Минск: Беспринт, 2005. – 253 с.
2. Витязь П.А. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И. Основы нанесения износостойких, коррозионно-стойких и теплозащитных покрытий. – Минск: Белорусская наука, 2006. – 363 с.
3. 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.
4. Оковитый В.А. Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки // Сварочное производство. – 2002. – № 6. – С. 41–43.
5. Триботехнические испытания образцов аморфизированных плазменных композиционных покрытий с включением твердой смазки / В.А. Оковитый, А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, О.Г. Девойно, Ф.И. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. – 2008. – Вып. 1. – С. 2–6.
6. 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.

7. Исследование структуры плазменных износостойких покрытий на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, Т.Л. Талако, О.Г. Девоино, А.Ф. Пантелеенко, В.В. Оковитый // Наука и техника. – Минск, 2013. – № 5. – С. 15–21.

8. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, С.П. Кундас, А.П. Достанко, Е. Lugscheider, U. Eritt. – Минск: Научный центр исследований политики и бизнеса «Армита-Маркетинг, Менеджмент», 1999. – 543 с. – ISBN 985-6320-58-5.

9. 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.

10. 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.

11. Шаронов Е.А. Методика испытания на срез покрытий с повышенной прочностью // Пленки и покрытия 2001: труды 6 Международной конференции, 3–5 апреля 2001 г. – СПб., 2001. – С. 618–620.

12. Калита В.И., Комлев Д.И. К вопросу о механизме формирования аморфной структуры в металлических сплавах при плазменном напылении // Металлы. – 2003. – № 6. – С. 30–37.

13. Роль адгезии смазочного масла при граничной смазке / А.И. Шевцов, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко, В.М. Изойтко, К.В. Буйкус // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 3. – С. 350–354.

14. 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.

15. Исследование параметров обработки импульсным лазером плазменных износостойких покрытий из плакированных композиционных порошков / А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девоино, А.Н. Чумаков, Н.А. Босак // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Национальная академия наук Беларуси. – Минск: Беларуская навука, 2009. – Вып. 32. – С. 194–199.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(67), April – June 2015, Pages 46–54

Optimization of the deposition process of wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics

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

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 optimization of the process parameters for the APS materials $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\% (MoS}_2\text{-Ni)}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\% (CaF}_2\text{-Ni)}$, obtained by agglomerating finely dispersed blend followed by high temperature sintering and method of self-propagating high-temperature synthesis is made. Spraying of the wear resistant coatings of aluminum oxide – titanium oxide – solid lubricant obtained by the method of agglomerating finely dispersed blend, followed by high temperature sintering and SHS was carried out on a plasma-spraying in air. Such coatings are characterized by high ductility, corrosion resistance and shock resistance, and also have lower values of porosity, uniform steel structure and isotropic properties. Optimization of parameters of the deposition was carried out on the basis of obtainment the

maximum utilization factor of the material and the minimum porosity of the coating. The effect of current, spraying distance, the powder particle size distribution, a method for manufacturing the powder utilization factor and the porosity of the coating material, as well as the influence of particle size distribution on adhesion strength of the coating to the substrate and coating hardness is examined. The results of these coatings studies led to the conclusion that the technology for manufacturing powder has a dominant influence on the formation of the coating structure. The use of SHS powders, in contrast to the agglomerates, allows creating high-density coating of eutectic composition, enhancing physical and mechanical properties.

Keywords:

wear-resistant coatings, oxide ceramics, solid lubricant, plasma-spraying, optimization parameters utilization factor material, coating porosity.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-2-46-54

References

1. Ilyushchenko 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.
2. Vityaz' P.A., Ilyushchenko A.F., Shevtsov A.I. *Osnovy naneseniya iznosostoikikh, korrozionnostoikikh i teplo-zashchitnykh pokrytii* [The principles of wear-resistant, corrosion-resistant, heat-reflecting coatings deposition]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2006. 363 p.
3. 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"], 2008, iss. 31, pp. 156–162. (In Russian)
4. 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)
5. Okovity V.A., Shevtsov A.I., Ilyushchenko A.F., Devoino O.G., Panteleenko F.I., Okovity V.V. Tribotekhnicheskie ispytaniya obraztsov amorfizirovannykh plazmennyykh kompozitsionnykh pokrytii s vklucheniem tverdoi smazki [The tribotechnical tests of samples of plasma composite coatings with inclusion of hard lubrication that was amorphousized]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie – Bulletin of Brest State Technical University. Mechanical Engineering*, 2008, iss. 1, pp. 2–6.
6. 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.
7. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Talako T.L., Devoino O.G., Panteleenko A.F., Okovity V.V. Issledovanie struktury plazmennyykh iznosostoikikh pokrytii na osnove oksidnoi keramiki s vkluchenyami tverdoi smazki [Investigation of plasma wear resistance coating structure on basis of oxide ceramics with inclusions of solid lubrication]. *Nauka i tekhnika – Science and Technique*, 2013, no. 5, pp. 15–21. (In Russian)
8. Ilyushchenko A.F., Kundas S.P., Dostanko A.P., Lugscheider E., Erritt U. *Protsessy plazmennogo naneseniya pokrytii: teoriya i praktika* [The processes of coating plasma spraying: theory and practice]. Minsk, "Armita-Market-ing, Menedzhment" Publ., 1999. 543 p. ISBN 985-6320-58-5
9. Ilyushchenko 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.
10. Ilyushchenko 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. In 2 pt.]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2013, pt. 2, pp. 239–245. (In Russian)
11. Sharonov E.A. [Test Methods Shear coatings with improved strength]. *Trudy 6 Mezhdunarodnoi konferentsii "Plenki i pokrytiya 2001"* [Proceedings of the 6th International Conference "Films and Coatings 2001"]. Saint Petersburg, 3–5 April 2001, pp. 618–620.

12. Kalita V.I., Komlev D.I. K voprosu o mekhanizme formirovaniya amorfnoi struktury v metallicheskih splavakh pri plazmennom napylenii [To problem on mechanism of amorphous structure formation in metal alloys while making plasma spraying]. *Metally – Russian Metallurgy*, 2003, no. 6, pp. 30–37. (In Russian)

13. 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)

14. 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)

15. Shevtsov A.I., Ilyuschenko A.F., Devoino O.G., Okovity V.A., Chumakov A.N., Bosak N.A. [Investigation of plasma processing parameters wear resistant 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)

Received 6 April 2015

Revised 6 May 2015

Accepted 15 May 2015