

Научная статья
УДК 621.039.546.3
DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-47-52

Структура и свойства композиционных покрытий, формируемых методом холодного газодинамического напыления смесей порошков алюминия и карбида бора

**Владимир Фёдорович Косарев¹, Владислав Сергеевич Шикалов²,
Марио Гамил Фуад³, Томила Максимовна Видюк⁴,
Сергей Владимирович Клинков⁵**

^{1,2,4,5}Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹vkos@itam.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0001-8989-9646>

²v.shikalov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0491-2803>

³mariogamil1@gmail.com

⁴vidyuk@itam.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-6819-8290>

⁵klyiii@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-1424-8707>

Аннотация

В настоящей работе впервые проведено экспериментальное исследование влияния состава порошковой смеси алюминия и карбида бора на микроструктуру и основные свойства покрытий, формируемых методом холодного газодинамического напыления. Получена серия образцов с покрытиями на подложках из нержавеющей стали. Проведен анализ микроструктуры полученных покрытий методами сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Измерена микротвердость и адгезионная прочность покрытий. Показано, что увеличение доли карбида бора в порошковой смеси от 0 до 72 об.% приводит к росту его доли в покрытии от 0 до 1517 об.%, росту микротвердости от 46,3 до 72,4 HV_{0,3} и адгезионной прочности от 17,4 до 61,4 МПа. Полученные результаты открывают широкие перспективы применения метода холодного газодинамического напыления для создания функциональных покрытий, востребованных в атомной промышленности.

Ключевые слова

холодное газодинамическое напыление, композиционные покрытия, алюминий, карбид бора, микротвердость, адгезионная прочность

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00046. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

Для цитирования

Косарев В. Ф., Шикалов В. С., Фуад М. Г., Видюк Т. М., Клинков С. В. Структура и свойства композиционных покрытий, формируемых методом холодного газодинамического напыления смесей порошков алюминия и карбида бора // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 3. С. 47–52. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-47-52

Structure and Properties of Composite Coatings Cold Sprayed from Powder Mixtures of Aluminum and Boron Carbide

Vladimir F. Kosarev¹, Vladislav S. Shikalov², Mario G. Fouad³,
Tomila M. Vidyuk⁴, Sergey V. Klinkov⁵

^{1,2,4,5}Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹vkos@itam.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0001-8989-9646>

²v.shikalov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0491-2803>

³mariogamil1@gmail.com

⁴vidyuk@itam.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-6819-8290>

⁵sklyiii@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-1424-8707>

Abstract

In the present work, an experimental study of the effect of aluminum and boron carbide powder mixture composition on the microstructure and basic properties of the cold sprayed coatings was carried out for the first time. A series of coatings deposited on stainless steel substrates was obtained. The microstructure of the deposited coatings was analyzed by scanning electron microscopy and X-ray diffraction analysis. The microhardness and bonding strength of the coatings were measured. It was shown that an increase from 0 to 72 vol.% in the boron carbide content in the powder mixture leads to an increase in its content from 0 to 15-17 vol.% in the coating, its microhardness – from 46.3 to 72.4 HV_{0.3}, and bonding strength – from 17.4 to 61.4 MPa. The obtained results open up broad prospects for the application of the cold spray method to deposition of functional coatings, which are highly demanded in the nuclear industry.

Keywords

cold spray, composite coatings, aluminum, boron carbide, microhardness, bonding strength.

Funding

The reported study was funded by RFBR and ROSATOM, project number 20-21-00046. The study was conducted at the Equipment Sharing Center «Mechanics» of ITAM SB RAS.

For citation

Kosarev V. F., Shikalov V. S., Fouad M. G., Vidyuk T. M., Klinkov S. V. Structure and Properties of Composite Coatings Cold Sprayed from Powder Mixtures of Aluminum and Boron Carbide. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 3, pp. 47–52. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-47-52

Введение

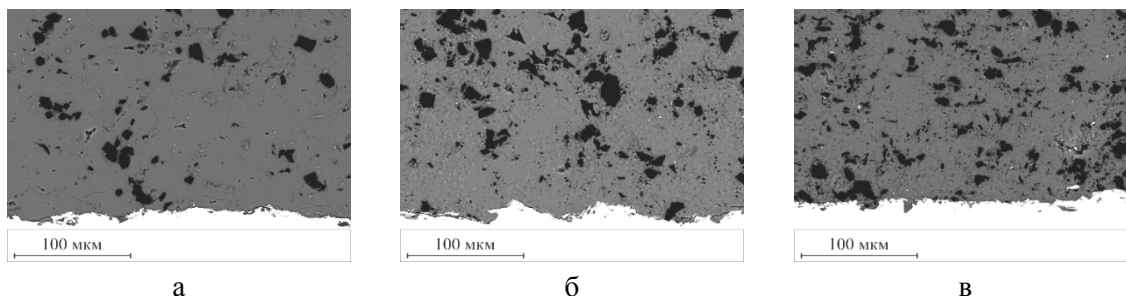
Карбид бора является одним из наиболее твердых и износостойких материалов, имеет высокую температуру плавления и теплоемкость в сочетании с низкой плотностью, а также обладает химической инертностью и способностью к эффективной абсорбции тепловых нейтронов. В последние десятилетия многими исследователями предпринимаются попытки создания композитов на основе алюминиевой матрицы, армированной частицами карбида бора, и внедрения их в атомную промышленность в качестве материала для защиты от нейтронного излучения. Привлекательным способом создания таких защитных покрытий представляется холодное газодинамическое напыление (ХГН). Умеренные температуры нагрева частиц при ХГН минимизируют окисление, фазовые превращения и термические напряжения в ХГН-покрытиях, по сравнению с газотермическими покрытиями. Работы, посвященные созданию покрытий на основе алюминиевой матрицы, армированной частицами карбида бора [1–4], в основном сосредоточены на изучении свойств покрытий, полученных при некоторой одной концентрации карбида бора в напыляемой смеси. Настоящая работа посвящена исследованию влияния состава порошковой смеси алюминия и карбида бора на микроструктуру и механические свойства (микротвердость, адгезионная прочность) получаемых ХГН-покрытий.

1. Материалы и методики

Для напыления покрытий использовались порошки алюминия и карбида бора со средними размерами 27 и 17 мкм соответственно, из которых были приготовлены механические смеси с концентрацией карбида бора 0, 32, 52 и 72 об.%. В качестве подложек использовались пластины из нержавеющей стали 08X18H10T размером $50 \times 30 \times 5$ мм, предварительно подвергнутые пескоструйной обработке. Напыление смесей проводилось на установке ХГН высокого давления (ИТПМ СО РАН, Россия) с использованием осесимметричного сопла Лавалья. В качестве рабочего газа использовался сжатый воздух с давлением торможения 4 МПа и температурой торможения 573 К. Анализ микроструктуры покрытий и зоны интерфейса проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа EVO MA15 (Zeiss, Германия). Содержание карбида бора в покрытиях определялось двумя методами: при помощи анализа оптических изображений, полученных с использованием оптического микроскопа GX-51 (Olympus, Япония) на поперечных шлифах; методом Ритвельда по результатам рентгенофазового анализа поверхности покрытий на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker, Германия). Микротвердость покрытий измерялась на поперечных шлифах по методу Виккерса на микротвердомере DuraScan-50 (EMCO-Test, Австрия) при нагрузке 3 Н. Испытания на адгезионную прочность покрытий проводились в соответствии со стандартом ASTM C633-01 на испытательной машине Z100 (Zwick/Roell, Германия) клеевым методом.

2. Результаты и обсуждение

Для выбранных параметров напыления была получена серия образцов с покрытиями толщиной около 1 мм для дальнейшего исследования микроструктуры и свойств. На рисунке представлены изображения поперечного сечения образцов с покрытиями, полученными из смесей с концентрацией 32, 52 и 72 об.%. Частицы карбида бора равномерно распределены в алюминиевой матрице покрытий. На рентгенограммах полученных покрытий наблюдались дифракционные пики, соответствующие только фазам алюминия и карбида бора.



Изображения композиционных покрытий, полученных из смесей с концентрацией карбида бора 32 (а), 52 (б) и 72 (в) об.%

Images of composite coatings deposited from mixture with boron carbide 32 (a), 52 (б) и 72 (в) vol.%

Результаты измерений содержания карбида бора в полученных покрытиях и их основных свойств приведены в таблице.

Содержание карбида бора в композиционных покрытиях и их основные свойства
Content of Boron Carbide in Composite Coatings and Their Basic Properties

Содержание карбида бора в смеси, об. %	Содержание карбида бора в покрытии, об. %		Микротвердость, HV _{0,3}	Адгезионная прочность, МПа
	Оптический анализ изображений	Метод Ритвельда		
0	0	0	46,3 ± 1,5	17,4 ± 3,6
32	8	12	59,1 ± 1,0	23,7 ± 0,9
52	16	14	66,3 ± 1,6	40,7 ± 2,4
72	15	17	72,4 ± 0,9	61,4 ± 0,6

Данные по содержанию карбида бора в покрытиях, полученные с помощью анализа оптических изображений и рентгенофазового анализа, находятся в удовлетворительном согласии. С увеличением концентрации карбида бора в смеси содержание его в покрытии увеличивается, однако во всех случаях оказывается существенно ниже, чем в смеси.

Микротвердость покрытия из алюминия составила $46,3 \pm 1,5$ HV_{0,3}. Увеличение концентрации карбида бора в напыляемой смеси и, как следствие, в конечном покрытии приводит к заметному увеличению микротвердости покрытия. Наибольшее значение микротвердости ($72,4 \pm 0,9$ HV_{0,3}) соответствует покрытию с максимальным содержанием карбида бора.

Покрытию из чистого алюминия соответствует самая низкая величина адгезионной прочности – $17,4 \pm 3,6$ МПа. Увеличение концентрации карбида бора в напыляемой смеси приводит к росту величины адгезионной прочности композиционного покрытия. Покрытию, полученному из смеси с максимальной концентрацией карбида бора, соответствует наибольшее значение адгезионной прочности ($61,4 \pm 0,6$ МПа). Такое поведение можно объяснить формированием шероховатости и удалением оксидного слоя на подложке при ударах о ее поверхность керамических частиц, что способствует увеличению площади сцепления и повышению прочности образовавшихся связей частица–подложка. Помимо этого, эффект наклепа отраженными керамическими частицами может способствовать уплотнению структуры покрытия и зоны интерфейса подложка–покрытие, увеличивая адгезионную прочность. Для оценки влияния каждого из этих механизмов на адгезионную прочность покрытий требуется проведение дополнительных экспериментов.

Проведем сравнение полученных в данной работе значений твердости и адгезионной прочности покрытий со значениями, представленными в литературе. В работах [1; 2] из смеси с 21,3 об. % карбида бора были получены покрытия с 12–15 об. % карбида бора, микротвердостью 110–150 HV_{0,3} и адгезионной прочностью 16–19 МПа. В работе [3] покрытие из смеси с 42 об. % карбида содержало 23 об. % карбида и имело твердость 58 HV_{0,2}. В работе [4] доля карбида в покрытии оказалась сравнимой с содержанием его в смеси (около 30 об. %), твердость 164 HV_{0,3}, адгезионная прочность 27 МПа. Величины содержания карбида бора и микротвердости, полученные в настоящей работе, оказались ниже, а величина адгезионной прочности – сопоставима либо выше. Более того, в [1; 2] наблюдалось нетипичное уменьшение адгезионной прочности композитного покрытия, а в [2] – уменьшение твердости по сравнению с алюминиевым покрытием. Возможное объяснение связано с использованием порошков разных производителей, дисперсности и условий напыления.

Заключение

Впервые экспериментально исследовано влияние состава порошковой смеси алюминия и карбида бора на основные свойства ХГН-покрытий. На подложках из нержавеющей стали получена серия покрытий на основе алюминиевой матрицы с равномерно распределенными в ней частицами карбида бора. Показано, что с увеличением концентрации карбида бора в смеси содержание его в покрытии также увеличивается, однако оказывается существенно ниже, чем в смеси. Увеличение концентрации карбида бора в напыляемой смеси (от 0 до 72 об.%) приводит к значительному росту значений микротвердости (от 46,3 до 72,4 HV_{0,3}) и адгезионной прочности (от 17,4 до 61,4 МПа) композиционного покрытия. Полученные результаты могут быть востребованы на практике для управления составом и свойствами композиционных ХГН-покрытий, а также для разработки научно-технологических основ создания защитных покрытий, представляющих интерес для атомной промышленности.

Список литературы

1. **Yandouzi M., Böttger A. J., Hendrikx R. W. A., Brochu M., Richer P., Charest A., Jodoin B.** Microstructure and mechanical properties of B₄C reinforced Al-based matrix composite coatings deposited by CGDS and PGDS process // *Surf. Coat. Techn.* 2010. Vol. 205, no. 7. Pp. 2234-2246.
2. **Yandouzi M., Bu H., Brochu M., Jodoin B.** Nanostructured Al-based metal matrix composite coating production by pulsed gas dynamic spraying process // *J. Therm. Spray Techn.* 2012. Vol. 21, no. 3-4. Pp. 609-619.
3. **Tariq N. H., Gyansah L., Wang J. Q., Qiu X., Feng B., Siddique M. T., Xiong T. Y.** Cold spray additive manufacturing: a viable strategy to fabricate thick B₄C/Al composite coatings for neutron shielding application // *Surf. Coat. Techn.* 2018. Vol. 339. Pp. 224-236.
4. **Huang G., Fu W., Ma L., Li X., Wang H.** Cold spraying B₄C particles reinforced aluminium coatings // *Surf. Eng.* 2019. Vol. 35, no. 9. Pp. 772-783.

References

1. **Yandouzi M., Böttger A.J., Hendrikx R.W.A., Brochu M., Richer P., A Charest., Jodoin B.** Microstructure and mechanical properties of B₄C reinforced Al-based matrix composite coatings deposited by CGDS and PGDS process. *Surf. Coat. Techn.*, 2010, vol. 205, no. 7, pp. 2234-2246.
2. **Yandouzi M., Bu H., Brochu M., Jodoin B.** Nanostructured Al-based metal matrix composite coating production by pulsed gas dynamic spraying process. *J. Therm. Spray Techn.* 2012, vol. 21, no. 34, pp/. 609-619.
3. **Tariq N.H., Gyansah L., Wang J. Q., Qiu X., Feng B., Siddique M. T., Xiong T. Y.** Cold spray additive manufacturing: a viable strategy to fabricate thick B₄C/Al composite coatings for neutron shielding application. *Surf. Coat. Techn.*, 2018, vol. 339, pp. 224-236.
4. **Huang G., Fu W., Ma L., Li X., Wang H.** Cold spraying B₄C particles reinforced aluminium coatings. *Surf. Eng.*, 2019, vol. 35, no. 9, pp. 772-783.

Информация об авторах

Косарев Владимир Федорович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Шикалов Владислав Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Фуад Марио Гамил, аспирант, Новосибирский государственный университет

Видюк Томила Максимовна, младший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Клинков Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Information about the Authors

Vladimir F. Kosarev, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of Laboratory, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

Vladislav S. Shikalov, Junior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

Mario G. Fouad, PhD student, Novosibirsk State University

Tomila M. Vidyuk, Junior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

Sergei V. Klinkov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Corresponding Member of RAS, Principal Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

*Статья поступила в редакцию 26.05.2022; одобрена после рецензирования 13.09.2022;
принята к публикации 13.09.2022*

*The article was submitted 26.05.2022; approved after reviewing 13.09.2022;
accepted for publication 13.09.2022*