

06.5

Свойства покрытий, полученных из механически обработанной борсодержащей смеси порошков методом холодного газодинамического напыления

© А.Е. Чесноков, А.В. Смирнов, В.Ф. Косарев, С.В. Клинков, В.С. Шикалов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: chae@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 22 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 18 мая 2022 г.

Принято к публикации 19 мая 2022 г.

Для композиционных покрытий, полученных методом холодного газодинамического напыления из порошковых смесей состава Al + 50 wt.% B и Al + 50 wt.% B₄C, подготовленных в V-образном смесителе и при механической обработке в планетарной мельнице, проведено сравнение влияния указанных способов подготовки смесей на содержание бора (карбида бора) в покрытии. Показано, что независимо от способа подготовки содержание бора и/или карбида бора в покрытии имеет близкие значения, что подтверждено результатами рентгенофазового анализа и при визуальной обработке изображений структуры покрытий.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, композиционные покрытия, высокоэнергетическая планетарная мельница, микротвердость, бор, карбид бора, рентгенофазовый анализ.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.13.52744.19230

Холодное газодинамическое напыление характеризуется высокой скоростью частиц (до 1000 m/s) и их температурой, не превышающей 600°C. Таким образом, напыление композиционных частиц с низким содержанием металлического связующего (менее 20 wt.%) приводит к эрозии подложки без формирования сплошного слоя [1].

Многие работы посвящены получению композиционных покрытий методом холодного газодинамического напыления из порошковой смеси заданного состава (см., например, [2–6]). Традиционно подготовка композиционных смесей осуществляется с использованием вибростенда или V-образного смесителя. Особенностью получаемой смеси является то, что частицы наследуют размеры, морфологию, структуру, микротвердость и фазовый состав от исходных частиц порошка. При этом на характеристики получаемых покрытий, в том числе на объемную долю закрепившегося компонента твердых частиц, влияние могут оказать только содержание его объемной доли в напыляемой смеси и его гранулометрический состав [6].

В работах [7,8] показано преимущество использования высокоэнергетической планетарной мельницы при подготовке композиционной смеси порошков. В обрабатываемой смеси образуются агломерированные частицы, характеризующиеся развитой поверхностью и размерами от 10 до 100 μm, которые в своем объеме содержат частицы керамики в диапазоне размеров от 0.1 до 20 μm. Целью настоящей работы является достижение максимальной объемной концентрации керамики в покрытии при использовании различных методов подготовки композиционной смеси состава Al + 50 wt.% B или Al + 50 wt.% B₄C.

В работе были использованы порошки алюминия (марка АСД-1), поликристаллического бора (ТУ 113-12-11.098–88) и карбида бора (марка F 220).

Подготовка порошковой смеси проводилась в высокоэнергетической планетарной мельнице „Активатор-2SL“ в воздушной атмосфере с параметрами обработки, приведенными в табл. 1; масса загружаемых шаров 160 g для каждого барабана, масса загрузки обрабатываемого материала 100 g. В качестве мелющих тел использовались стальные шары диаметром 5 mm.

При превышении указанного в таблице времени механической обработки в планетарной мельнице частицы алюминия достигали температуры, близкой к температуре плавления, в связи с чем наблюдалось их налипание на поверхность мелющих тел и стенки стаканов, как показано в работах [9,10]. Вид механически обработанной композиционной смеси представлен на рис. 1, гранулометрический состав приведен в табл. 1.

Фазовый состав порошковых смесей и покрытий изучался методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker, США) с использованием монохроматизированного CuK_α-излучения. Анализ рентгенограмм показал, что происходит только перемешивание порошков с образованием композиционных частиц без химических превращений.

Напыление смесей проводилось на экспериментальной установке холодного газодинамического напыления высокого давления (ИТПМ СО РАН, Россия) с использованием осесимметричного сопла Лаваля длиной 150 mm с диаметрами критического и выходного сечения 2.8 и 6.5 mm соответственно. В качестве рабочего газа применялся сжатый воздух с давлением торможения 4.0 МПа и

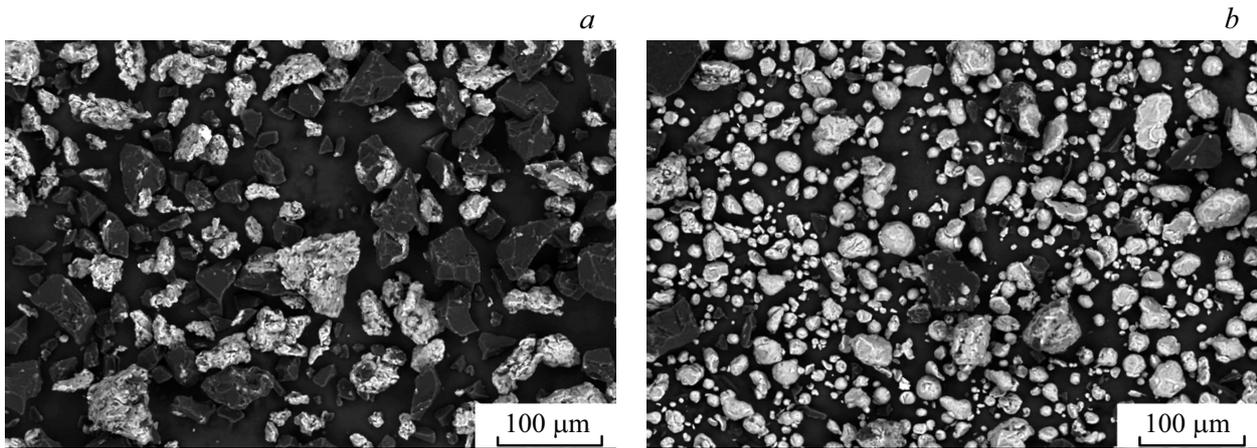


Рис. 1. Общий вид механически обработанной композиционной смеси алюминия и карбида бора (*a*), алюминия и поликристаллического бора (*b*). Параметры механической обработки: *a* — 3 min, $a_b = 117g$; *b* — 1 min, $a_b = 60g$ (a_b — ускорение мелющих тел).

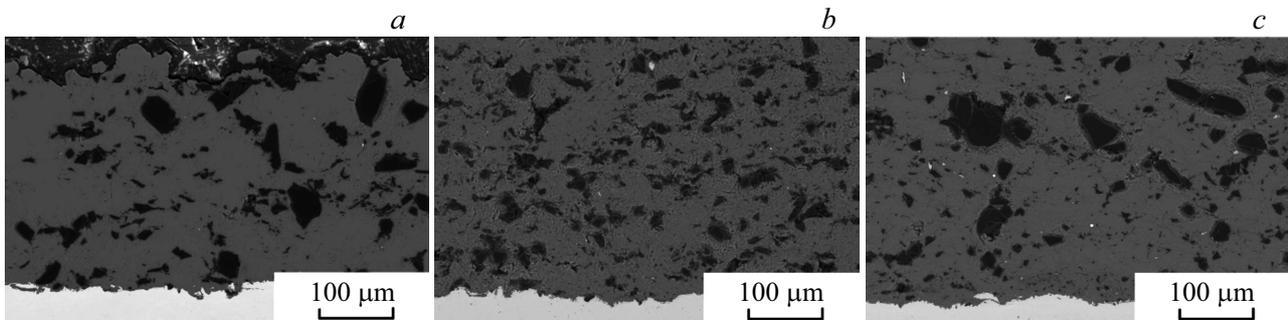


Рис. 2. Микрофотографии шлифа поперечного среза покрытий: *a* — смесь 1, *b* — смесь 2, *c* — смесь 3.

температурой торможения 573 К. Дистанция напыления (расстояние от среза сопла до поверхности подложки) составляла 30 мм. Сопло перемещалось относительно подложки из нержавеющей стали со скоростью 100 мм/с по зигзагообразной траектории с шагом смещения 3 мм для получения одного сплошного слоя покрытия по всей поверхности подложки.

Морфология и структура образцов изучались с помощью электронного микроскопа Evo MA15 (Carl

Zeiss) с использованием детектора обратнорассеянных электронов. Пористость покрытий определялась с помощью металлографического микроскопа OLYMPUS GX-51.

На рис. 2 представлены шлифы покрытий. Структура напыленных покрытий плотная, с распределенными по объему частицами карбида бора (бора). Видно, что покрытия, полученные из смесей 2 и 3 (табл. 1), содержат в себе большее количество частиц твердой фа-

Таблица 1. Состав смеси порошков, вид и параметры ее механической обработки для холодного газодинамического напыления

| Номер смеси | Состав смеси порошков | Вид и параметры механической обработки | Средний размер (стандартное отклонение)*, μm |
|-------------|-----------------------------------|--|---|
| 1 | Al + 50 wt.% B_4C | V-образный смеситель, 30 min | — |
| 2 | Al + 50 wt.% B_4C | Планетарная мельница, 3 min, $a_b = 117g$ | 44.81 (31.74) |
| 3 | Al + 50 wt.% B | Планетарная мельница, 1 min, $a_b = 60g$ | 49.22 (25.34) |

*Определение гистограмм объемного распределения частиц по размерам проводилось на лазерном дифракционном анализаторе LS 13 320 (Beckman Coulter).

Таблица 2. Элементный состав среза покрытия

| Элемент | Смесь 1 | | Смесь 2 | | Смесь 3 | |
|---------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | at.% | wt.% | at.% | wt.% | at.% | wt.% |
| Al | 15.92 | 31.68 | 13.49 | 27.65 | 13.42 | 48.01 |
| B | 65.82 | 52.65 | 67.72 | 54.17 | 86.58 | 51.99 |
| C | 18.26 | 15.67 | 18.79 | 18.18 | — | — |
| Итого | 100.00 | | 100.00 | | 100.00 | |

Таблица 3. Характеристики покрытий

| Номер смеси | Микротвердость HV _{0.3} | Объем частиц карбида бора (бора), % | |
|-------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| | | Анализ структуры | Рентгенофазовый анализ |
| 1 | 72 ± 4 | 15–18 | 13 |
| 2 | 97 ± 4 | 15–20 | 15 |
| 3 | 120 ± 20 | 15–20 | 14 |

зы, что подтверждает исследование элементного состава, который определялся при прочих равных условиях (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что в структуре покрытия находятся только основные химические элементы, которые входят в состав напыляемой порошковой смеси.

Для количественной характеристики компонентов покрытия использовался программный пакет с открытым исходным кодом ImageJ. В покрытиях определялась суммарная площадь частиц бора (карбида бора), закрепившихся в анализируемой области (рис. 2 и табл. 3). Характеристики покрытий: микротвердость и объемное содержание карбида бора (бора) — представлены в табл. 3.

Таким образом, показано, что напыление покрытий механически агломерированными композиционными частицами (смеси 2 и 3) приводит к некоторому (незначительному) увеличению объемного содержания бора и/или карбида бора в материале покрытия по сравнению с их содержанием в покрытии, полученном из порошковой смеси 1 (табл. 1), что дополнительно подтверждено результатом рентгенофазового анализа (табл. 3).

Благодарности

Авторы выражают благодарность за подготовку образцов Т.М. Видюк (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН).

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследова-

ний в рамках научного проекта № 20-21-00046 с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Механика“ (Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.F. Kosarev, S.V. Klinkov, A.E. Chesnokov, A.V. Smirnov, V.S. Shikalov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1945**, 012072 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1945/1/012072
- [2] Y.T.R. Lee, H. Ashrafizadeh, G. Fisher, A. McDonald, *Surf. Coat. Technol.*, **324**, 190 (2017). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.057
- [3] R. Fernandez, B. Jodoin, *J. Therm. Spray Tech.*, **28**, 737 (2019). DOI: 10.1007/s11666-019-00845-5
- [4] C. Chen, X. Xie, Y. Xie, M.-P. Planche, S. Deng, G. Ji, E. Aubry, Z. Ren, H. Liao, *Mater. Des.*, **160**, 270 (2018). DOI: 10.1016/j.matdes.2018.09.025
- [5] W. Jiban, J. Hogan, A. McDonald, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **116**, 2149 (2021). DOI: 10.1007/s00170-021-07500-w
- [6] В.Ф. Косарев, А.А. Полухин, Н.С. Ряшин, В.М. Фомин, В.С. Шикалов, *Механика твердого тела*, № 4, 127 (2017). [V.F. Kosarev, A.A. Polukhin, N.S. Ryashin, V.M. Fomin, V.S. Shikalov, *Mech. Solids*, **52** (4), 457 (2017). DOI: 10.3103/S0025654417040136].
- [7] A.E. Chesnokov, A.V. Smirnov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1945**, 012033 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1945/1/012033

- [8] В.Е. Овчаренко, О.П. Солоненко, А.Е. Чесноков, В.М. Фомин, Письма в ЖТФ, **38** (21), 87 (2012). [V.E. Ovcharenko, O.P. Solonenko, A.E. Chesnokov, V.M. Fomin, Tech. Phys. Lett., **38** (11), 1000 (2012). DOI: 10.1134/S1063785012110119].
- [9] S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, A.E. Chesnokov, A.V. Smirnov, T.M. Vidyuk, Solid State Phenom., **313**, 143 (2021). DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.313.143
- [10] С.Г. Вадченко, Е.В. Суворова, Н.И. Мухина, И.Д. Ковалев, Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия, № 1, 4 (2020). DOI: 10.17073/1997-308X-2020-4-10