

УДК 621.793

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НЕЙТРОНОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТНЫХ (Al + B₄C) ПОКРЫТИЙ

С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, В. С. Шикалов, Т. М. Видюк

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

E-mails: klyiii@yandex.ru, vkos@itam.nsc.ru, v.shikalov@gmail.com, vidyuk@itam.nsc.ru

Исследуется возможность получения методом холодного газодинамического напыления композитных покрытий из смеси порошков алюминия и карбида бора для нейтронной защиты. Найдены зависимости коэффициента напыления и остаточного содержания карбида бора в покрытии от его содержания в напыляемой смеси порошков. Проведен анализ выявленных закономерностей и предложен подход для поиска оптимальной для создания эффективных нейтронопоглощающих покрытий концентрации карбида бора в порошковой смеси. Показано, что наибольшая скорость увеличения толщины нейтронозащитных покрытий достигается при оптимальном составе порошка (объемная доля карбида бора составляет приблизительно 0,5).

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, коэффициент напыления, содержание керамического компонента в покрытии.

DOI: 10.15372/PMTF20220211

Введение. Разработка надежных материалов для нейтронной защиты в ядерной промышленности является актуальной задачей. Традиционные материалы, такие как кадмий, борсодержащие сталь и пластики, обладают рядом недостатков. Например, кадмий имеет низкую температуру плавления и ядовит, что требует соблюдения жестких мер безопасности. Применение борсодержащей стали ограничено малой массовой долей бора (менее 0,023), а борсодержащие пластики недолговечны и пожароопасны. В последнее время предпринимаются попытки использовать в ядерной промышленности для обеспечения более эффективной нейтронной защиты композиты B₄C/Al, которые в основном создаются с помощью методов либо порошковой металлургии (горячее прессование, горячее изостатическое прессование, электроискровое спекание и др.), либо литейной металлургии. Однако получаемые таким образом композиты дорогостоящи и характеризуются высокой пористостью, неравномерным распределением карбида бора в матрице и наличием нежелательных реакций на границе раздела фаз. При увеличении содержания карбида бора нейтронная защита улучшается, однако ухудшаются пластические свойства и усложняется производство композита. Поэтому возникает необходимость в материале с хорошей нейтронной защитой и приемлемыми механическими свойствами. Другим недостатком су-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и госкорпорации «Росатом» (код проекта 20-21-00046).

© Клинков С. В., Косарев В. Ф., Шикалов В. С., Видюк Т. М., 2022

ществующих методов является невозможность или высокая трудоемкость получения композитов неправильной формы, отличающейся от формы плоских пластин. В силу этого метод холодного газодинамического напыления (ХГН) является альтернативным методом получения (B_4C/Al)-композитных покрытий. Характерные для этого метода рабочие температуры газа, ускоряющего частицы, всегда меньше температуры их плавления. Соответственно образование оксидов, пористость, фазовые превращения и термические напряжения минимизируются в покрытиях, получаемых этим методом, по сравнению с покрытиями, получаемыми газотермическими методами, в которых ускоряющий частицы газ имеет высокую температуру и частицы формируют покрытие в расплавленном состоянии с последующим остыванием и рекристаллизацией. Кроме того, использование метода ХГН позволяет практически неограниченно увеличивать толщину покрытий, что наряду с высокой производительностью является предпосылкой для создания аддитивных технологий на его основе.

Применение ХГН для нанесения нейтронопоглощающих покрытий исследовалось в работах, краткий обзор которых представлен ниже.

В работе [1] для напыления методом ХГН (рабочий газ — гелий, давление торможения $p_0 = 1,0$ МПа, температура торможения $T_0 = 623$ К) использовались порошки двух видов. Первый порошок, полученный путем механического смешивания, состоит из карбида бора (объемная доля 0,222, частицы неправильной формы размером $1 \div 14$ мкм) и алюминия Al-12Si (частицы сферической формы размером $5 \div 65$ мкм). Второй порошок с таким же составом был получен путем механической обработки смесового порошка в шаровой мельнице в атмосфере жидкого азота при температуре 77 К (частицы нерегулярной формы, характерной для шарового помола, с размерами $1 \div 45$ мкм и средним размером 18 мкм); распределение карбида бора (частицы размером менее 2 мкм) внутри композитных частиц в основном равномерное. Напыление проводилось на подложки из алюминия марки Al-6061 и нержавеющей стали марки SS-316L. Рентгенофазовый анализ покрытий подтвердил отсутствие фазовых переходов, в то время как при газотермическом напылении или лазерной наплавке подобных смесей происходит образование соединений типа Al_2O_3 , $AlB_{24}C_4$, Al_4BC , Al_4C_3 и др. Полученное смесовое покрытие имело толщину 1200 мкм, пористость 2,6 %, остаточная объемная доля карбида бора равна 0,124, микротвердость на шлифе $HV_{0,3} = 151$. Покрытие из обработанного порошка имело толщину 720 мкм, пористость 1,4 %, остаточная объемная доля карбида бора равна 0,179, микротвердость $HV_{0,3} = 224$. Для сравнения, микротвердость покрытия из чисто металлического порошка (при тех же условиях напыления) равна $HV_{0,3} = 100$. Таким образом, микроструктура и твердость покрытий, полученных на разных подложках (из алюминия и нержавеющей стали), существенно не различаются. Измеренная прочность на сдвиг равна 17,6; 16,1; 22,6 МПа для покрытий из чисто металлического, смесового и механически обработанного порошков соответственно. Тестирование на сухой скользящий износ покрытий показало, что потеря массы смесового покрытия составляет 34 %, а покрытия из обработанного порошка — 13 % потери массы чисто металлического покрытия.

В работе [2], являющейся продолжением [1], порошок алюминия Al-12Si заменен на алюминиевый сплав с магнием Al 5356, также напылялись смесовой и механически обработанный порошки. Смесовое покрытие имело бóльшую толщину (1200 мкм против 900 мкм) и пористость (2,5 % против 1 %), но меньшую микротвердость $HV_{0,3} = 100$ против $HV_{0,3} = 250$ и меньшую объемную долю карбида бора (0,145 против 0,175), а также меньшую адгезию (по тесту на сдвиг) и износостойкость.

В работе [3] порошок алюминия (размер частиц $3 \div 50$ мкм) смешивался с порошком карбида бора (объемная доля 0,33, размер частиц $8 \div 35$ мкм) и наносился на подложку из алюминия толщиной 5 мм методом ХГН. Полученное покрытие имело толщину 5 мм,

остаточную объемную долю карбида бора 0,33, микротвердость $HV_{0,3} = 154 \div 174$, пористость 1,5 %, износостойкость, в три раза превышающую износостойкость подложки. Адгезия покрытий, измеренная клеевым методом, приблизительно равна 27 МПа.

В работе [4] порошок алюминия (частицы размером 30 мкм) в течение 2 ч смешивался с порошком карбида бора (объемная доля 0,446, частицы размером 5 мкм) во вращающемся барабане (100 об/мин) с шариками из оксида циркония размером 5 мм, затем сушился при температуре 80 °С в течение 10 ч. Напыление осуществлялось с помощью воздуха (при давлении 2,2 МПа и температуре 300 ÷ 350 °С), подаваемого через сопло прямоугольного сечения с водяным охлаждением. Покрытие наносилось на подложку из алюминиевого сплава марки Al 6061 Т6 в виде трубы с внешним диаметром 80 мм при ее вращении со скоростью 50 об/мин. Было получено покрытие толщиной 6 мм. Далее в течение 4 ч проводился отжиг покрытия при температурах 200, 300, 400, 500 °С (давление, время нагрева и остывания печи с образцами не указаны). Объемная доля карбида бора в покрытии оказалась равной 0,23. Отжиг при температуре 200 °С практически не оказывает влияния на характеристики покрытия, и они близки к характеристикам неотожженного покрытия. Отжиг при температуре 400 и 500 °С дает близкие результаты: пористость и твердость уменьшаются соответственно с 3,9 до 1,9 % и с $HV_{0,2} = 58$ до $HV_{0,2} = 35$, прочность на разрыв увеличивается (с 38 до 60 МПа), также увеличивается пластичность. Тестирование на задержку нейтронов покрытиями различной толщины показало, что для неотожженного и отожженного при температуре 500 °С покрытий толщиной 5 мм результаты близки (коэффициенты поглощения равны соответственно 50 и 55 %).

В работе [5] проводилась дополнительная обработка — прокат покрытий между двумя роликами. При одном прокате, при нагреве до 500 °С толщина покрытий уменьшалась на 20 %, при двух прокатах — на 40 %, при трех прокатах — на 60 %. Пористость покрытий уменьшается с 3,9 до 1,45, 0,57, 0,53 % соответственно при одном, двух, трех прокатах, увеличиваются прочность на разрыв (до 100 ÷ 130 МПа) и пластичность. Согласно [5] такая обработка значительно эффективнее простого отжига.

В работе [6] проводилась дополнительная обработка горячим прессованием. Сначала покрытия прессовались при температуре 500 °С до уменьшения толщины на 30 % со скоростью 0,05 мм/мин, затем отжигались в течение 2 ч при той же температуре. После этого проводилось два горячих проката покрытий до уменьшения толщины на 70 % (30 % + 40 %). Пористость уменьшилась с 3,9 % (исходное покрытие) до 0,35 % после горячего прессования и до 0,08 % после проката. Соответственно прочность на разрыв увеличилась с 37 до 113 МПа после прессования и до 185 МПа после проката.

Представленный обзор показывает, что работы в основном посвящены улучшению механических свойств покрытий, полученных из смесей порошков Al и B_4C методом ХГН при каком-либо одном заданном значении концентрации карбида бора в порошке. Сравнения свойств при изменении содержания карбида бора в порошке не проводилось. Также не проводился поиск оптимальной для получения нейтронопоглощающих покрытий концентрации карбида бора в порошке.

Целью настоящей работы, представляющей собой продолжение работ [7–9], является исследование зависимости коэффициента напыления и остаточного содержания карбида бора в покрытии от его исходного содержания в напыляемой порошковой смеси, а также поиск оптимального способа получения защитных покрытий.

Материалы и методы исследования. Для напыления покрытий использовались порошки алюминия и карбида бора со средними размерами частиц 27 и 17 мкм соответственно. Фотографии порошков, полученные с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), и объемные функции распределения частиц по размерам представлены на рис. 1, 2.

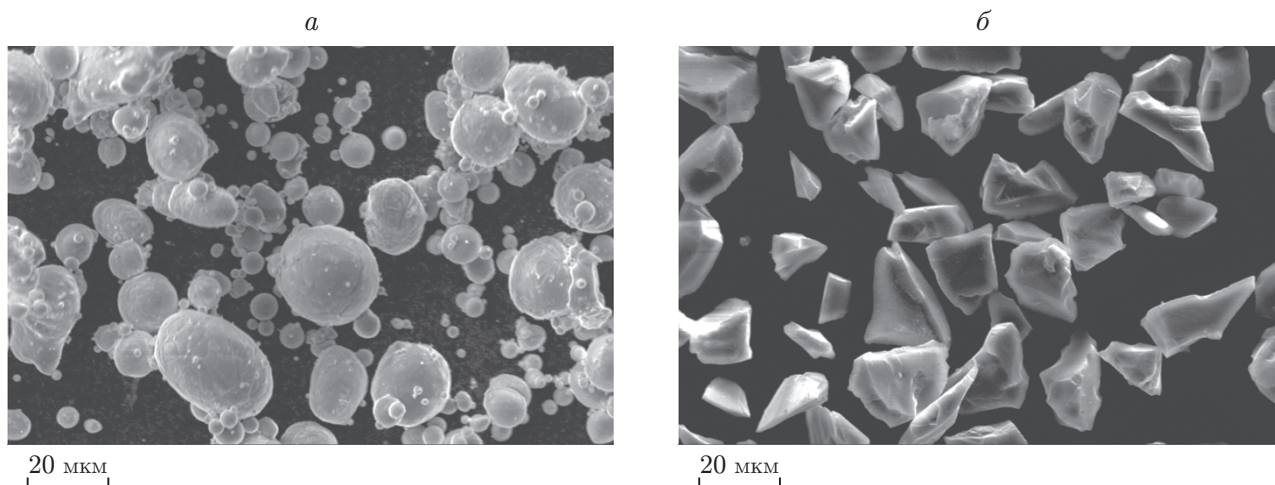


Рис. 1. СЭМ-фотографии порошков алюминия (а) и карбида бора (б)

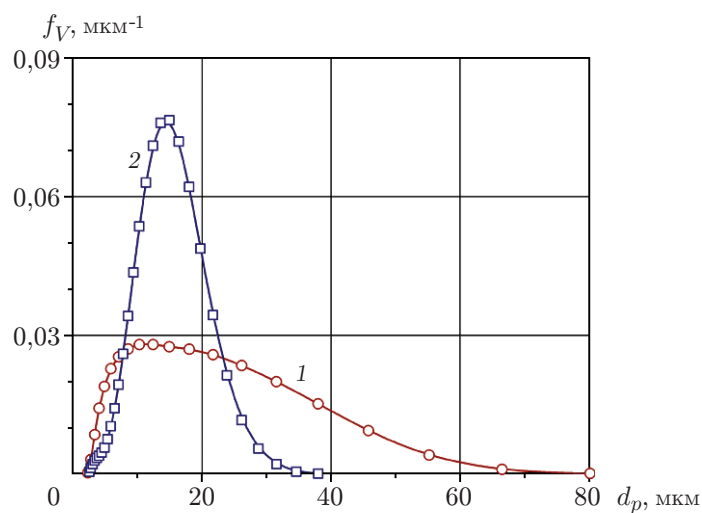


Рис. 2. Объемные функции распределения по размерам частиц порошков алюминия (1) и карбида бора (2)

На рис. 1 видно, что частицы алюминия имеют форму, близкую к сферической, а частицы карбида бора — неправильную граненую.

Из данных порошков с помощью V-образного смесителя были приготовлены механические смеси с массовой долей карбида бора $c_M = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$. В качестве подложек использовались пластины из нержавеющей стали марки 08X18H10T с размерами $50 \times 30 \times 5 \text{ мм}$. Перед напылением подложки подвергались пескоструйной обработке корундовым абразивом.

Напыление смесей проводилось на экспериментальном стенде ХГН в Институте теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН с использованием осесимметричного сопла Лавалья длиной 140 мм с диаметрами критического и выходного сечений 2,8 и 6,5 мм соответственно. В качестве рабочего газа использовался сжатый воздух с давлением торможения 4 МПа и температурой торможения 573 К. Сопло двигалось со скоростью 100 мм/с относительно подложки, дистанция напыления составляла 30 мм, шаг между осями треков — 3 мм. Помимо металлокерамических смесей напылялось покрытие из чистого алюминия. Все покрытия наносились за одно полное сканирование площади подложки.

Относительный коэффициент напыления определялся путем измерения массы покрытия (взвешивания образца до и после напыления) и нормирования на максимальное значение полученной массы.

Исследование микроструктуры покрытий проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа EVO MA15 (Zeiss, Германия), оснащенного детекторами обратнорассеянных и вторичных электронов. Содержание карбида бора в покрытиях определялось с использованием оптического микроскопа GX-51 (Olympus, Япония) и программного обеспечения Stream Essentials (Olympus, Япония) на поперечных шлифах по соотношению площадей, занятых керамическими включениями и металлической матрицей.

Результаты экспериментов. На рис. 3 представлена подложка с покрытием, на рис. 4 — СЭМ-фотографии поперечных сечений покрытий с объемной долей карбида бора $c_{Vc} = 0,03; 0,08; 0,16; 0,15$, полученных из смесей с исходной массовой долей карбида бора $c_M = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$ соответственно.

Данные измерений содержания карбида бора в покрытии и толщины покрытий при различных значениях массовой c_M и объемной c_V долей керамики представлены в таблице. Далее для упрощения анализа массовая доля карбида бора (керамики) в смеси порошков пересчитана в объемную долю по соотношению

$$c_V = \frac{c_M}{c_M + (\rho_{cer}/\rho_m)(1 - c_M)},$$

где ρ_m, ρ_{cer} — плотность металла и керамики соответственно.

При увеличении содержания карбида бора в порошке толщина покрытия уменьшается, а содержание карбида бора в среднем возрастает (за исключением покрытия, полученного из порошка с массовой долей карбида бора 0,7). Далее полученные образцы покрытий исследуются с точки зрения эффективности нейтронной защиты.

Обсуждение результатов. Рассмотрим элемент площади покрытия в плане dS_c . Произведение $h_c dS_c$ (h_c — характерная толщина покрытия) представляет собой элемент объема покрытия, в котором объем керамики равен $c_{Vc} h_c dS_c$. Представляя толщину покрытия в виде суммы толщин сплошного керамического и сплошного металлического покрытий, произведение $h_{pr} = c_{Vc} h_c$ можно трактовать как толщину только керамического покрытия. Именно эта “защитная” толщина оказывает влияние на поглощение нейтронов: чем она больше, тем лучше защитные свойства покрытия. Тогда оптимизация нейтронной защиты заключается в достижении максимальной “защитной” толщины. В таблице эта

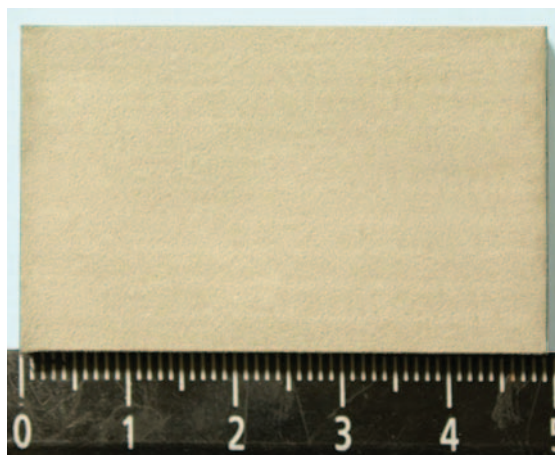


Рис. 3. Подложка с напыленным покрытием из механической смеси с массовой долей карбида бора 0,5

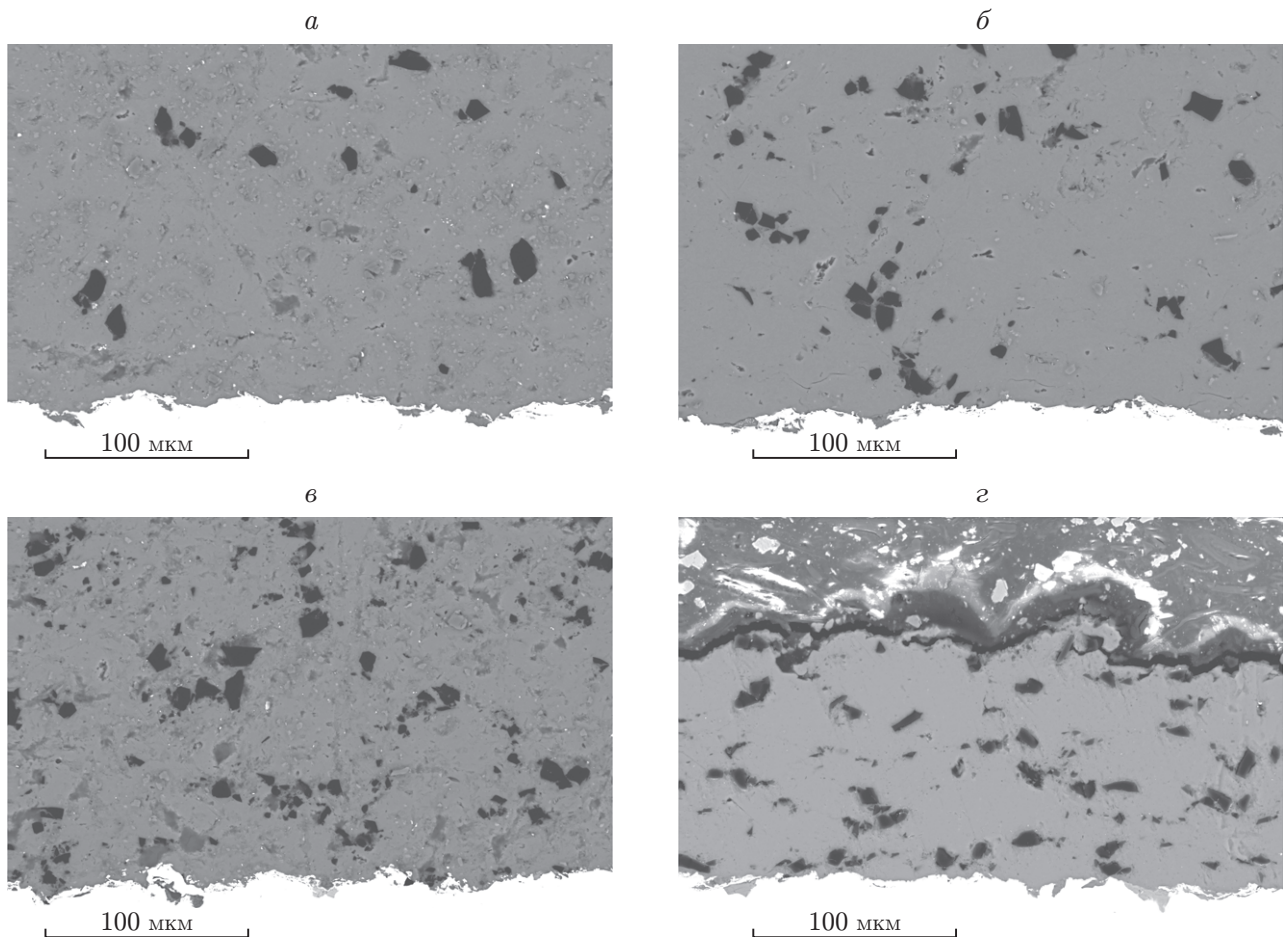


Рис. 4. СЭМ-фотографии поперечных сечений покрытий с объемной долей керамики $c_{Vc} = 0,03$ (а), $c_{Vc} = 0,08$ (б), $c_{Vc} = 0,16$ (в) и $c_{Vc} = 0,15$ (г), полученных из смесей с исходной массовой долей карбида бора $c_M = 0,1$ (а), $c_M = 0,3$ (б), $c_M = 0,5$ (в) и $c_M = 0,7$ (г)

Объемная доля карбида бора в покрытии и толщина покрытия
при различных значениях массовой и объемной долей керамики в покрытии

c_M	c_V	c_{Vc}	h_c , мкм	h_{pr} , мкм
0	0	0	500	0
0,1	0,107	0,03	420	12,6
0,3	0,316	0,08	270	21,6
0,5	0,519	0,16	170	27,2
0,7	0,716	0,15	120	18,0

Примечание. h_c — характерная толщина покрытия, h_{pr} — “защитная” толщина покрытия.

величина максимальна для образца, полученного из порошка с массовой долей карбида бора $c_M = 0,5$ ($c_V = 0,519$). Таким образом, для получения нейтронопоглощающих покрытий в условиях проведенных экспериментов (т. е. из порошков с массовой долей карбида бора 0,1; 0,3; 0,5; 0,7) оптимальной является смесь с массовой долей карбида бора 0,5.

Далее запишем соотношения, позволяющие решить поставленную задачу в общем виде.

Масса покрытия на единицу площади m_{c1} связана с удельным массовым расходом порошка G_{mixM} и временем напыления t_c выражением

$$m_{c1} = E_{mix}(c_V)G_{mixM}t_c, \quad (1)$$

где $E_{mix}(c_V)$ — коэффициент напыления смеси порошков с объемной долей керамики c_V ; величина $G_{mixM}t_c$ — масса порошка, израсходованного на единицу площади поверхности. Следует отметить, что в общем случае массовый расход порошка зависит от состава смеси. Поскольку на практике расход порошка трудно контролировать, рассмотрим два случая: 1) не меняется массовый расход порошка; 2) не меняется объемный расход порошка. Заметим, что конструкция используемых при ХГН дозаторов способствует поддержанию постоянного объемного расхода порошка.

В то же время массу покрытия m_{c1} можно выразить через геометрические размеры покрытия следующим образом:

$$m_{c1} = \rho_c h_c \quad (2)$$

(ρ_c — плотность покрытия).

В первом приближении (без учета пористости) плотность покрытия при объемной доле в нем керамики c_{Vc} равна

$$\rho_c = c_{Vc}\rho_{cer} + (1 - c_{Vc})\rho_m = \rho_m(1 - c_{Vc}(1 - \bar{\rho}_{cer})), \quad (3)$$

где $\bar{\rho}_{cer} = \rho_{cer}/\rho_m$.

Приравнявая правые части выражений (1), (2), определим связь толщины покрытия с остальными параметрами:

$$h_c = \frac{E_{mix}(c_V)G_{mixM}}{\rho_c} t_c. \quad (4)$$

“Защитная” толщина определяется по формуле

$$h_{pr} = c_{Vc}h_c = \frac{E_{mix}(c_V)G_{mixM}c_{Vc}}{\rho_c} t_c. \quad (5)$$

Необходимо найти оптимальную объемную долю керамики в смеси порошков, при которой обеспечивается максимальная скорость роста “защитной” толщины слоя покрытия (максимальная толщина при одинаковом времени напыления).

Для дальнейшего анализа необходимо определить зависимость содержания карбида бора в покрытии и коэффициента напыления смеси порошков от содержания керамики в порошке. Зависимость содержания керамики в покрытии от ее содержания в порошке найдем путем линейной аппроксимации экспериментальных данных (рис. 5):

$$c_{Vc} \approx kc_V. \quad (6)$$

Найденный при аппроксимации коэффициент равен $k = 0,248$.

Зависимость коэффициента напыления от содержания карбида бора в порошке оценим по данным измерения толщины покрытий, используя следующие предположения: 1) массовый расход порошка одинаков: $G_{mixM} = \text{const}$; 2) объемный расход порошка одинаков: $G_{mixV} = G_{mixM}/\rho_{mix} = \text{const}$ (ρ_{mix} — плотность порошка, определяемая по формуле

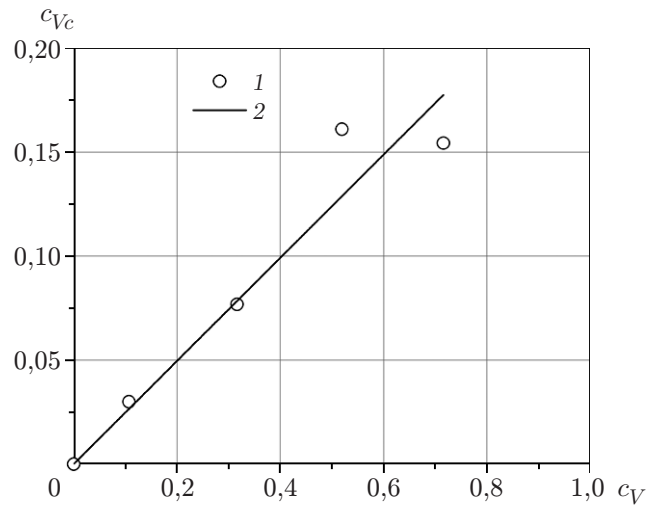


Рис. 5. Зависимость объемной доли керамики в покрытии от объемной доли керамики в порошке:

1 — эксперимент, 2 — линейная аппроксимация ($c_{Vc} = 0,248c_V$)

$\rho_{mix} = (1 - c_V)\rho_m + c_V\rho_{cer} = \rho_m(1 - c_V(1 - \bar{\rho}_{cer}))$). В первом случае коэффициент напыления пропорционален величине

$$E_{mix} \sim [1 - c_V(1 - \bar{\rho}_{cer})]h_c, \quad (7)$$

во втором случае — величине

$$E_{mix} \sim \frac{m_{c1}}{\rho_{mix}G_{mix}V} \sim \frac{1 - c_V(1 - \bar{\rho}_{cer})}{1 - c_V(1 - \bar{\rho}_{cer})} h_c. \quad (8)$$

Поскольку плотности карбида бора ($2,5 \text{ г/см}^3$) и алюминия ($2,7 \text{ г/см}^3$) близки, значения E_{mix} , вычисленные с использованием выражения (8), незначительно отличаются от вычисленных по формуле (7). При этом погрешность составляет менее 2 % для (7) и менее 4 % для (8).

На рис. 6 точками показаны значения относительного (нормированного на коэффициент напыления металлического порошка без добавления керамики) коэффициента напыления, вычисленные по формулам (7) и (8). Видно, что эти значения практически не различаются. В первом приближении зависимость коэффициента напыления от объемной доли карбида бора в порошке представим в виде

$$E_{mix}(c_V) \approx 1 - c_V$$

(кривая 3 на рис. 6), также рассмотрим случай с более точной квадратичной аппроксимацией (кривые 4, 5 на рис. 6).

Из формулы (5) для h_{pr} получаем выражение

$$h_{pr} = c_V h_c \approx \frac{kG_{mix}M c_V(1 - c_V)}{\rho_m(1 - k_2 c_V)} t_c, \quad (9)$$

где $k_2 = k(1 - \bar{\rho}_{cer})$.

Полагая массовый расход порошка $G_{mix}M$ постоянным (ниже рассмотрим случай, когда объемный расход порошка постоянный), получаем выражение

$$h_{pr} \sim \frac{c_V(1 - c_V)}{1 - k_2 c_V} \quad (10)$$

(здесь и далее постоянные множители опущены, так как не влияют на оптимальную концентрацию керамики в порошке).

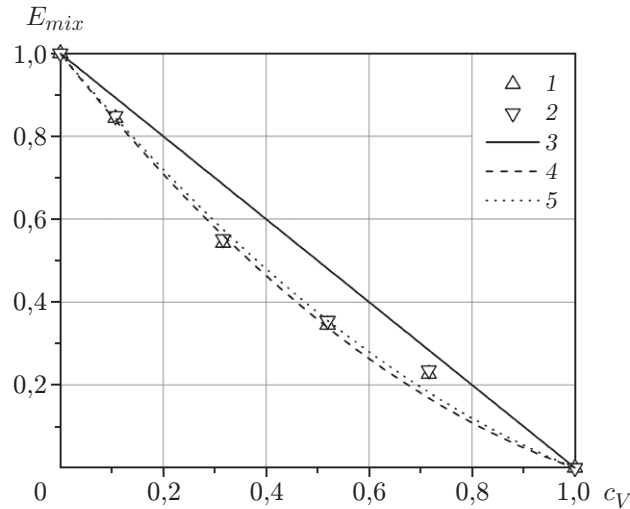


Рис. 6. Оценочная зависимость коэффициента напыления смеси от объемной доли керамики в порошке:

1, 2 — расчет (1 — по формуле (7), 2 — по формуле (8)), 3 — линейная зависимость (9), 4 — квадратичная аппроксимация данных 1 $E_{mix} = 1 - 1,57c_V + 0,57c_V^2$, 5 — квадратичная аппроксимация данных 2 $E_{mix} = 1 - 1,5c_V + 0,5c_V^2$

Поскольку плотности карбида бора ($2,5 \text{ г/см}^3$) и алюминия ($2,7 \text{ г/см}^3$) близки, коэффициент k_2 близок к нулю. В этом случае имеем

$$h_{pr} \sim (1 - c_V)c_V. \quad (11)$$

Приравнявая производную по c_V от правой части выражения (10) к нулю и решая квадратное уравнение, получаем формулу для вычисления оптимального содержания керамики в порошке, когда скорость роста “защитной” толщины максимальна:

$$c_{Vopt} \approx \frac{1 - \sqrt{1 - k_2}}{k_2}. \quad (12)$$

При $k_2 \rightarrow 0$ оптимальная объемная доля керамики в порошке стремится к пределу выражения (12), равному 0,5. Это следует также из выражения (11).

На рис. 7 показана зависимость относительной “защитной” толщины покрытия $\bar{h}_{pr}$ (нормированной на экспериментальное значение h_{pr} при $c_M = 0,5$ (см. таблицу)) от объемной доли карбида бора в порошке. Результаты расчета для случая аппроксимации коэффициента напыления квадратичной зависимостью (кривая 3 на рис. 6) показаны на рис. 7 кривой 2. Коэффициент пропорциональности в расчете выбран из условия лучшей аппроксимации экспериментальных данных. На рис. 7 видно, что кривая 2 достаточно хорошо аппроксимирует результаты экспериментов и определяет оптимальную объемную долю карбида бора в порошке (приблизительно 0,45). Для сравнения на рис. 7 кривыми 3, 4 показаны зависимости (11), (10) при том же значении коэффициента пропорциональности. Кривая 5 соответствует расчету по формуле

$$h_{pr} \sim (1 - c_V)c_V \frac{1 - k_2 c_V}{1 - k_2 c_V c_c}, \quad (13)$$

которая получается в случае, если неизменным остается не массовый, а объемный расход порошка (при этом используются линейная зависимость (9) и тот же коэффициент пропорциональности).

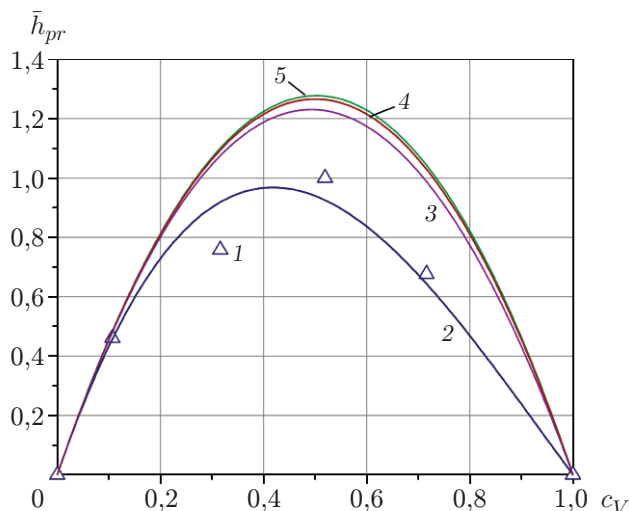


Рис. 7. Зависимость относительной “защитной” толщины покрытия от объемной доли карбида бора в порошке:

1 — эксперимент, 2–5 — расчет (2 — по формуле (6) при квадратичной аппроксимации $E_{mix}(c_V)$, 3 — по формуле (11), 4 — по формуле (10), 5 — по формуле (13))

Для смеси карбид бора — алюминий поправки, включающие множитель $1 - \bar{\rho}_{cer}$, не оказывают существенного влияния на толщину защитного покрытия. При квадратичной аппроксимации коэффициента напыления оптимальная объемная доля карбида бора в порошке приблизительно равна $c_{Vopt} \approx 0,45$. Во всех рассмотренных случаях при использовании линейной зависимости (9) оптимальная объемная доля карбида бора в порошке равна 0,5, что достаточно близко к 0,45, а “защитная” толщина слоя больше экспериментальных значений приблизительно на 25 %, что обусловлено завышенной оценкой по формуле (9) коэффициента напыления (см. рис. 6).

Выражения (12), (13) можно использовать в случаях, когда для напыления к карбиду бора добавляется металл или сплав с другой плотностью, т. е. меняется относительная плотность $\bar{\rho}_{cer}$. В этом случае изменяется зависимость коэффициента напыления и содержания керамики в покрытии от содержания керамики в порошке. В предположении, что зависимость относительного коэффициента напыления смеси порошков от объемной доли карбида бора в порошке имеет вид (9), выполним следующие оценки. Коэффициент пропорциональности k между объемными долями керамики в покрытии и в порошке оказывает влияние на оптимальную объемную долю (входит в формулу (12) в виде k_2). Кроме найденного значения 0,248 рассмотрим также значение 0,5, соответствующее большому содержанию керамики в покрытии. Заметим, что при напылении смесей металлических и керамических порошков методом ХГН часто получить большую объемную долю керамики в покрытиях не удается. Как правило, она оказывается меньше, чем в порошке (менее 0,5).

На рис. 8 кривые 1 ($k = 0,248$), 2 ($k = 0,5$), построенные по формуле (12), соответствуют случаю, когда остается постоянным массовый расход порошка, кривые 3 ($k = 0,248$), 4 ($k = 0,5$) соответствуют случаю, когда сохраняется постоянным объемный расход порошка. Кривые 3, 4 соответствуют максимуму выражения (13).

Следует отметить, что практически независимо от того, металл какой плотности добавляется к карбиду бора, оптимальная объемная доля керамики в исходной порошковой смеси приблизительно равна 0,5.

Заключение. В работе экспериментально получены зависимости коэффициента напыления смеси порошков алюминия и карбида бора и объемной доли карбида бора в по-

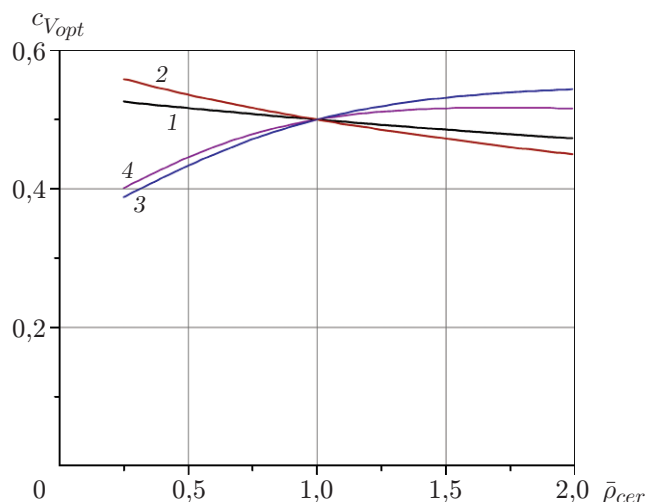


Рис. 8. Зависимость оптимальной объемной доли карбида бора в порошке от отношения плотностей $\bar{\rho}_{cer}$:

1, 2 — расчет по формуле (12) для случая постоянного массового расхода порошка,
 3, 4 — расчет по формуле (13) для случая постоянного объемного расхода порошка;
 1, 3 — $k = 0,248$, 2, 4 — $k = 0,500$

крытиях от объемной доли карбида бора в порошковой смеси. Проведен анализ закономерностей для поиска оптимального состава смеси для нанесения защитных нейтронопоглощающих покрытий методом холодного газодинамического напыления. Показано, что оптимальная объемная доля карбида бора, обеспечивающая наибольшую эффективность процесса напыления покрытий, должна составлять приблизительно 0,5 независимо от того, с каким металлом или сплавом он смешивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yandouzi M., Bottger A. J., Hendriks R., et al. Microstructure and mechanical properties of B₄C reinforced Al-based matrix composite coatings deposited by CGDS and PGDS process // Surf. Coat. Technol. 2010. V. 201. P. 2234–2246.
2. Yandouzi M., Bu H., Brochu M., et al. Nanostructured Al-based metal matrix composite coating production by pulsed gas dynamic spraying process // J. Thermal Spray Technol. 2012. V. 21. P. 609–619.
3. Huang G., Fu W., Ma L., et al. Cold spraying B₄C particles reinforced aluminium coatings // Surf. Engng. 2019. V. 35. P. 772–783.
4. Tariq N. H., Gyansah L., Wang J. Q., et al. Cold spray additive manufacturing: a viable strategy to fabricate thick B₄C/Al composite coatings for neutron shielding application // Surf. Coat. Technol. 2018. V. 339. P. 224–236.
5. Tariq N. H., Gyansah L., Qiu X., et al. Thermo-mechanical post-treatment: a strategic approach to improve microstructure and mechanical properties of cold spray additively manufactured composites // Materials Design. 2018. V. 156. P. 287–299.
6. Tariq N. H., Gyansah L., Qiu X., et al. Achieving strength-ductility synergy in cold spray additively manufactured Al/B₄C composites through a hybrid post-deposition treatment // J. Materials Sci. Technol. 2019. V. 35. P. 1053–1063.

7. **Фомин В. М., Голышев А. А., Косарев В. Ф. и др.** Создание металлокерамических структур на основе Ti, Ni, WC и B_4C с применением технологии лазерной наплавки и холодного газодинамического напыления // Физ. мезомеханика. 2019. Т. 22, № 4. С. 5–15.
8. **Фомин В. М., Голышев А. А., Косарев В. Ф. и др.** Создание гетерогенных материалов на основе порошков B_4C и Ni методом холодного газодинамического напыления с последующим послойным лазерным воздействием // ПМТФ. 2017. Т. 58, № 5. С. 218–227.
9. **Косарев В. Ф., Полухин А. А., Ряшин Н. С. и др.** Влияние состава порошковой смеси на коэффициент напыления и свойства Ni+ B_4C покрытий ХГН // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2017. № 4. С. 127–134.

*Поступила в редакцию 19/XI 2020 г.,
после доработки — 23/XII 2020 г.
Принята к публикации 28/XII 2020 г.*
