

06

Холодное газодинамическое напыление под углом смеси порошков алюминия и карбида бора

© Г.Ю. Филяков, В.Ф. Косарев, С.В. Клинков, В.С. Шикалов

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

Поступило в Редакцию 14 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 23 июня 2026 г.

Принято к публикации 26 июня 2026 г.

Проведены исследования процесса холодного газодинамического напыления смесей порошков алюминия и карбида бора (с весовым содержанием керамики 0, 0.25, 0.5, 0.75 и 1) под углами напыления (0, 15, 30, 45 и 60°). Получены зависимости массы покрытия от угла напыления и содержания карбида бора в порошке. Определены критические углы и концентрации — максимальные углы и концентрации карбида бора в порошке, при которых напыление (прирост массы покрытия) прекращается.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, композитный материал, угол напыления, коэффициент напыления.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.19.63596.20732

Метод холодного газодинамического напыления (ХГН) (в международной литературе Cold Spray) [1] благодаря ряду преимуществ, в частности высокой производительности, высокому ресурсу оборудования, возможности наращивать толщину покрытия, получать изделия при нормальных атмосферных условиях, а также востребованных в машиностроении размеров, отсутствию при производстве таких нежелательных факторов, как высокие температуры и интенсивное излучение (в противоположность плазменному напылению), взрывоопасных газов (в противоположность газоплазменному и детонационному методам), и, наконец, технологической применимости к высокоотражающим лазерное излучение материалам (медь, алюминий), привлекает внимание исследователей для разработки аддитивных технологий на его основе (см., например, работы [2–11]). При создании объемных изделий методом ХГН неизбежно возникают ситуации, когда частицы, из которых формируется изделие, сталкиваются с преградой (самим изделием) под разными углами. При этом угол столкновения влияет на процесс напыления и в первую очередь на коэффициент напыления частиц. Поэтому для моделирования процесса наращивания изделия необходимо знать, как коэффициент напыления зависит от угла (см., например, [12]). В настоящее время исследованы зависимости коэффициента напыления от угла для однокомпонентных металлических порошков, таких как алюминий, медь, титан и др. (см., например, работы [13–16]). Однако для смесей порошков, например смесей металлических и керамических порошков, несмотря на то что они широко применяются при ХГН, таких исследований нет. В настоящей работе приводятся первые результаты такого исследования.

Метод ХГН привлекателен и в области создания новых материалов для нейтронной защиты на основе

смесей карбида бора и металлов, таких как алюминий и никель (см., например, [17–19]). В настоящей работе в качестве металлического связующего компонента смеси был выбран алюминий.

В работе использовались порошки алюминия (АСД-1, сферический, средний размер $30\text{ }\mu\text{m}$) и карбида бора (угловатый, средний размер $52\text{ }\mu\text{m}$). Из данных порошков были приготовлены смеси с различным массовым содержанием карбида бора (0.25, 0.5 и 0.75).

Напыление проводилось на экспериментальной установке ХГН высокого давления (ИТПМ СО РАН, Россия) с использованием осесимметричного сопла Лавала длиной 130 mm с диаметрами критического и выходного сечения 2.8 и 6.5 mm соответственно. В качестве рабочего газа использовался азот с давлением торможения 4.0 МПа и температурой торможения 573 К.

Для изучения напыления под разными углами была изготовлена державка для образцов (плоских пластин из нержавеющей стали 12Х18Н10Т размером $50 \times 30 \times 4\text{ mm}$) с возможностью установки подложек под углами 0, 15, 30, 45 и 60° (рис. 1).

Здесь и далее угол напыления — это угол между осью сопла/струи и нормалью к поверхности плоской подложки. Для каждого угла в державке устанавливалось по три подложки для статистической обработки результатов. Сопло перемещалось со скоростью 30 mm/s вдоль средней линии подложек (горизонтально на рис. 1), так что дистанция от среза сопла до средней линии была одинакова и равна 30 mm. Дорожки покрытия наносились за один проход сопла. Подложки взвешивались до и после напыления. По разнице весов (точность измерения веса 10^{-4} g) находилась масса покрытия (или, если идет процесс эрозии, то масса эрозии) при одинаковых параметрах напыления (давление и температура торможения).

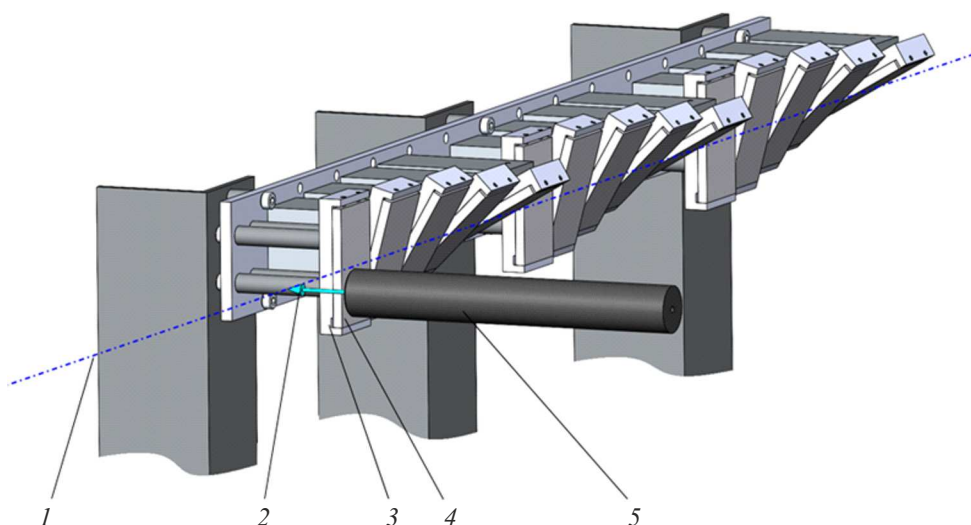


Рис. 1. Схема экспериментального напыления образцов под разными углами. 1 — средняя линия подложек, 2 — ось сопла/струи, 3 — державка подложки, 4 — подложка, 5 — сверхзвуковое сопло.

ния рабочего ускоряющего газа, скорость перемещения сопла).

На рис. 2 для примера приведены микрофотографии шлифов поперечного среза образцов с покрытием, полученных из смесей порошков с весовым содержанием карбида бора 0.25 и 0.50 при нулевом угле напыления. На рисунке внизу видна часть подложки из нержавеющей стали (самый светлый тон), затем покрытие, состоящее из алюминиевой матрицы (светло-серый тон) с вкраплениями частиц карбида бора (темно-серый тон), и сверху граница покрытия, выше которой наблюдается часть заливочного материала, используемого при создании шлифов. Видно, что качественно содержание карбида в покрытии увеличивается с ростом его в порошке. Однако более подробное изучение этого вопроса (связь содержания в покрытии с содержанием в порошке для различных углов напыления) выходит за рамки настоящей публикации и будет проведено в следующей работе.

На рис. 3 приведены результаты измерения массы покрытий в зависимости от угла напыления и содержания карбида бора в порошке. Следует отметить, что показаны одни и те же данные, но на рис. 3, *a* по оси x отложен угол, а на рис. 3, *b* — концентрация. Кривыми представлены сплайн-интерполяции экспериментальных точек.

Во-первых, отметим, что имеется предельный максимальный угол (рис. 3, *a*), а также предельная максимальная концентрация карбида бора в порошке (рис. 3, *b*), при которых еще возможно напыление (прирост массы покрытия). По пересечению сплайн-аппроксимаций с „нулевой“ линией в качестве первого приближения были определены величины этих критических параметров. На рис. 4, *a* показана зависимость критического угла от концентрации карбида бора в порошке, а на

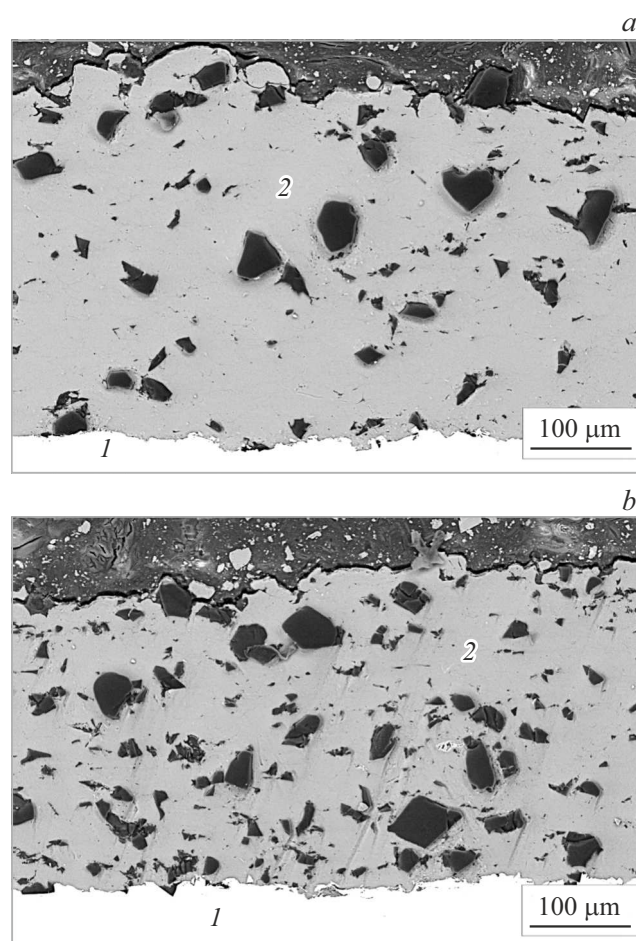


Рис. 2. Микрофотографии шлифов поперечного сечения образцов с покрытиями, полученные методом растровой электронной микроскопии. 1 — подложка, 2 — покрытие. Содержание карбида бора в порошке: *a* — 0.25, *b* — 0.5.

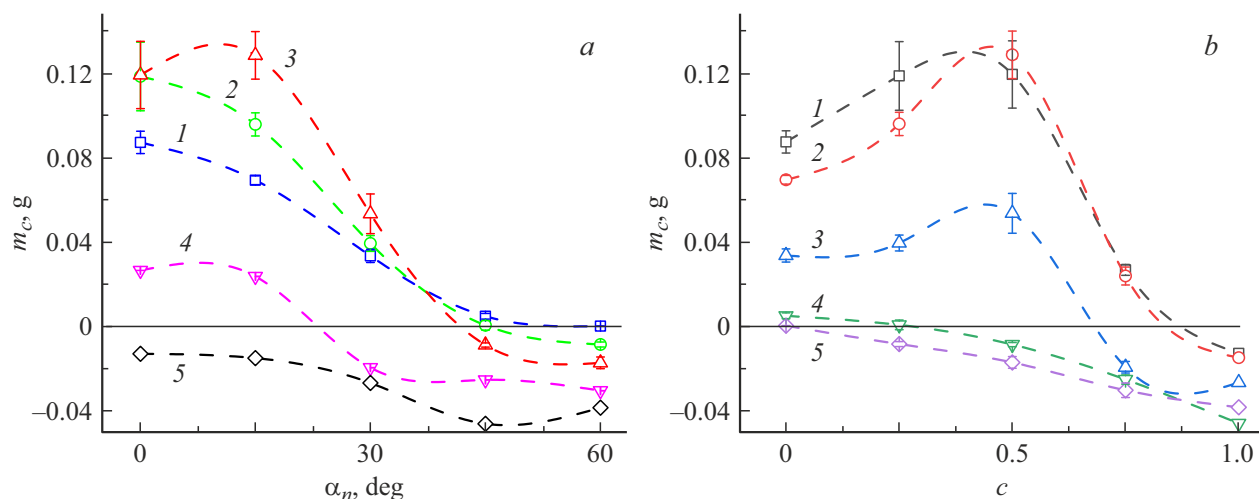


Рис. 3. Зависимость массы покрытия от угла напыления (а) и весового содержания карбида бора в порошке (б). а) 1 — алюминиевый порошок, 2–5 — смесь с различным весовым содержанием карбида бора: 2 — 0.25, 3 — 0.5, 4 — 0.75, 5 — 1.0. б) Угол напыления составляет 0 (1), 15 (2), 30 (3), 45 (4) и 60° (5).

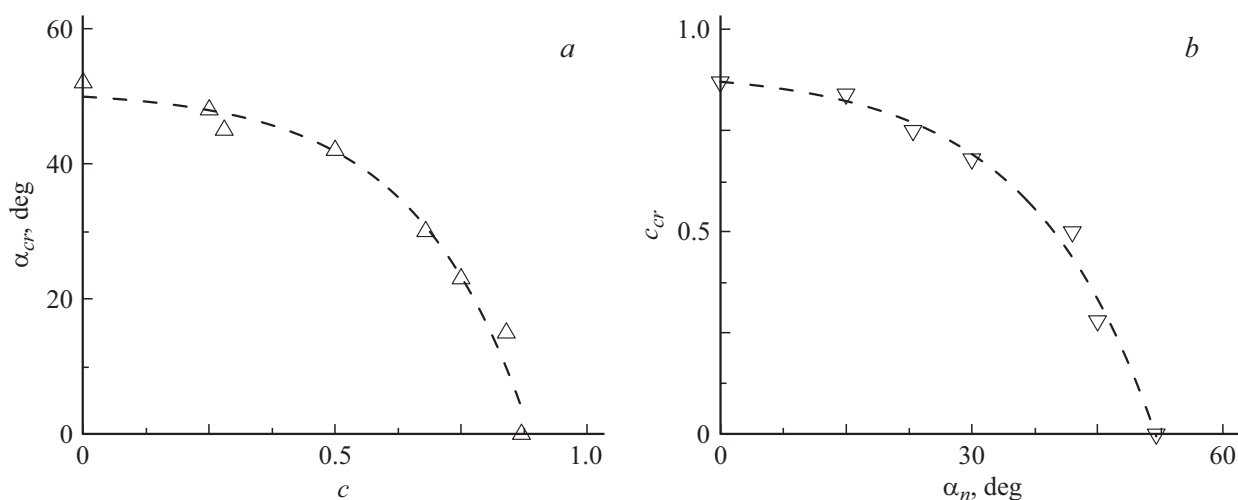


Рис. 4. Зависимость критического угла от концентрации карбида бора в порошке (а) и зависимость критической концентрации карбида бора в порошке от угла напыления (б). На части а точки при содержании карбида бора в порошке 0, 0.25, 0.5 и 0.75 получены при обработке данных рис. 3, а, остальные — данных рис. 3, б. На части б точки при углах напыления 0, 15, 30 и 45° получены на основе рис. 3, б, остальные — на основе рис. 3, а.

рис. 4, б — зависимость критической концентрации карбида бора в порошке от угла напыления. Как на рис. 4, а, так и на рис. 4, б приведены данные, полученные при обработке результатов, представленных на рис. 3, а и б. Критический угол монотонно уменьшается с увеличением содержания карбида бора в порошке (рис. 4, а), также критическая концентрация карбида бора в порошке монотонно уменьшается с ростом угла напыления (рис. 4, б). На этих рисунках кривыми показаны аппроксимации функцией вида $y(x) = y_0 - a \exp(x/x_0)$ с параметрами аппроксимаций $y_0 = 50.94$, $a = 0.992$, $x_0 = 0.2255$ (рис. 4, а) и $y_0 = 0.898$, $a = 0.0275$, $x_0 = 14.885$ (рис. 4, б).

Во-вторых, среднее значение по результатам трех измерений для смеси с 50% весовым содержанием

карбида бора при угле 15° оказалось несколько выше, чем при нормальном напылении. Этому эффекту в настоящее время затруднительно дать объяснение.

В-третьих, отметим, что чистый алюминиевый порошок показал меньшую величину напыления при углах 0–30°, но ситуация изменяется при углах больше 30°. Здесь он показывает большие величины массы напыления. Напротив, смеси с карбидом бора при углах 45–60° вместо напыления приводят к заметной эрозии подложки. Более высокое значение массы покрытия при напылении смесей с содержанием карбида бора 0.25 и 0.5 при углах менее и порядка 30° может быть связано с хорошо известным эффектом активации при добавлении в порошок абразивных частиц, каковыми и являются частицы карбида бора (см., например, работу [20]). Обрат-

ную ситуацию (при больших углах) предположительно можно объяснить эрозией от удара абразивных частиц по подложке/покрытию. Поведение кривой эрозии для порошка чистого карбида бора показано на рис. 3, а кривой 5. Можно видеть, что максимальная эрозия наблюдается при угле около 45° .

Таким образом, впервые проведены исследования процесса холодного газодинамического напыления смесей порошков алюминия и карбида бора (с весовым содержанием керамики 0, 0.25, 0.5, 0.75 и 1) под различными углами напыления (0° , 15° , 30° , 45° и 60°). Получены зависимости массы покрытия от угла напыления и содержания карбида бора в порошке, определены критические углы и концентрации.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Т.М. Видюк (Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск) за помощь в получении микрофотографий покрытий.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (номер госрегистрации 124021500014-4) с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Механика“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.П. Алхимов, С.В. Клиников, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин, *Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика* (Физматлит, М., 2010). [A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, V. Fomin, *Cold spray technology* (Elsevier Science, 2007).].
- [2] H.J. Choi, M. Lee, J.Y. Lee, *Nucl. Eng. Des.*, **240**, 2714 (2010). DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.06.038
- [3] A. Sova, S. Grigoriev, A. Okunkova, I. Smurov, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **69**, 2269 (2013). DOI: 10.1007/s00170-013-5166-8
- [4] R. Jones, L. Molent, S. Barter, N. Matthews, D. Tamboli, *Int. J. Fatigue*, **68**, 260 (2014). DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.03.013
- [5] C.A. Widener, M.J. Carter, O.C. Ozdemir, R.H. Hrabe, B. Hoiland, T.E. Stamey, V.K. Champagne, T.J. Eden, *J. Therm. Spray Technol.*, **25**, 193 (2016). DOI: 10.1007/s11666-015-0366-4
- [6] V. Champagne, D. Helfrich, *Int. Mater. Rev.*, **61**, 437 (2016). DOI: 10.1080/09506608.2016.1194948
- [7] S. Pathak, G.C. Saha, *Coatings*, **7**, 122 (2017). DOI: 10.3390/coatings7080122
- [8] S. Yin, P. Cavaliere, B. Aldwell, R. Jenkins, H. Liao, W. Li, R. Lupoi, *Addit. Manuf.*, **21**, 628 (2018). DOI: 10.1016/j.addma.2018.04.017
- [9] S. Bagherifard, M. Guagliano, *Int. J. Fatigue*, **139**, 105744 (2020). DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105744
- [10] *Cold spray in the realm of additive manufacturing*, ed. by S. Pathak, G.C. Saha (Springer, Cham, 2020). DOI: 10.1007/978-3-030-42756-6
- [11] S. Bagherifard, J. Kondas, S. Monti, J. Cizek, F. Perego, O. Kovarik, F. Lukac, F. Gaertner, M. Guagliano, *Mater. Des.*, **203**, 109575 (2021). DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109575
- [12] С.В. Клиников, В.Ф. Косарев, С.Ю. Усынин, В.С. Шикалов, *Прикладная механика и техническая физика*, **394** (6), 175 (2025). DOI: 10.15372/PMTF202415616 [S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, S.Yu. Usynin, V.S. Shikalov, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **66** (6), 1185 (2025). DOI: 10.1134/S0021894425700725].
- [13] K. Binder, J. Gottschalk, M. Kollenda, F. Gärtner, T. Klassen, *J. Therm. Spray Technol.*, **20**, 234 (2011). DOI: 10.1007/s11666-010-9557-1
- [14] S. Yin, X.K. Suo, J.Q. Su, Z.W. Guo, H.L. Liao, X.F. Wang, *J. Therm. Spray Technol.*, **23**, 76 (2014). DOI: 10.1007/s11666-025-02056-7
- [15] R. Singh, K.H. Rauwald, E. Wessel, G. Mauer, S. Schrufer, A. Barth, S. Wilson, R. Vassen, *Surf. Coat. Technol.*, **319**, 249 (2017). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.03.072
- [16] C. Zhou, C. Gong, Z. Wang, X. Tian, J. Mater. Eng. Perform., **34**, 2653 (2025). DOI: 10.1007/s11665-024-09189-w
- [17] А.Е. Чесноков, А.В. Смирнов, В.Ф. Косарев, С.В. Клиников, В.С. Шикалов, *Письма в ЖТФ*, **48** (13), 42 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.13.52744.19230 [A.E. Chesnokov, A.V. Smirnov, V.F. Kosarev, S.V. Klinkov, V.S. Shikalov, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (7), 37 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.07.54035.19230].
- [18] В.Ф. Косарев, А.А. Полухин, Н.С. Ряшин, В.М. Фомин, В.С. Шикалов, *Изв. РАН. Механика твердого тела*, № 4, 127 (2017). <http://mtt.ipmnet.ru/ru/Issues.php?y=2017&n=4&p=127> [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].
- [19] В.Ф. Косарев, С.В. Клиников, В.С. Шикалов, А.Е. Чесноков, *Физика металлов и металловедение*, **124** (3), 323 (2023). DOI: 10.31857/S0015323022600629 [V.F. Kosarev, S.V. Klinkov, V.S. Shikalov, A.E. Chesnokov, *Phys. Met. Metallogr.*, **124** (3), 308 (2023). DOI: 10.1134/S0031918X22602128].
- [20] S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, *J. Therm. Spray Technol.*, **30** (4), 1081 (2021). DOI: 10.1007/s11666-021-01176-0