

УДК 621.373.826
DOI: 10.15372/PMTF202315287

ЗАКОНЫ ПОДОБИЯ ПРИ ПРЯМОМ ЛАЗЕРНОМ ВЫРАЩИВАНИИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ТРЕКОВ

А. А. Голышев, Н. А. Сибирякова

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mails: alexgol@itam.nsc.ru, n.sib1709@gmail.com

Определены безразмерные параметры и законы подобия, описывающие геометрические размеры металлокерамического наплавляемого валика, формируемого в процессе прямого лазерного выращивания. В качестве порошковой смеси использовались титановый сплав ВТ-6 и керамика (карбид кремния SiC) с различной объемной долей. Предложена модель для оценки теплофизических параметров гетерогенного материала. Показано, что независимо от объемной доли керамики безразмерные геометрические параметры единичного трека (глубина, ширина и высота) зависят от двух безразмерных параметров: нормированной энтальпии и числа Пекле, причем эти зависимости могут быть аппроксимированы алгебраическими выражениями.

Ключевые слова: законы подобия, металлокерамика, прямое лазерное выращивание, безразмерные параметры

Введение. В настоящее время аддитивные технологии, основанные на процессе послойного выращивания объектов, активно развиваются и используются в различных отраслях промышленности. Особенно быстро возрастает потребность в изделиях из титана и сплавов на его основе, имеющих такие механические характеристики, как малая плотность, структурная стабильность, низкая теплопроводность, высокий предел упругости, высокая усталостная и коррозионная стойкость [1, 2]. В то же время титановые сплавы имеют ряд недостатков, в частности низкие износостойкость и твердость [3]. Существенно улучшить физико-механические свойства титана позволяет добавление частиц армирующего материала. В качестве армирующих элементов часто используются различные типы керамики, такие как карбид кремния SiC [4], карбид титана TiC [5], карбид бора B₄C [6] и др.

Метод аддитивного выращивания является многопараметрическим и включает большое количество процессов (поглощение лазерного излучения, плавление металла, распространение тепла в материале за счет теплопроводности и др.). Численное моделирование исследуемой системы основано на упрощении общей задачи за счет пренебрежения рядом параметров [7, 8]. Для учета большого количества параметров требуются не только значительные вычислительные мощности, но и существенные затраты времени. Поэтому при описании многопараметрических систем часто используется П-теорема, позволяющая обобщить разнообразные экспериментальные данные и сформулировать законы подобия, характеризующие исследуемый процесс [9].

Целью данной работы является определение безразмерных параметров, описывающих процесс формирования единичных треков в металлокерамической смеси ВТ-6 — SiC.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 21-79-10213).

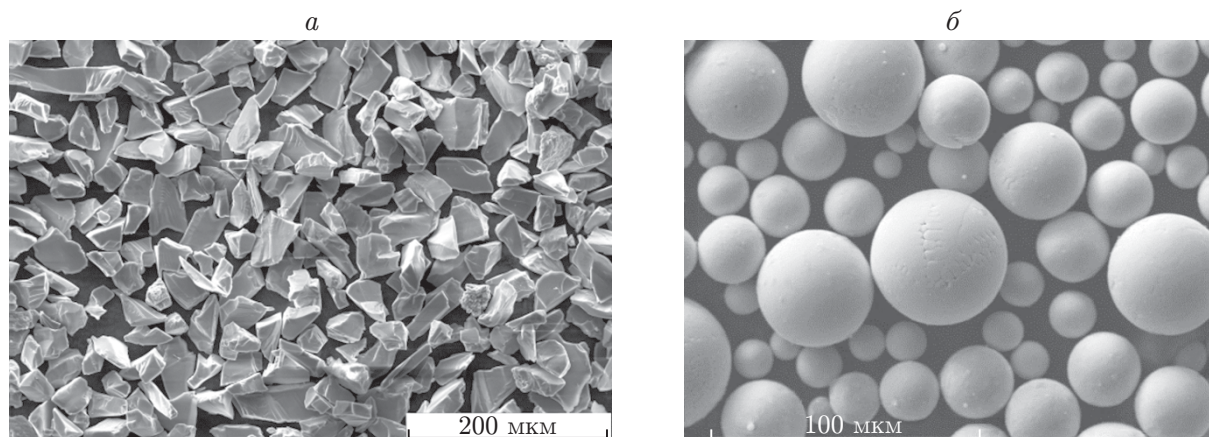


Рис. 1. Используемые порошки:

a — титановый сплав BT-6; *б* — карбид кремния SiC

1. Используемые материалы и методы. В экспериментах используются порошковые смеси из титанового сплава BT-6 (рис. 1, *a*) и карбида кремния SiC (рис. 1, *б*) с объемной долей керамики $\nu = 0, 10, 20$ %. Порошковая смесь наплавляется на подложку из титанового сплава BT-20 с размерами $50 \times 50 \times 5$ мм с использованием метода прямого лазерного выращивания (direct metal deposition (DMD)). В данном случае наплавка осуществляется следующим образом. Лазерное излучение фокусируется с помощью линзы на подложку, при этом образуется ванна расплава. Одновременно через коаксиальное сопло с использованием потока газа в ванну расплава подается струя порошковой смеси соосно с лазерным лучом. В процессе перемещения лазерного луча ванна расплава затвердевает, при этом образуется наплавочный валик (рис. 2). Проведена наплавка 63 единичных треков, значения параметров лазерного излучения находились в следующих диапазонах: мощность — $400 \div 1800$ Вт, скорость сканирования — $6 \div 32$ мм/с, диаметр лазерного пятна — $1,02 \div 8,62$ мм.

Геометрические параметры треков измерялись с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS3000. Для этого подготавливались шлифы единичных треков в поперечном сечении. Ширина трека, высота наплавки и глубина проплава определялись в соответствии с рис. 3, *a*. На рис. 3, *б* представлена фотография единичного трека в поперечном сечении.

2. Результаты исследования и их обсуждение. Известно, что при изменении параметров лазерной наплавки изменяются размеры формируемого валика. Кроме того, в зависимости от выбранных параметров могут формироваться как режим кинжального проплавления, так и режим теплопроводности. Однако в настоящее время отсутствует общая модель, определяющая характеристики наплавляемого валика в зависимости от режима лазерного воздействия. При решении рассматриваемой многопараметрической задачи используются методы подобия и размерности для определения безразмерных параметров и законов подобия.

При описании динамических теплофизических процессов используется безразмерный параметр Пекле [10]:

$$Pe = \frac{V D c \rho}{\lambda}.$$

Здесь c — удельная теплоемкость; ρ — плотность; λ — теплопроводность; V — скорость; D — диаметр лазерного пучка.

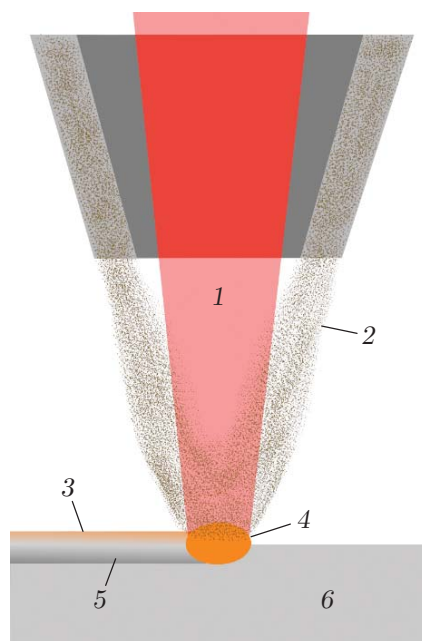


Рис. 2. Схема установки для лазерной наплавки (DMD-метод):

1 — лазерное излучение, 2 — порошок, 3 — слой наплавки, 4 — ванна расплава, 5 — слой проплава, 6 — подложка

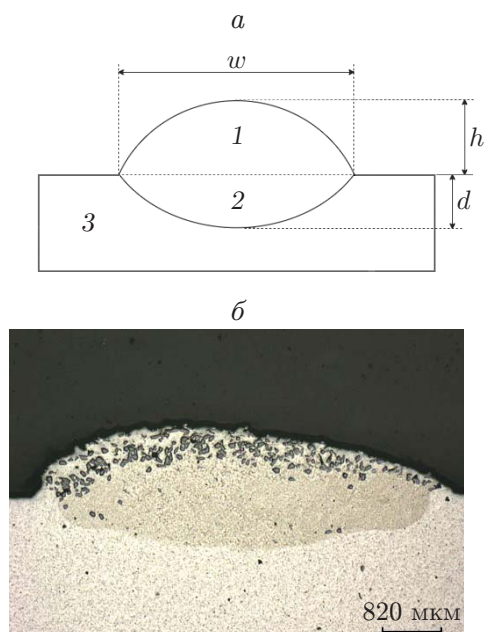


Рис. 3. Схема (а) и фотография (б) наплавленного единичного трека в поперечном сечении:

1 — зона наплавки, 2 — зона проплава, 3 — подложка

Число Пекле представляет собой отношение скорости сканирования к скорости изменения температуры в материале и не учитывает процесс поглощения лазерного излучения и плавление материала. Введем безразмерный энергетический параметр процесса лазерной наплавки. Поглощенная энергия равна $AW\tau$, где A — коэффициент поглощения; W — мощность излучения; $\tau \approx D/V$ — время. Эта энергия распределяется в объеме $\pi D^2 \sqrt{\alpha\tau}$ (πD^2 — площадь лазерного пятна; $\sqrt{\alpha\tau}$ — глубина проникания тепла; $\alpha = \lambda/(c\rho)$ — температуропроводность). Поглощенная энергия в единице объема равна величине изменения энтальпии, которую можно нормировать на величину энтальпии при плавлении $h_s = \rho c T_{пл}$ [11]:

$$B = \frac{\Delta H}{h_s} = \frac{AW}{h_s \pi \sqrt{\alpha} V D^3} = \frac{A}{T_{пл} \sqrt{\pi c \rho \lambda}} \frac{W}{\sqrt{V D^3}}.$$

Здесь ΔH — изменение энтальпии; $T_{пл}$ — температура плавления.

Так как наплавляется гетерогенная смесь ВТ-6 — SiC, при расчетах безразмерных параметров необходимо использовать осредненные значения теплофизических констант. Осреднение плотности и теплоемкости проводится по правилу смеси:

$$\rho = \rho_{SiC}\nu + \rho_{Ti}(1 - \nu), \quad c = c_{SiC}\nu + c_{Ti}(1 - \nu),$$

где ρ_{SiC} , ν , c_{SiC} — плотность, объемная доля и теплоемкость армирующей фазы (керамики) соответственно; ρ_{Ti} , c_{Ti} — плотность и теплоемкость связующей фазы (металла) соответственно; c — теплоемкость композита.

Следует отметить, что осреднение теплопроводности по правилу смеси может привести к некорректным результатам. Поэтому используем формулу [12]

$$\lambda = \lambda_{Ti} \left(1 + \nu \frac{1 - \lambda_{Ti}/\lambda_{SiC}}{1 - \nu^{1/3}(1 - \lambda_{Ti}/\lambda_{SiC})} \right).$$

Здесь λ_{Ti} , λ_{SiC} — теплопроводность связующей и армирующей фаз.

В результате расчетов по полученным формулам построены экспериментальные зависимости безразмерных геометрических параметров треков (нормированных на диаметр лазерного пучка) от безразмерной энтальпии (рис. 4) и числа Пекле (рис. 5). Расчет безразмерной энтальпии и числа Пекле для каждого трека проводился на основе используемых в эксперименте параметров лазерного излучения, коэффициент поглощения не учитывался и принимался равным единице. На рис. 4, 5 представлены данные, полученные при различных значениях объемной доли керамики в порошковой смеси. Видно, что все экспериментальные точки описываются едиными линейными (см. рис. 4) и гиперболическими (см. рис. 5) зависимостями.

На рис. 4, 6 можно выделить два характерных режима наплавки: режим теплопроводности ($B < 4,5$) и режим кинжального проплавления ($B > 4,5$). Аналогичные зоны теплопроводности и кинжального проплавления можно выделить на рис. 5, 6. Однако в данном случае невозможно определить граничное значение числа Пекле. Так как параметр безразмерной энтальпии является комбинацией задаваемых параметров лазерного излучения (мощности излучения, скорости сканирования и диаметра пучка), то использование полученных закономерностей позволяет формировать наплавочный валик с необходимыми размерами и свойствами.

Заключение. В работе проведено исследование влияния мощности лазерного излучения, скорости сканирования и размера лазерного пятна на геометрические размеры формируемого трека. Показано, что независимо от объемной доли керамики геометрические размеры треков определяются двумя безразмерными параметрами: нормированной энтальпией B и числом Пекле Pe и могут быть описаны единой зависимостью. По результатам

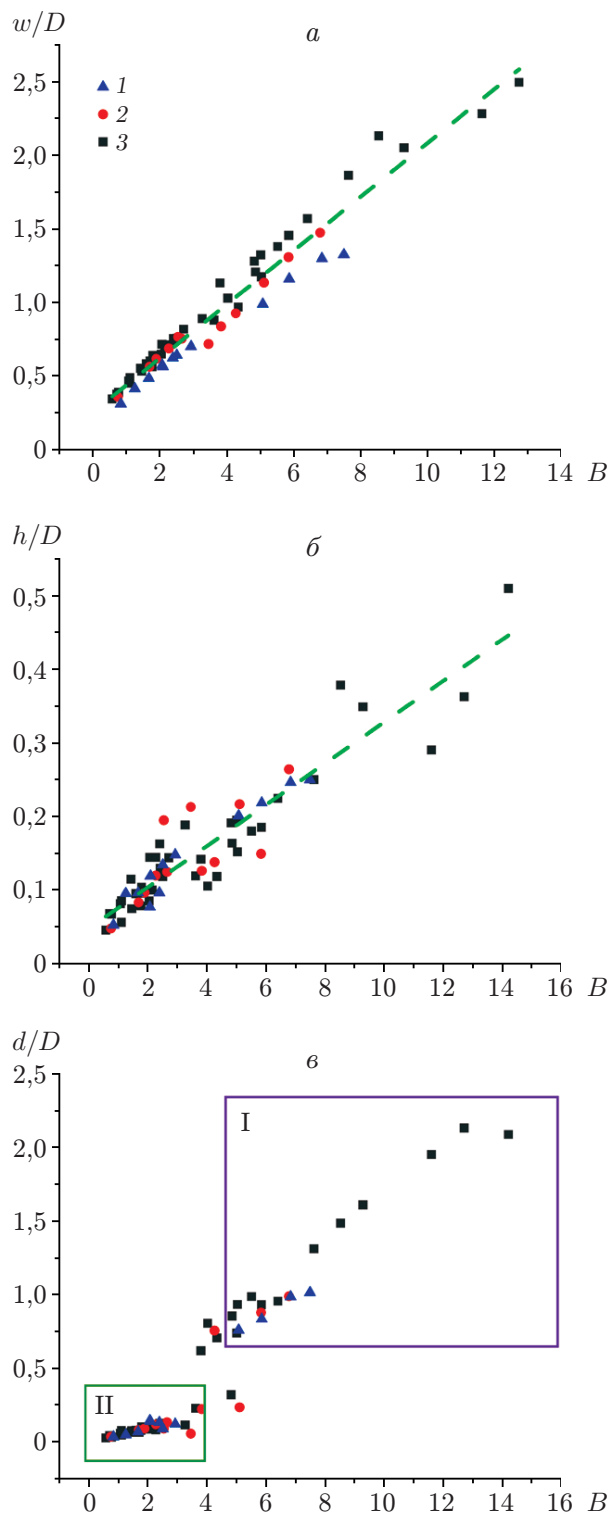


Рис. 4

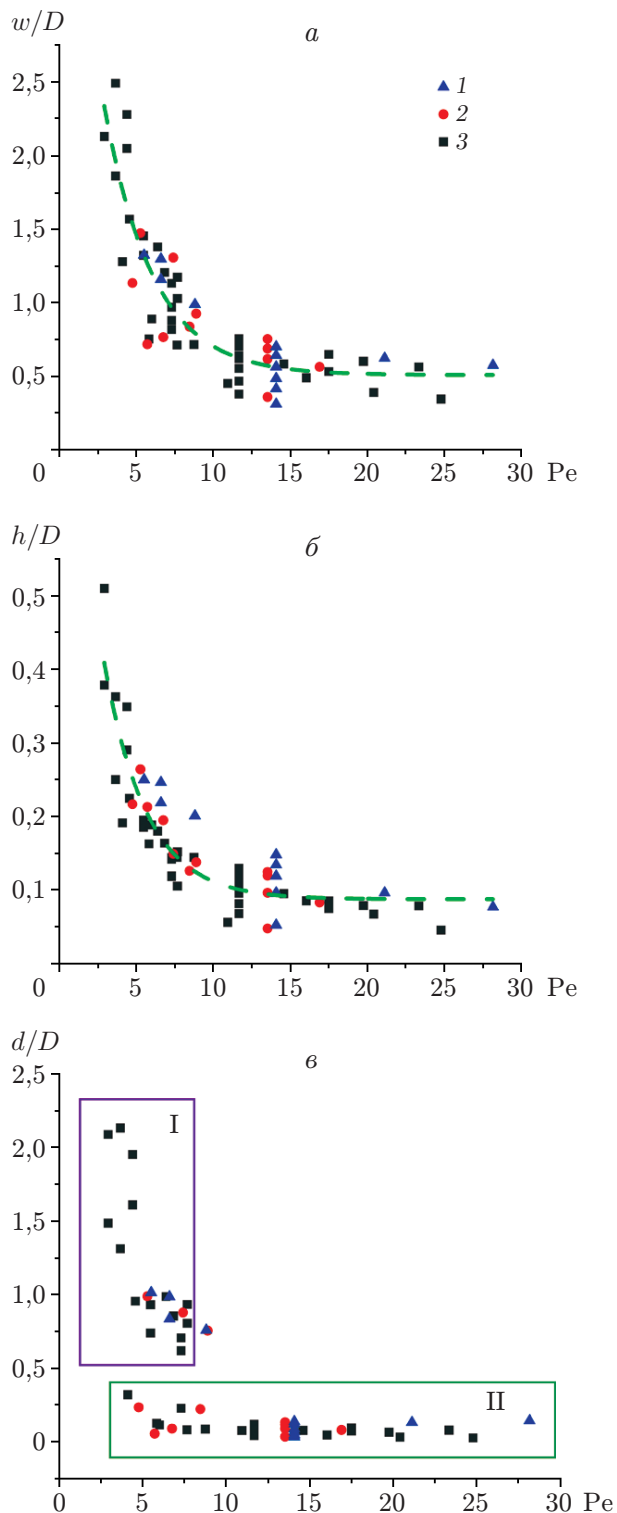


Рис. 5

Рис. 4. Зависимости безразмерных ширины w/D (*a*), высоты h/D (*б*), глубины d/D (*в*) наплавленных треков от безразмерной энтальпии B :

1 — $\nu = 0$, 2 — $\nu = 10\%$, 3 — $\nu = 20\%$; I — зона кинжального проплавления, II — зона теплопроводности; точки — экспериментальные данные, линии — аппроксимации экспериментальных данных

Рис. 5. Зависимости безразмерных ширины w/D (*a*), высоты h/D (*б*), глубины d/D (*в*) наплавленных треков от числа Пекле Pe (обозначения те же, что на рис. 4)

обработки экспериментальных данных определены области существования режимов кинжального проплавления и теплопроводности в зависимости от значений B и Pe . Определено граничное значение безразмерного параметра B для разных режимов: для режима теплопроводности $B < 4,5$, для режима кинжального проплавления $B > 4,5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pathania A., Kumar S. A., Nagesha B. K., et al. Reclamation of titanium alloy based aerospace parts using laser based metal deposition methodology // Materials Today: Proc. 2021. V. 45, pt 6. P. 4886–4892.
2. Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review // Materials Design. 2021. V. 209. 110008.
3. Фомин В. М., Голышев А. А., Маликов А. Г. и др. Создание функционально-градиентного материала методом аддитивного лазерного сплавления // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 5. С. 224–234.
4. Li N., Xiong Y., Xiong H., et al. Microstructure, formation mechanism and property characterization of Ti + SiC laser clad coatings on Ti₆Al₄V alloy // Materials Characteriz. 2019. V. 148. P. 43–51.
5. Levy A., Miriyev A., Elliott A., et al. Additive manufacturing of complex-shaped graded TiC/steel composites // Materials Design. 2017. V. 118. P. 198–203.
6. Yi J., Zhang X., Rao J. H., et al. In-situ chemical reaction mechanism and non-equilibrium microstructural evolution of (TiB₂+TiC)/AlSi₁₀Mg composites prepared by SLM-CS processing // J. Alloys Compounds. 2021. V. 857. 157553.
7. Tamanna N., Crouch R. S., Naher S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process // Optics Lasers Engng. 2019. V. 122. P. 151–163.
8. Lamikiz T. A., Ukar E., López de Lacalle L. N., et al. Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding // J. Materials Process. Technol. 2010. V. 210. P. 2125–2134.
9. Голышев А. А., Оришич А. М., Филиппов А. А. Законы подобия лазерной наплавки металллокерамических покрытий // ПМТФ. 2019. Т. 60, № 4. С. 194–205.
10. Mukherjee T., Manvatkar V., De A., DebRoy T. Dimensionless numbers in additive manufacturing // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. 064904.
11. Weaver J. S., Heigel J. C., Lane B. M. Laser spot size and scaling laws for laser beam additive manufacturing // J. Manufactur. Process. 2021. V. 73. P. 26–39.
12. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир, 1968.

*Поступила в редакцию 6/IV 2023 г.,
после доработки — 20/IV 2023 г.
Принята к публикации 24/IV 2023 г.*