

В.В. Васильцов, М.Г. Галушкин,
И.Н. Ильичев, А.И. Мисюров, В.Я. Панченко

ПОСЛОЙНАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ: АНАЛИТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Проанализирован энергетический баланс процесса лазерной наплавки порошков и проведено его сравнение с типичными экспериментальными данными. Показано, что значительная часть поглощаемой мощности лазерного излучения расходуется на испарение порошка. Изложена методика выбора и оптимизации технологических параметров для лазерной наплавки порошков. Установлено, что теплопроводность порошка может существенно увеличиваться при его плавлении вследствие последовательного образования термического контакта расплава с лежащим ниже слоем частиц. Определен диапазон значений числа Пекле, которые соответствуют эффективной лазерной наплавке порошков.

E-mail: v.vasiltsov@mail.ru, mga146@mail.ru, i.ilychev@mail.ru,
amisiurov@yahoo.ru, panch@laser.ru

Ключевые слова: лазерные технологии, лазерная наплавка порошков, энергетический баланс, процесс 3D-синтеза.

Введение. Технология объемного (3D) синтеза с лазерной наплавкой металлических порошков (быстрого формообразования и прототипирования) позволяет с высокой точностью создавать детали практически любой сложности. Особая роль этой технологии связана с ее назначением для изготовления функциональных изделий или с восстановлением их изношенных частей с хорошими прочностными свойствами [1—5]. Характеристики материалов изготовленных изделий — предел текучести, удлинение, ударная вязкость, удельная прочность — соответствуют более высоким требованиям, чем при традиционных технологиях. Особенно важно, что 3D-синтез с наплавкой металлических порошков позволяет быстро изменять состав материала путем внесения в расплав разных порошков. Это дает возможность разрабатывать гибридные или градиентные металлические композиты. Технология позволяет изготавливать детали с встроенными объектами. Детали также могут состоять из различных металлов, например медно-железный или медно-алюминиевый композит, где один материал полностью перекрывает другой, обеспечивая термостойкость, защиту от коррозии или от износа поверхности.

С учетом перечисленных причин разработкам технологии 3D-синтеза с лазерной наплавкой металлических порошков и ее внедрению в промышленность уделяется большое внимание. В настоящее время в ведущих индустриальных странах используются свыше нескольких тысяч технологических установок быстрого формообразования и прототипирования. Однако физика этих процессов ввиду их

сложности изучена пока не достаточно полно. Поэтому оптимизация параметров каждого типа установки осуществляется, в основном, эмпирическим способом.

В статье проанализирован энергетический баланс процесса лазерной наплавки порошков с нанесением их двумя способами: предварительным нанесением слоя порошка и с помощью дозатора (прямое нанесение металлов). При этом рассматриваются основные каналы затрат мощности поглощаемого излучения с учетом типичных опытных данных.

Метод послойного нанесения металлического порошка. Основой этой технологии является тепловое воздействие сканирующего пучка лазерного излучения на предварительно нанесенный слой. В таком случае важную роль играет теплопроводность порошка, которая может быть существенно ниже теплопроводности материала самих частиц вследствие воздушных пор между ними. В конечном счете воздушные поры между частицами во многом определяют теплопроводность металлических порошков [4, 5, 7]. Кроме того, теплопроводность материала зависит от температуры плавления. Причина заключается в том, что под воздействием излучения прежде всего расплавляются частицы верхнего слоя, на которые попадает прямое излучение. Образовавшийся расплав может заполнять воздушные поры и тем самым обеспечивать термический контакт жидкого металла с лежащим ниже слоем. Такой процесс продолжается последовательно до самого нижнего слоя частиц. В работе [8] исследовалось влияние течения жидкой фазы на теплопроводность порошка при спекании его с добавкой компонентов, имеющих низкую температуру плавления, когда сохраняется каркас из тугоплавких частиц. Однако вследствие наличия каркаса тугоплавких частиц расплав легкоплавких компонентов не может оказывать такое же сильное воздействие на теплопроводность порошка, как при плавлении всех его элементов.

В статье рассмотрен случай плавления монопорошка, поэтому принимается, что значение теплопроводности при его плавлении близко к значению теплопроводности для материала частиц.

Учет плавления также важен для вопросов моделирования поглощения лазерного излучения порошком. Для тонких пористых слоев порошка в некоторых работах вместо поверхностного источника тепловыделения рассмотрен объемный источник, как при распространении излучения в дисперсной поглощающей среде. Однако в условиях плавления порошка вследствие влияния расплава модель поверхностного источника тепловыделения может быть более адекватной реальным процессам поглощения.

Перейдем к рассмотрению энергетического баланса, который учитывает основные каналы расходования поглощаемой энергии лазерного излучения. К полезным затратам относится прежде всего мощность, требуемая для плавления валика порошка [5]

$$P_T = \rho_0 d_0 h V (C_p T_T + H_T), \quad (1)$$

где ρ_0 — плотность материала частиц; d_0 — диаметр пучка лазерного излучения на поверхности порошка; h — толщина валика порошка; V — скорость сканирования пучка лазерного излучения (скорость наплавки); C_p — удельная теплоемкость; T_T , H_T — температура плавления и удельная энергия плавления материала частиц порошка.

Кроме мощности P_T , требуется мощность P_T для плавления или для достаточного нагрева верхней части лежащего ниже слоя, либо подложки (для первого слоя). Для оценки величины P_T используем линейную аппроксимацию распределения температуры по глубине. В принятом приближении мощность, расходуемая на обеспечение термической связи наплавляемого валика (часто называемого вектором) диаметром d_0 , находится как

$$P_T = \frac{1}{2} \rho_0 d_0 V (h_T - h) C_p T_T, \quad (2)$$

где $h_T - h = \Delta h$ — глубина проникания температурной волны вглубь лежащего ниже слоя, на поверхности которого температура равна T_T , причем

$$h_T \approx \sqrt{\chi t_b} = \sqrt{\chi \frac{d_0}{V}}, \quad (3)$$

где χ — температуропроводность; t_b — время воздействия.

Учитывая приближенное равенство

$$\frac{T_0}{\sqrt{\chi t_b}} = \frac{T_T}{\Delta h}, \quad (4)$$

из (2) получаем

$$P_T \approx \frac{1}{2} \frac{T_T^2}{T_0} C_p \rho_0 d_0 \sqrt{\chi d_0 V}, \quad (5)$$

где T_0 — температура облучаемой поверхности наплавляемого слоя. Из (4) нетрудно найти, что

$$\Delta h = \frac{T_T}{T_0 - T_T} h. \quad (6)$$

Тогда глубина термического воздействия на лежащий ниже слой или подложку (для первого слоя) становится минимальной, если температура поверхности наплавляемого слоя достигает температуры кипения T_V : $T_0 = T_V$. Для $T_0 < T_V$ величину Δh определяют как

$$\Delta h \approx \frac{\pi}{4} d_0^2 \frac{a_0 T_T}{\eta_L P_L}, \quad (7)$$

откуда (2) принимает вид

$$P_T \approx \frac{\pi}{8} \frac{\rho_0 d_0 V C_p a_0 T_T^2}{\eta_L P_L}, \quad (8)$$

где a_0 — теплопроводность материала частиц порошка; η_L — коэффициент поглощения излучения; P_L — мощность лазерного излучения.

Мощность, расходуемую на нагрев жидкой фазы, можно оценить по формуле

$$P_H \approx \frac{1}{2} \rho_0 h d_0 V C_p (T_0 - T_T). \quad (9)$$

Очевидно, что максимальное значение температуры T_0 равно значению температуры кипения ($T_0 = T_V$). При такой температуре заметная часть порошка начинает испаряться, что связано с дополнительной затратой мощности

$$P_V = m' H_V, \quad (10)$$

где m' — масса порошка, испаряющаяся в единицу времени; H_V — удельная энергия испарения.

Общий баланс мощности при $T_0 = T_V$

$$\eta_L P_L = P_T + P_H + P_V, \quad (11)$$

где $P_V = 0$ при $T_0 < T_V$. В рамках приближения $T_0 = T_V$ также справедливо равенство вида

$$h \approx \frac{(T_V - T_T)}{T_V} h_T = \frac{(T_V - T_T)}{T_V} \sqrt{\chi t_b}, \quad (12)$$

где $t_b \approx d_0 / V$. Кроме того, должно выполняться условие нагрева одномомерным поверхностным источником [5]

$$d_0 \geq h. \quad (13)$$

Из (12) и (13) находятся значения числа Пекле, необходимые для эффективного наплавления порошков:

$$Pe = \frac{V}{2\chi} \geq \frac{(T_V - T_T)}{2T_V^2}. \quad (14)$$

Соотношение (14) имеет большое значение для выбора скорости наплавки порошка и диаметра пучка лазерного излучения на его поверхности. Из (12) следует оценка толщины валика порошка

$$h = \frac{d_0}{\sqrt{2}} \frac{(T_V - T_T)}{T_V \sqrt{Pe}}. \quad (15)$$

После определения скорости сканирования пучка лазерного излучения и толщины валика, из (11) можно найти мощность, расходуемую на испарение порошка, которое сопровождается удалением части его массы

$$\Delta m = \frac{P_V}{H_V} t_b \approx \frac{P_V}{H_V} \frac{d_0}{V} \quad (16)$$

и уменьшением толщины валика

$$\Delta h = \frac{4\Delta m}{\pi \rho_0 d_0^2} \approx \frac{4}{\pi} \frac{P_V}{\rho_0 H_V d_0 V}. \quad (17)$$

Уравнения (1), (2), (5), (8), (11) описывают энергетический баланс, а соотношения (13)—(15) приближенно отражают динамику нагрева. Указанные соотношения очень полезны для выбора параметров, их оптимизации и анализа процесса технологии объемной наплавки порошка, несмотря на то, что они не учитывают всех факторов, влияющих на этот технологический процесс.

Нанесение металлических порошков с помощью дозатора. Использование дозатора позволяет непосредственно наносить порошок в облучаемую зону сканирующего пучка лазерного излучения. Нагрев частиц начинается при их движении в пределах лазерного излучения и продолжается на облучаемой поверхности наплавляемого валика металлического порошка. Один из основных параметров дозатора — массовая скорость M' , т. е. масса порошка, исходящая в единицу времени из выходных отверстий дозатора. Сохранение массы описывается соотношением

$$k_d M' t_b = \frac{\pi}{4} k_n \rho_0 d_0^2 h_0, \quad (18)$$

где k_d — коэффициент использования порошка, учитывающий расходимость его потока и другие технические факторы; k_n — коэффициент пористости. С учетом характерного времени воздействия из (14) получаем формулу для толщины насыпаемого слоя порошка [5]

$$h_0 = \frac{4}{\pi} \frac{k_d M'}{k_n \rho_0 d_0 V}, \quad (19)$$

причем $h_0 > h$ вследствие усадки порошка при плавлении и его частичного испарения.

Для наплавления валика толщиной h мощности, расходуемые на плавление верхней части лежащего ниже слоя P_T , нагрев жидкой фазы P_H и испарение P_V , можно оценить по (1), (2), (5), (8), (9) и (11).

Рассмотрим пример ориентировочного выбора технологических параметров для наплавки коррозионно-стойкой стали с предварительным нанесением слоя порошка для относительно малой мощности лазера $P_L = 30$ Вт и $d_0 = 0,01$ см. Из условия эффективного теплового воздействия поверхностным лазерным источником (14) определяется скорость наплавки. Если $V = 10$ см/с, то толщина наплавляемого слоя $h = 0,056$ см. Далее по (1) вычисляется мощность для плавления валика высотой h и диаметром d_0 со скоростью $V = 10$ м/с $P_T = 5$ Вт, а затем мощности $P_T = 2,6$ и $P_H = 4$ Вт. Мощность (11), расходуемая на испарение, составляет $P_V = 3,4$ Вт. Около 22 % поглощаемой мощности тратится на испарение порошка, что может уменьшить толщину валика на $\Delta h = 0,001$ см (см. (17)). Получаем следующие ожидаемые значения параметров: $P_L = 30$ Вт; $d_0 = 0,006$ см; $V = 10$ см/с; $h = 0,01$ см.

Сравним расчетные данные с экспериментальными данными (в эксперименте эмпирическим методом были выбраны технологические параметры, обеспечивающие качественное наплавление валика порошка). В технологической установке использовался мощный многоканальный технологический CO_2 -лазер «Гибрид» со средней мощностью излучения до 2,5 кВт, разработанный в ИПЛИТ РАН, и дозатор [9]. Поток порошка из дозатора направлялся под углом 40° к вертикально падающему пучку лазерного излучения и попадал в зону пятна излучения на поверхности порошка. Значения коэффициента использования порошка было близко к 0,7. В экспериментах проводилась наплавка слоев (до нескольких десятков) из различных материалов, в том числе из никеля (никель 98,3 % и кобальт 2 %), вольфрама с использованием дозатора и молибдена (99 %) без использования дозатора способом предварительного нанесения слоя. Технологические параметры при наплавке слоев из порошка никеля: $V = 0,49$ см/с; $d_0 = 0,5$ см; $P_L = 2,5$ кВт; $h = 0,083$ см. Для выбранных значений V и d_0 число Пекле $Pe = 0,5$ и находится в диапазоне допустимых значений (14). Из формулы (1) следует, что для наплавления валика порошка толщиной $h = 0,083$ см должна расходоваться мощность $P_T = 175$ Вт. По формуле (9) находим $P_H = 52$ Вт, а по (5) — $P_T = 177$ Вт. Затем для $\eta_L = 0,5$ из (11) определяем мощность $P_V = 847$ Вт, а по (17) — уменьшение толщины наплавляемого валика порошка $\Delta h = 0,077$ см. При этом на испарение расходуется 67 % поглощаемой мощности лазерного излучения.

Наплавка слоя вольфрама осуществлялась при значениях параметров: $V = 1$ см/с; $d_0 = 0,3$ см; $P_L = 1,5$ кВт; $h = 0,0625$ см. После проведения расчетов имеем $Pe = 0,48$, $P_T = 220$ Вт, $P_H = 56$ Вт, $P_T = 332$ Вт, $P_V = 140$ Вт, $\Delta h = 0,06$ см. На испарение затрачивается около 11 % поглощаемой мощности излучения.

Порошок молибдена имел очень мелкую фракцию, поэтому он наплавлялся без дозатора, способом предварительного нанесения слоя. Эксперимент проводился при значениях параметров: $V = 0,8$ см/с; $d_0 = 0,3$ см; $P_L = 2$ кВт. Толщина наплавленного валика порошка $h = 0,06$ см.

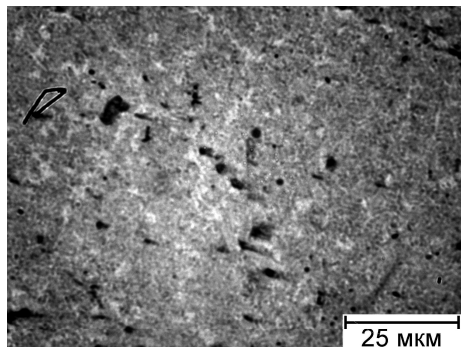
Значение числа Пекле $Pe = 0,23$ соответствует ограничению (14) на этот важный параметр. Для использованных в эксперименте величин h , V , d_0 и P_L получаем следующие значения мощности: $P_T = 331$ Вт; $P_T = 123$ Вт; $P_H = 31$ Вт; $P_V = 509$ Вт. Тогда $\Delta h = 0,047$ см. Следовательно, около 51 % поглощаемой мощности расходуется на испарение порошка.

В следующем эксперименте толщина $h = 0,03$ см при $d_0 = 0,4$ см, $V = 1$ см/с и $P_L = 1,5$ кВт. Аналогично получаем значения $Pe = 0,38$, $P_T = 102$ Вт, $P_T = 570$ Вт, $P_H = 30$ Вт, $P_V = 47$ Вт и $\Delta h = 0,0025$ см. В этих условия на испарение расходуется только 6 % поглощаемой мощности в предположение, что $\eta_L = 0,5$.

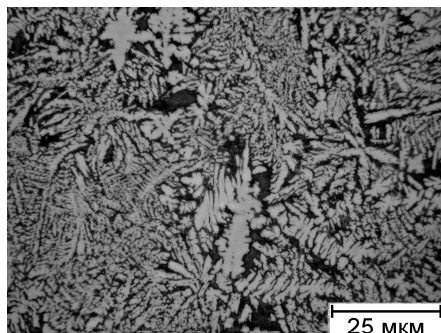
Проведенные расчеты подтверждают согласованность выбранных экспериментальным методом технологических параметров P_L , d_0 , h и V . Кроме того, теоретический анализ приводит к выводу, что в процессе наплавки порошка происходит частичное его испарение. Визуально испарение наблюдается в виде светящегося факела паров, которое не является плазмой, так как для ее образования требуется значительно более высокая интенсивность излучения.

Следовательно, испарение является важным фактором для качественной наплавки. Пока можно только предположить, что его роль сводится к прессованию жидких капель порошка с помощью силы отдачи паров (значительная часть поглощаемой мощности излучения расходуется на испарение). Кроме того, при температуре кипения становится минимальной глубина термической связи между слоями. Был выполнен металлографический анализ полученных материалов. На рисунке показаны результаты измерения микроструктур образцов молибдена (99 %), никеля (98,3 %), кобальта (2 %) и вольфрама.

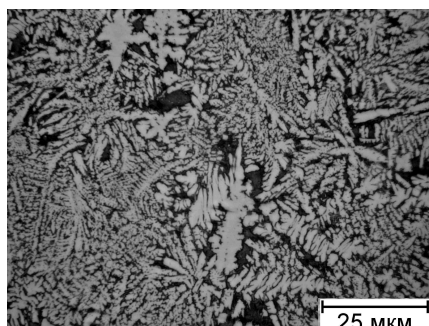
При наплавке порошком молибдена (часть *a* рисунка) формируется однородная структура, что в принципе должно обеспечивать высокие эксплуатационные свойства. Изменение режима приводит к появлению пор в наплавленном металле.



a



б



в

Микроструктуры образцов из молибдена (а), никеля, кобальта (б) и вольфрама (в)

При наплавке порошком никеля формируется направленная ячеисто-дендритная структура, которая может обеспечить высокую коррозионную стойкость. Некоторые участки наплавленного металла имеют поры, что можно связать с неоптимальностью режимов прокалики присадочного порошка.

При наплавке порошка вольфрама в наплавленных слоях наблюдается структура, типичная для литого вольфрама. Неярко выраженная направленность структуры проявляется в зонах сплавления отдельных валиков.

Одной из особенностей теплофизических процессов в лазерной наплавке порошков является довольно значительные градиенты температуры по толщине наплаваемого слоя. При кристаллизации могут возникать термические напряжения вследствие изгиба слоя, поверхность которого в течение некоторого времени, пока выравнивается температура, становится выпуклой.

Выводы. Количественный анализ энергетического баланса процесса лазерной наплавки порошка и его сравнение с типичными экспериментальными данными показывает, что довольно значительная часть поглощаемой мощности расходуется на испарение порошка. С учетом этого фактора возможны выбор и оптимизация технологических параметров, а также более полное изучение физики самого процесса. Для эффективной наплавки необходимым условием является превышение числа Пекле определенного значения, зависящего только от температуры плавления и кипения материала частиц порошка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bourel D.L., Marcus H.L., Barlov J., Beamen J.J. // *Int. J. Powder Metall.* 1992. No. 28. — P. 369.
2. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — С. 664.
3. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Шиганов И.Н., Кротких А.Д. Исследование технологических особенностей лазерной объемной наплавки. Межд. конф. «Лучевые технологии и применение лазеров»: Труды. — СПб. — С. 137—142.
4. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — С. 424.
5. Panchenko V.Ya., Golubev V.S., Vasiltsov V.V., Galushkin M.G., Ilyichev I.N. Technologies and Physical Mechanisms of Laser 3D Synthesis of Metallic Powder Materials // X International Conf. Laser and Laser-information Technologies: Fundamental Problem and Applications”, ILLA`2009, VI International Symposium, Laser Technologies and Laser, LTL`2009 (2010), Published by OPTELA 4023 Plodiv, Bulgaria, March 2010. — P. 122—128.
6. Гусаров А.В., Ковалев Е.П. Эффективная теплопроводность свободно насыпанных и слабо спеченных порошков. Модель // *Физика и химия обработки материалов.* 2009. № 1. — С. 70—82.
7. Физические особенности селективного лазерного спекания порошковых металл-полимерных композиций / А.М. Иванов, С.П. Котова, Н.Л. Куприянова и др. // *Квантовая электроника.* 1998. Т. 25. № 5. — С. 433.
8. Zhang Yu., Faghri A. Melting and Solidification of a Subcooled Mixed Powder Bed with Moving Gaussian Heat Source. // *J. Heat Trans.* 1998. Vol. 120. — P. 883.
9. Технологическая установка для процесса СЛС на базе мощного CO₂-лазера / В.Я. Панченко, В.О. Александров, В.В. Васильцов, А.В. Григорьев и др. // *Физика и химия обработки материалов.* 2011. № 6. — С. 5—9.

Статья поступила в редакцию 11.09.2012