

ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДИСПЕРСНОСТИ ПОРОШКА НА ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

И.И. Антропов

Проведен анализ известных теоретических и экспериментальных исследований процесса лазерного спекания диэлектрических и металлических порошков, определена роль оптических, теплофизических и размерных параметров порошка при постановке задач нагрева пористой среды лазерным излучением.

Ключевые слова: селективное лазерное спекание, коэффициент поглощения, теплопроводность.

Применение различных аддитивных технологий, в том числе и селективного лазерного спекания, набирает все большую популярность в последние годы. Это связано с широким спектром возможностей по быстрому изготовлению как прототипов отдельных узлов, так и при мелкосерийном или единичном производстве готовых изделий произвольной формы или с комплексными свойствами, что зачастую невозможно реализовать с

использованием традиционных способов обработки. Среди областей использования технологии можно выделить приборостроение, машиностроение, биотехнологии, медицина и пр. [1–4]. В качестве материалов, применяемых для СЛС как правило применяют керамические, полимерные, металлические порошки или композиты на их основе с типичным размером от 10^{-2} до 10^2 мкм [2]. Набор технологически функциональных источников лазерного излучения при этом ограничен Nd:YAG, CO₂ и волоконными лазерами, т.е. ближней и средней инфракрасной областями.

Выбор правильного режима обработки и возможность его быстрой адаптации под используемый материал однозначно определяет качество изготовленного изделия или нанесенного покрытия. Безусловно, более чем за 20 лет развития технологии лазерной обработки материалов разработано большое количество математических моделей взаимодействия излучения с проводящими и диэлектрическими сплошными средами, однако определение параметров для реализации лазерного спекания порошков является актуальной задачей и сегодня. Это связано, во-первых, с необходимостью учета в математической модели, помимо особенностей поглощения излучения обрабатываемым материалом, имеющейся и требуемой пористости изделия, и, во-вторых, особенностей поглощения излучения частицами, размер которых соизмерим с рабочей длиной волны.

Рассмотрим основные подходы к решению задачи теплофизического анализа процесса лазерного селективного спекания.

Математическая постановка задачи определения параметров процесса селективного лазерного спекания является комплексной и в общем случае должна включать решение системы уравнений Навье-Стокса с учетом особенностей взаимодействия излучения с используемым веществом, степени и однородности дисперсности материала, полноты фазовых превращений, необходимости учета теплообмена за счет теплопроводности, конвективного и излучательного теплообмена.

Известно, что металлы лучше поглощают на длине волны 1,064 мкм, в то время как полимеры – на длине волны 10,64 мкм. В табл. приведены данные [2] о коэффициентах поглощения (на длине волны 1,06 мкм) и теплопроводности ряда порошковых смесей, которые могут использоваться для реализации СЛС. Степень дисперсности порошка составляла от 50 до 160 мкм. Как видно из приведенных значений, наиболее энергоэффективными материалами является полиамид и смеси на его основе. Диспергирование приводит к значительному снижению теплопроводности и необходимости учета в математической модели слагаемых, описывающих нестационарную газовую динамику в спекаемом слое, т.е. рассмотрение процессов в пористой среде. Кроме того, сравнительно высокая пористость в зоне обработки будет обуславливать усадку в зоне обработки, которую необходимо учитывать при нанесении следующего слоя материала.

Таблица
Оптические и теплофизические характеристики материалов для СЛС [2]

Наименование порошковой композиции	Состав	Коэффициент отражения, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	
			материала	порошка
Полиамид – П12	–	92	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$(7,6-18,6) \cdot 10^{-2}$
Никелиновый наплавочный ПГСР4	–	30	67–74	$(5,4-11,2) \cdot 10^{-1}$
Смесь ПГСР4:П12	1:1	47	–	–
Смесь ПГСР4:П12	10:1	30	–	$1,30 \cdot 10^{-1}$
Латунный наплавочный ПГ-19М-01	–	46	80–150	$(3,8-4,6) \cdot 10^{-1}$
Смесь ПГ-19М-01:П12	1:1	53	–	–
Смесь ПГ-19М-01:П12	10:1	45	–	–

Необходимо также отметить, что от типа и степени дисперсности материала будет зависеть характер теплового источника. Так, если для диэлектрических порошков задача нагрева лазерным излучением является однозначно объемной, то в случае обработки металлических порошков она становится объемной только при определенной степени дисперсности, что связано с механизмом поглощения лазерного излучения проводниками. Как правило, для разграничения поверхностных и объемных задач нагрева лазерным излучением соотносят толщину скин-слоя обрабатываемого материала с размерами зоны лазерного воздействия. Достаточно точно скин-слой можно оценить по формуле:

$$\Delta = c \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \rho}{\omega \mu}},$$

где c – скорость света; ε_0 – электрическая постоянная, ρ – удельное сопротивление материала, ω – частота электромагнитного излучения, μ – магнитная проницаемость среды.

Оценки для приведенных в табл. материалов дают значения порядка 10–100 нм, что говорит о том, что для ультрадисперсных металлических порошков рациональным является рассмотрение задачи нагрева также с точки зрения объемного теплового источника в пористой среде. В такой постановке возникает необходимость введение в общий алгоритм расчета СЛС уравнений Максвелла, как это было сделано, например, в [5].

Фазовые превращения в облучаемом материале, как правило, описываются задачей с подвижной границей раздела жидкой и твердой фаз [6] (в том числе для многокомпонентных составов) либо в приближении полного расплавления материала на глубину нескольких слоев порошка [7].

Качество поверхности и пористость изделия напрямую зависит от однородности фракционного состава материала и степени сферичности гранул [8–10]. Большая степень неоднородности исходного порошка приводит к увеличению вероятности получения в спеченном слое протяженных несплошностей, приводящих к ухудшению эксплуатационных качеств.

Заключение. Проведенный анализ процессов, происходящих при реализации селективного лазерного спекания полимерных, металлических и композитных материалов показал, что степень дисперсности и однородность размеров порошка определяют способы построения математической модели процесса. В частности, они определяют механизм поглощения излучения и тип источника в задаче теплообмена, вид уравнений Навье-Стокса и непрерывности.

Библиографический список

1. Ude, C. New perspectives in shake flask pH control using a 3D-printed control unit based on pH online measurement / C. Ude, T. Hentrop, P. Lindner, T.H. Lücking, T. Scheper, S. Beutel // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2015. – Vol. 221. – Pp. 1035–1043.
2. Шишковский, И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий / И.В. Шишковский. – М.: Физматлит, 2009. – 424 с.
3. Xie, F. Fabrication and characterization of porous Ti-4Mo alloy for biomedical applications / F. Xie, X. He, J. Yu, M. Wu, X. He, X. Qu // *Journal of Porous Materials*. – 2016. – Pp. 1–8.
4. Bourell, D.L. Performance limitations in polymer laser sintering / D.L. Bourell, T.J. Watt, D.K. Leigh, B. Fulcher // *Physics Procedia*. – 2014. – Vol. 56. – Pp. 147–156.
5. Галёв, Р. В. Об использовании уравнений Максвелла при численном моделировании лазерного взаимодействия с материалами / Р.В. Галёв, О.Б. Ковалев // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика*. – 2014. – Т. 9, Вып. 2. – С. 55–64.
6. Низьев, В.Г. Численное моделирование лазерного спекания металлических порошков / В.Г. Низьев, Ф.Х. Мирзаде // *Вестник РФФИ*. – 2014. – № 3. – С. 58–67.
7. Liu, F.R. Micro scale 3D FEM simulation on thermal evolution within the porous structure in selective laser sintering / F.R. Liu, Q. Zhang, W.P. Zhou, J.J. Zhao, J.M. Chen // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – Vol. 212. – Pp. 2058–2065.
8. Dupin, S. Microstructural origin of physical and mechanical properties of polyamide 12 processed by laser sintering / S. Dupin, O. Lame, C. Barrès, J.-Y. Charneau // *European Polymer Journal*. – 2012. – Vol. 48. – Pp. 1611–1621.
9. Berretta, S. Morphology of polymeric powders in Laser Sintering (LS): From Polyamide to new PEEK powders / S. Berretta, O. Ghita, K.E. Evans // *European Polymer Journal*. – 2014. – Vol. 59. – Pp. 218–229.
10. Ziegelmeier, S. An experimental study into the effects of bulk and flow behaviour of laser sintering polymer powders on resulting part properties / S. Ziegelmeier, P. Christou, F. Wöllecke, C. Tuck, R. Goodridge, R. Hague, E. Krampe, E. Wintermantel // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – Vol. 215. – Pp. 239–250.

[К содержанию](#)