

Разработка математической модели плавления порошка в технологии селективного лазерного сплавления

В.И. Богданович¹, М.Г. Гиорбелидзе¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Приведены результаты разработки математической модели оценки термического состояния шаровых частиц порошковой композиции, обрабатываемых на одном режиме в технологии селективного лазерного сплавления. Модель учитывает: особенности передачи энергии лазерного излучения частицам с размерами меньшими, но сравнимыми с размером диаметра пятна излучения; передачу энергии через верхнюю половину шара с зависимостью коэффициента поглощения излучения от угла его падения; плавление материала в диапазоне температур солидуса и ликвидуса; возможность испарения материала поверхности и зависимость теплофизических параметров материала от температуры. Модель адаптирована для реализации в стандартном конечно-элементном программном продукте ANSYS Mechanical, на котором проведено численное моделирование процесса на порошке из материала жаропрочного хромоникелевого сплава. Установлены закономерности процесса и показано, что величина диапазона рассеивания размеров частиц, используемой фракции порошковой композиции, определяет принципиальную возможность выбора режима лазерной обработки для обеспечения высокого качества материала после сплавления. Дана простая аналитическая оценка этого диапазона рассеивания размеров частиц.

1. Введение

В настоящее время новый технологический уклад современного производства фактически реализуется за счет применения мощного компьютерного обеспечения систем автоматизированного проектирования и применения новых технологий, к числу которых относится аддитивная технология селективного лазерного сплавления (СЛС) порошковых материалов.

Одной из основных проблем технологии СЛС является проблема обоснованного выбора режима лазерной обработки используемой порошковой композиции, решению которой посвящено значительное количество публикаций [1-17], которые можно разделить на публикации, основанные на результатах экспериментальных исследований и результатах математического моделирования процесса.

В работах по математическому моделированию можно выделить два уровня рассмотрения процесса - макромасштабный и микромасштабный. На макромасштабном уровне порошковый слой моделируется сплошным материалом с эффективными значениями физико-механических характеристик и решаются задачи прогнозирования его нагрева и плавления, тепловых и

остаточных напряжений, усадки материала и изменения размеров слоя и т.д. На микромасштабном уровне материал рассматривается в виде порошкового слоя различной толщиной и с различной укладкой частиц и решаются задачи определения термического состояния частиц, растекание материала, оценки проникновения расплава в нижние слои, возникновения и зарастивания пор в материале и т.д.

В этих работах делается вывод, что диапазон режима лазерной обработки, при котором формируются требуемый по качеству материал, очень узок и требует значительного объема численных и экспериментальных исследований.

Анализ публикаций показывает, что потенциальные характеристики материала, получаемого из порошка при его послойной обработке, определяются режимом обработки каждой отдельной частицы этого слоя. Дальнейшая обработка слоев разнонаправленной штриховкой, термической обработкой или пропиткой позволяет, если это возможно, только повысить эти характеристики и нивелировать некоторые отрицательные последствия локальной лазерной обработки слоя порошка.

Режим обработки каждой отдельной частицы должен, как минимум, обеспечить обязательное её расплавление в местах контакта с другими частицами и нижележащим слоем для обеспечения протекания топомических реакций взаимодействия материалов на этих контактирующих поверхностях. Однако, при используемых плотностях тепловых потоков и вводе излучения через верхнюю половину поверхности частицы различных размеров нагреваются до различных температур со значительным градиентом по высоте их сечения. Это может, при оптимальности нагрева частиц одного размера, приводить для частиц других размеров к нагреву ниже температуры плавления в нижней части и нагреву до температуры испарения на верхней поверхности. В частности, такой различный нагрев частиц различных размеров, обрабатываемых на одном режиме, позволяет сделать вывод о низкой информативности результатов только экспериментальных исследований и выдвинуть гипотезу о необходимости использования частиц только с определенным диапазоном рассеивания их размеров.

Следовательно, при математическом моделировании процесса оценки термического состояния частиц необходим учет плавления материала в диапазоне солидуса и ликвидуса и учет их возможного нагрева до температуры испарения поверхности. Решение таких задач с фазовыми переходами плавления в области температур солидуса и ликвидуса и испарения даже для тел простой геометрии представляют определенные сложности, которые достаточно подробно рассмотрены в обстоятельной монографии по алгоритмам для метода конечных разностей [18].

Однако, в настоящее время доступны мощные программные продукты численного конечно-элементного (например, ANSYS, NX и т.д.) решения краевых задач теплопроводности, представленных в стандартном виде с классическим дифференциальным уравнением теплопроводности. Наличие таких продуктов фактически приводит только к необходимости сведения формулируемых математических моделей процесса к этому стандартному виду для обеспечения сквозной процедуры конечно-элементного счета, с исключением необходимости предварительного определения закона движения границ фазовых переходов.

Применительно к задачам математического моделирования тепловых процессов в частицах порошковой композиции, обрабатываемой на одном режиме в технологии СЛС, такая постановка требует учета возникновения испарения на поверхности, не симметричности подвода лазерного излучения через верхнюю поверхность частицы и зависимость поглощаемого теплового потока от угла падения излучения на поверхность.

Целью данной работы является изложение результатов исследований, полученных при разработке корректной математической модели оценки термического состояния частиц порошковой композиции, обрабатываемой на одном режиме в технологии СЛС, адаптированной для использования стандартного программного продукта ANSYS Mechanical и удобной для прикладного применения по определению режима оптимальной обработки

композиции. Приведены некоторые результаты численного исследования порошковой композиции из материала жаропрочного хромоникелевого сплава ВВ751П.

2. Описание процесса СЛС

В типовом процессе СЛС порошок укладывается на поверхность платформы построения изделия либо на ранее сплавленный слой с последующим сдвигом по вертикали подвижной части платформы на величину (30...100) мкм. Порошок выравнивается по высоте и уплотняется за счет перемещения скребка, прижатого к неподвижной части поверхности платформы. Слой порошка обрабатывается энергией лазерного луча, который непрерывно перемещающегося по заданной траектории вдоль контура сечения модели детали с целью сплавления порошка на этом контуре. Затем (операция штриховки) проводится сплавление порошка внутри выделенного контура при движении луча по заданной непрерывной траектории. На завершающейся стадии слой обдувается ламинарным потоком газа для удаления не закрепленных частиц.

Например, на установке SLM 280HL немецкой компании SLM Solutions процесс проводится в среде аргона или азота при давлении немного выше атмосферного (порядка 102,525 кПа) с контролем и поддержанием в составе среды кислорода на уровне не более (0,5...0,1) %. В этой установке используется иттербиевый волоконный лазер с диодной системой накачки марки YLR-400SM компании IPG Photonics. Вид излучения инфракрасный, тип излучения одномодовый TEM₀₀ с диаметром пятна излучения в фокальной плоскости 80 мкм. Диапазон регулирования выходной мощности излучения $N_{\text{л}}$ в пределах (40...400) Вт с регулируемой скоростью перемещения по поверхности в пределах до 10 м/с.

Использованный в работе порошковый материал из жаропрочного хромоникелевого сплава ВВ751П в состоянии поставки имеет явно выраженную сферическую форму (рисунок 1) с диапазонами рассеивания частиц по величине их диаметра, представленными в таблице 1.

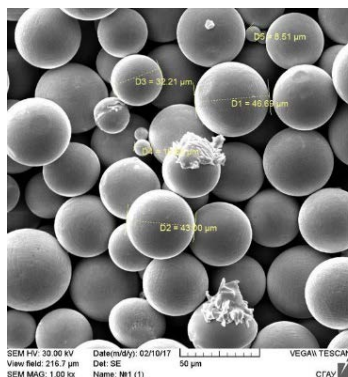


Рисунок 1. Внешний вид частиц порошка сплава ВВ751П в состоянии поставки.

Таблица 1. Удельные доли количества $\Delta n_i/n$ и массы $\Delta M_i/M$ частиц в заданных диапазонах их диаметра ΔD_i в состоянии поставки

ΔD_i мкм	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
$\Delta n_i/n$	0,02	0,05	0,04	0,13	0,17	0,22	0,17	0,07	0,08	0,05
$\Delta M_i/M$	<0,003	<0,003	0,004	0,02	0,06	0,16	0,21	0,13	0,22	0,19

Регулируемыми параметрами режима обработки является мощность потока лазерного излучения, скорость движения пятна излучения и шаг смещения траектории лазерного луча.

При регулировании сдвига по вертикали подвижной части стола построения изделия на величину 50 мкм или менее с выравниванием по высоте и уплотнением слоя за счет перемещения скребка, прижатого к неподвижной части поверхности стола, на поверхности укладывается монослой порошка сферической формы рассматриваемой грануляции. Каждая

частица располагается в минимуме своей потенциальной энергии, занимая место во впадине между частицами нижележащего слоя, с возможностью соприкосновения только с некоторым числом частиц в этом слое, но с обязательным контактом с нижерасположенной поверхностью. Следовательно, каждая шаровая частица монослоя обрабатывается индивидуально через верхнюю половину своей поверхности при движении над ней лазерного пятна излучения.

Целью математического моделирования такого процесса является установление режима обработки порошковой композиции с заданной дисперсностью рассеивания их диаметров, при котором каждая частица нагревается в своей нижней точке до температуры не менее температуры ликвидуса материала, а в своей верхней точке до температуры не более температуры его испарения.

3. Постановка математической модели процесса

Постановка математической модели процессов нагрева, плавления, последующей кристаллизации и остывания шаровой частицы из металлического сплава с диапазоном температур фазового перехода должна состоять из соответствующего дифференциального уравнения теплопроводности, начального и краевого условия. Краевое условие должно учитывать особенности передачи теплоты частице от лазерного излучения и особенности теплообмена частицы с окружающим пространством.

Можно показать, что типовое дифференциальное уравнение теплопроводности для изотропного тела с выделением или поглощением теплоты в объеме [19] можно свести к следующему виду, учитывающему процессы фазового превращения материала в диапазоне температур солидуса и ликвидуса, возможность испарения поверхности и адаптированному к сквозной конечно-элементной процедуре для использования стандартного программного продукта ANSYS Mechanical:

$$c_{эф}(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda(T)\text{grad}(T)], \quad (1)$$

$$c_{эф}(T) = c(T) + \frac{L}{T_L - T_S} \varphi\left(\frac{T - T_S}{T_L - T_S}\right) \left[\eta\left(\frac{T - T_S}{T_S}\right) - \eta\left(\frac{T - T_L}{T_L}\right) \right] + \frac{L_{uc}}{T_{uc}} \delta\left(\frac{T - T_{uc}}{T_{uc}}\right), \quad (2)$$

где $T(t, \vec{r})$ – температура в момент времени t точки объема тела с координатой \vec{r} ; $c(T), \rho(T), \lambda(T)$ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала; T_S, T_L, T_{uc} – температуры солидуса, ликвидуса и испарения материала; L, L_{uc} – удельная теплота плавления и испарения; div и grad – дифференциальные операторы дивергенции и градиента; $\eta(u)$ – единичная функция Хевисайда ($\eta(u) = 0$ при $u < 0$ и $\eta(u) = 1$ при $u \geq 0$) и $\delta(u)$ – дельта-функция Дирака с соответствующими безразмерными аргументами; $\varphi\left(\frac{T - T_S}{T_L - T_S}\right)$ – функция темпа фазового превращения (в рассматриваемом случае плавления, названная по аналогии с известной функцией, получившей название темпа кристаллизации [20]), связанная с удельной долей объема новой жидкой фазы в номинальном объеме расплавляемого материала в жидко-кристаллической области фазового перехода $\psi\left(\frac{T - T_S}{T_L - T_S}\right)$ следующим соотношением $\varphi(u) = d\psi(u)/du$.

В такой записи дифференциальное уравнение теплопроводности (1) сохраняет свой вид в различных частях тела с фазовыми и без фазовых превращений, а также для различных этапов его нагрева или охлаждения.

Начальное условие определяется равенством температуры начальной температуре материала шара в момент времени $t = 0$:

$$T(0, \vec{r}) = T_0(\vec{r}) \quad (3)$$

Краевое условие определяется тем, что на верхнюю поверхность шара падает лазерное излучение, которое преобразуется в тепловой поток, входящий по нормали к шаровой поверхности в верхней половине материала шара и действует в течение времени его прохождения над частицей, а также охлаждением всей поверхности конвекцией и тепловым излучением. В сферической системе координат, которую естественно ввести при рассмотрении распределения температур в шаровой частице, краевое условие можно представить в виде:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = q(t, \theta, \varphi) [\eta(\theta) - \eta(\theta - 0,5\pi)] - \alpha(T - T_c) - \varepsilon\sigma [T^4 - (T_c)^4] \text{ при } r = R, \quad (4)$$

где R – радиус шаровой частицы; α – коэффициент конвективного теплообмена; ε – интегральный коэффициент излучения поверхности шара; σ – постоянная Стефана-Больцмана; T_c – температура газа в камере; θ и φ – зенитный и азимутальный углы сферической системы координат, связанной с центром шара; в квадратных скобках приведена разность единичных функций Хевисайда, учитывающая, что тепловой поток на поверхность шара отличен от нуля только в области зенитного угла $0 \leq \theta \leq 0,5\pi$.

Величина теплового потока $q(t, \theta, \varphi)$ должна, в общем случае, зависеть от времени t , зенитного θ и азимутального угла φ сферической системы координат, так как лазерный источник перемещается над шаром с постоянной скоростью v . Кроме того, плотность теплового потока также должна зависеть от зенитного θ из-за зависимости коэффициента поглощения материалом лазерного излучения от угла падения. Поэтому температура внутри сферически симметричного шара будет зависеть от положения лазерного пятна над ней и не будет обладать симметрией относительно зенитного и азимутального угла.

В такой постановке краевая задача (1-4), при задании вида $q(t, \theta, \varphi)$, разрешима численным моделированием с использованием стандартного программного продукта ANSYS Mechanical. Результаты численного моделирования показали, что ее расчет очень объемен по машинному времени, а получаемый результат сложен для анализа и недостаточно информативен для разработки технологических рекомендаций по выбору оптимальных режимов обработки композиции порошка с диапазоном рассеивания их размеров. Основная проблема этих недостатков связана с зависимостью $q(t, \theta, \varphi)$ от времени и азимутального угла.

В связи с этим возникает необходимость разработать модельное представление о передаче энергии лазерного излучения верхней половине шара, которое с точностью необходимой для технологических задач позволит упростить вид функции плотности теплового потока.

4. Заключение

На основании выявленных закономерностей передачи энергии лазерного излучения шарообразному порошковому материалу с диаметрами частиц меньшими, но соизмеримыми с диаметром лазерного пятна нагрева и сформулированных допущений, разработана корректная математическая модель, позволяющая несимметричный нагрев и плавление частиц рассматривать в симметричной постановке. Модель адаптирована для реализации в стандартном конечно-элементном программном продукте ANSYS Mechanical. Такая постановка многократно снижает объем численного моделирования, существенно снижает сложность анализа результатов по разработке режимов обработки композиции порошков на одном режиме. Установлены закономерности процесса и показано, что величина диапазона рассеивания размеров частиц, используемой фракции порошковой композиции, определяет принципиальную возможность выбора режима лазерной обработки для обеспечения высокого качества материала после сплавления. Дана простая аналитическая оценка этого диапазона рассеивания размеров частиц. Прикладное применение полученных соотношений рассмотрено на примере материала BV751П.

5. Литература

- [1] Колдоба, А.В. Математическое моделирование лазерного спекания двухкомпонентных порошковых смесей / А.В. Колдоба, Ю.А. Повещенко, М.В. Попов // Электронный журнал Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2009. – № 38. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2009-38> (дата обращения 05.05.2017).
- [2] Khairallah, S.A. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder / S.A. Khairallah, A. Anderson // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Vol. 214(11). – P. 2627-2636..
- [3] Gusarov, A.V. Modeling the interaction of laser radiation with powder bed at selective laser melting / A.V. Gusarov, I. Smurov // *Physics Procedia*. – 2010. – Vol. 5. – P. 381-394.
- [4] Foroozmehr, A. Finite Element Simulation of Selective Laser Melting process considering Optical Penetration Depth of laser in powder bed / A. Foroozmehr, M. Badrossamay, E. Foroozmehr, S. Golabi // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 89. – P. 255-263.
- [5] Bogdanovich, V.I. Enhancing thermal barrier coatings performance through reinforcement of ceramic topcoat / V.I. Bogdanovich, M.G. Giorbelidze // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 156. – P. 1-7.
- [6] Huang, Y. Finite element analysis of thermal behavior of metal powder during / Y. Huang, L.J. Yang, X.Z. Du, Y.P. Yang // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. – Vol. 104. – P. 146-157.
- [7] Leitz, K.-H. Multi-physical simulation of selective laser melting / K.-H. Leitz, P. Singer, A. Plankensteiner, B. Tabernig, H. Kestler, L.S. Sigl // *Metal Powder Report*, 2016.
- [8] Francois, M.M. Modeling of additive manufacturing processes for metals: Challenges and opportunities / M.M. Francois, A. Sun, W.E. King, N.J. Henson, D. Tournet, C.A. Bronkhorst, N.N. Carlson, C.K. Newman, T. Haut, J. Bakosi, J.W. Gibbs, V. Livescu, S.A. Vander Wiel, A.J. Clarke, M.W. Schraad, T. Blacker, H. Lim, T. Rodgers, S. Owen, F. Abdeljawad, J. Madison, A.T. Anderson, J-L. Fattebert, R.M. Ferencz, N.E. Hodge, S.A. Khairallah, O. Walton // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2017. – Vol. 21(4). – P. 198-206.
- [9] Кривелев, М.Д. Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей / М.Д. Кривелев, Е.В. Харанжевский, Г.А. Гордеев, В.Е. Анкудинов. – М.: ИПУ РАН, 2010. – С. 299-322.
- [10] Шишковский, И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения / Шишковский И.В. – СПб.: Изд-во Питер, 2015. – 348 с.
- [11] Arisoy, Y.M. Influence of scan strategy and process parameters on microstructure and its optimization in additively manufactured nickel alloy 625 via laser powder bed fusion / Y.M. Arisoy, L.E. Criales, T. Özel, B. Lane, S. Moylan, A. Donmez // *Int. J. Adv. Manuf. Technology*. – 2017. – Vol. 90. – P. 1393-1417.
- [12] Boley, C.D. Calculation of laser absorption by metal powders in additive manufacturing / C.D. Boley, S.A. Khairallah, A.M. Rubenchik // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54. – P. 2477-2482.
- [13] Grasso, M. Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review / M. Grasso, B.M. Colosimo // *Measurement Science and Technology*. – 2017. – Vol. 28. – P. 1-25.
- [14] Huang, Q. Microstructure and inclusion of Ti–6Al–4V fabricated by selective laser melting / Q. Huang, N. Hu, X. Yang, R. Zhang, Q. Feng // *Frontiers Mater. Sci*. – 2016. – Vol. 10(4). – P. 428-431.
- [15] Knol, M.F. Thermal modelling of selective laser melting / M.F. Knol. – Phd Thesis. Delft University of Technology, 2016. – 79 p.
- [16] Popovich, V.A. Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties / V.A. Popovich, E.V. Borisov, A.A. Popovich, V.Sh. Sufiiarov, D.V. Masaylo, L. Alzina // *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 114. – P. 441-449.

- [17] Zeng, K. Optimization of support structures for selective laser melting / K. Zeng. – Phd dissertation. Louisville, 2015. – 201 p.
- [18] Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабишевич. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
- [19] Каргашев, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Каргашев // Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2001. – 550 с.
- [20] Бочвар, А.А. Металловедение / А.А. Бочвар. – М.: Metallurgizdat, 1956. – 450 с.
- [21] Ковалев, О.Б. Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов / О.Б. Ковалев, В.М. Фомин. – М.: Физматлит, 2013. – 256 с.

Development of the powder melting mathematical model in the technology of selective laser melting

V.I. Bogdanovich¹, M.G. Giorbelidze¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. In this paper, the results of developing a mathematical model for the process of estimating the thermal state of spherical particles of a powder composition processed in a single mode in selective laser fusion technology are given. The model takes into account: the features of transferring the energy of laser radiation to particles with their dimensions smaller than the radiation spot comparable with the diameter of the diameter; transfer of energy through the upper half of the sphere with the dependence of the absorption coefficient of radiation on the angle of its fall; melting of material in the range of solidus and liquidus temperatures; the possibility of evaporation of the surface material; the dependence of the thermophysical parameters of the material on temperature. The model is adapted to the form applicable for implementation in the standard finite-element software product ANSYS Transient Thermal, on which numerical simulation of the process is performed. It has been found that the size of the particle size range used by the powder composition fraction determines the choice and designation of the laser treatment mode to ensure a high quality of the material after melting.

Keywords: additive Manufacturing, selective laser melting, mathematical model, the thermal state of the powder particles, numerical modeling, melting, evaporation, powder fraction range, laser processing mode.