

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРОШКОВОЙ СРЕДЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

М.Х.А. Аль-Сандокачи

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Скорость и стоимость внедрения в производство новой техники напрямую зависят от эффективности работы каждой технологической цепочки на всех этапах от конструирования и проектирования изделия до создания его первоначального макета в натуральную величину. Резко ускорить прохождение этих этапов помогают высокотехнологичные методы 3-мерного компьютерного моделирования и создания твердых копий деталей машин.

В настоящее время во всем мире проводятся интенсивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы не только по созданию новых, но и по совершенствованию развитых ранее технологических методик и систем послойного лазерного синтеза объемных изделий (ЛСОИ) деталей машин. Методы селективного лазерного спекания (СЛС), плавления (СЛП) и трехмерной лазерной наплавки (DMD) являются одним из наиболее перспективных способов реализации технологии быстрого прототипирования. Поэтому изучение данной темы на данный момент является актуальным. В настоящее время в ряде отраслей промышленности имеются большие тепловые потоки от одной поверхности к другой, вследствие чего даже незначительные контактные сопротивления вызывают местные перегревы, что часто крайне нежелательно. В работе была изучена эффективная теплопроводность зернистых систем, которая рассматривалась как функция пористости, теплопроводности газа, заполняющего поры материала, теплопроводности газового микрозазора, теплопроводности самих частиц и контактной теплопроводности на стыке частиц.

Для теоретических исследований процессов селективного лазерного спекания необходимым является разработка методов описания эффективных коэффициентов теплопроводности (ЭКТ) порошковой среды, которые учитывают, что при нагреве может происходить частичное или полное плавление материала сфер, приводящее к изменению структуры среды. Отсюда следует важное требование к моделям ЭКТ: структурная модель в пределе полного плавления материала твердых частиц должна давать значение эффективной теплопроводности, которое сшивается с эффективной теплопроводностью, даваемой бесструктурной моделью. Для случая полного плавления частиц предлагается метод расчета эффективной теплопроводности расплава с газовыми включениями, который описан в работе.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, порошок, теплопроводность.

Метод селективного лазерного спекания/плавления (СЛС/П)

Порошковый материал послойно спекается лазерным излучением (ЛИ). Для этой методики нужны мелкодисперсные термопластичные порошки с хорошей вязкостью и быстро затвердевающие, например, полимеры, воск, нейлон, керамика или металлические порошки с добавкой легкоплавкого связующего. Методика предложена впервые Карлом Декартом (Carl Deckard) в 1989 году. Способы спекания/сплавления частиц порошка при СЛС/П. Спекание частиц порошка может осуществляться различными способами: жидкофазное спекание, совмещение процесса СЛС и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, совмещение процесса СЛС с процессами горячего изостатического прессования, совмещение СЛС с химическими реакциями с участием газовых добавок, совмещение СЛС с процессом гелевого литья, совмещение СЛС с послойным нанесением покрытий [2].

Наиболее значимыми параметрами, определяющими качество спекаемых слоев, являются характеристики исходных материалов и параметры спекания. К характеристикам исходных материалов относятся размер и форма частиц, насыпная плотность и величина удельной поверхности порошка. Параметрами спекания являются мощность лазера, скорость сканирования, интенсив-

ность лазерного излучения, частота импульсов, защитная атмосфера, время выдержки. Качество спекаемых слоев характеризуется максимально достижимой точностью, равномерной плотностью, максимальной и минимальной толщиной обрабатываемого слоя [3].

Свойства порошковой среды

При изучении механизма и кинетики процессов, происходящих в спекающемся пористом теле, необходимо иметь в виду особенности фазового равновесия, обусловленные дисперсностью фаз. Это связано с тем, что и порошинки, из которых спрессовано пористое тело («фаза вещества»), и поры («фаза пустоты»), как правило, имеют такие линейные размеры, когда эффекты, обусловленные искривленностью границы между со существенными фазами, могут оказаться значительными [4].

Исследования показывают, что выбор оптимальных режимов для технологии СЛП требует знания теплофизических характеристик используемых порошковых материалов.

Моделированию распределения тепла по системе поры-частицы в зависимости от степени укладки и формы частиц, в том числе и для целей расчета температур в зоне спекания при СЛП, посвящено несколько работ [1, 5]. При этом прямой теоретический расчет теплофизических характеристик материала при СЛП наталкивает на значительные трудности. По этой причине была разработана методика, согласно которой проводились исследования тепловых полей при лазерном воздействии (ЛВ) по глубине используемых порошковых композиций [6].

Экспериментальное изучение переноса тепла в пористых средах

Процесс теплопроводности – один из так называемых процессов теплопереноса, играющих огромную роль в природе и в технике. В работе [1] был проведен ряд экспериментов для изучения теплопроводности порошковой среды, исследования проводились на установке показанной на рис. 1. Лазерный луч 2 от технологической лазерной установки 1 (Квант-60, $\lambda = 1,06$ мкм) с помощью отклоняющих дефлекторов 3 направлялся через штатную фокусирующую линзу 4 в зону обработки на разровненную поверхность свободно насыпанной в большом объеме порошковой композиции 5, которая находилась на массивном металлическом основании 6 для осуществления эффективного теплоотвода из порошковой среды. Температура измерялась с помощью термопары 7, которая могла свободно перемещаться внутри порошковой среды вверх и вниз по оси Z посредством микрометрической подвижки 8.

Лазерная установка работала в непрерывном режиме. Проводились измерения температуры на глубине H при различной мощности ЛВ. Были построены графики зависимости $T(H)$, для алюминиевого порошка график имеет вид рис. 2. Анализ экспериментальных результатов показывает существование в поверхностных слоях порошковых материалов значительных температур, во многих случаях сравнимых с температурой литого материала, для алюминия $T_{\text{пл}} = 660$ °С.

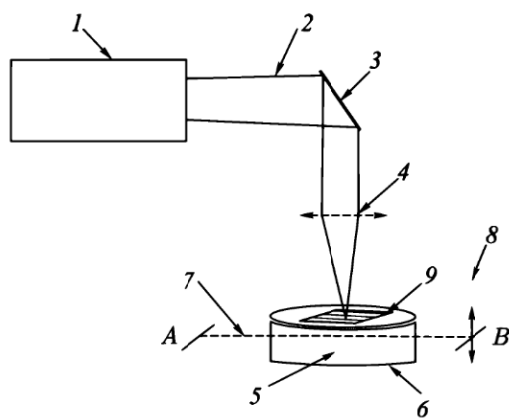


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

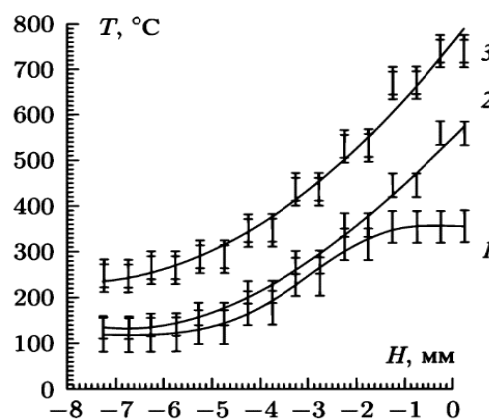


Рис. 2. Экспериментальное распределение температур T по глубине H от поверхности свободно насыпанного алюминиевого порошка: $P = 0,7$ Вт (1); $P = 1,6$ Вт (2); $P = 2,6$ Вт (3)

Была сформулирована и решена задача для расчета коэффициента теплопроводности в порошковой среде, что привело к оптимизации режимов СЛП. Зная мощность теплового источника и значения температур на разных глубинах, можно оценить некоторые теплофизические характеристики обрабатываемой лазерным излучением (ЛИ) порошковой среды [1].

Основные уравнения

Сложность постановки краевой задачи для лазерной обработки порошковых материалов связана в основном с необходимостью моделирования процесса поглощения ЛИ сильно неоднородной порошковой средой. Для квазистационарного случая (эксперимента, описанного ранее) нагрева порошковой среды неподвижным источником ЛВ в первом приближении постановка задачи может быть записана в таком виде [6]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\alpha A I \theta}{\lambda} \exp\left(-\frac{r^2}{r_n^2} - \alpha z\right) = 0, \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = A I (1 - \theta) \exp\left(-\frac{r^2}{r_n^2}\right), T(r, z \rightarrow \infty) = 0, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; I , r_n – плотность мощности и радиус пятна ЛВ; A , α , θ – коэффициенты поверхностного, объемного поглощения и пористость среды.

Параметр θ отвечает за структуру тела, $\theta = 0$ для твердого тела и $\theta = 1$ для полностью пористого тела. Порошковые смеси характеризуются $0 < \theta < 1$.

С помощью интегрального преобразования Ханкеля найдено точное решение данной краевой задачи:

$$T(r, z) = \frac{\alpha A I \theta r_n^2}{2\lambda} \int_0^\infty J_0(\delta r) d\delta \exp\left(-\frac{\delta^2 r_n^2}{4}\right) \left[\frac{\delta \exp(-\alpha z) - \alpha \exp(-\delta z)}{\delta^2 - \alpha^2} - \frac{\theta - 1}{\theta} \exp(-\delta z) \right], \quad (3)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

Температура в центре пятна ЛВ определяется по формуле:

$$T(r, z = 0) = \frac{\alpha A I \theta r_n^2}{2\lambda} \int_0^\infty d\delta \exp\left(-\frac{\delta^2 r_n^2}{4}\right) \left[\frac{\theta}{\delta + \alpha} - \frac{\theta - 1}{\alpha} \right]. \quad (4)$$

В работе [1] сделан вывод, что функция T обратно пропорциональна теплопроводности среды λ и стремится к своему асимптотическому значению при возрастании объемного поглощения α , при этом T практически не зависит от θ . В качестве примера в логарифмическом масштабе представлена проекция 3-мерного графика зависимости функции температуры от коэффициентов теплопроводности λ и объемного поглощения α на плоскость для случая нагрева неподвижным

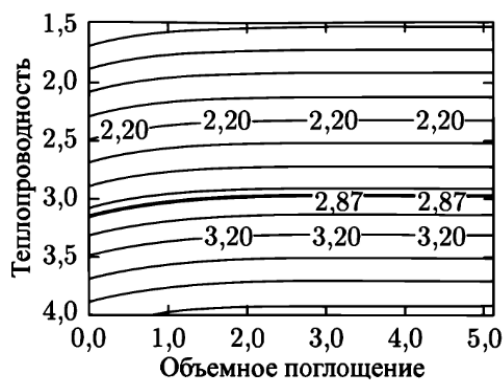


Рис. 3. Проекция на плоскость в логарифмических координатах 3-мерного графика расчетной зависимости температуры от α и λ

лазерным пучком порошка Al, для $P = 2,6$ Вт, $T = 740$ °С (рис. 3).

Изотерма $\lg(T(r, z = 0) = 740$ °С) $\approx 2,87$ (жирная линия) в плоскости координат $Y - \lg(\lambda)$ и $X - \lg(\alpha)$. При $\alpha > 10^2 - 10^3$ см⁻¹ для Al функция $T(\lg(\lambda), \lg(\alpha))$ стремится к своему асимптотическому пределу, соответствующему максимальной температуре на поверхности порошка, при этом значение коэффициента теплопроводности практически перестает изменяться. Данная методика расчета позволяет оценить значение коэффициента теплопроводности в порошках при скоростном ЛВ. Полученные значения коэффициента теплопроводности порошков значительно отличаются от теплопроводности материалов, из которых они сделаны. В работах [7, 8]

приведены результаты экспериментальных измерений коэффициента теплопроводности, теплоемкости и глубины спекания чистых порошковых металлов и полимеров. Оказывается, у металлических порошков значение теплопроводности на несколько порядков меньше соответствующих значений монолитных материалов, а для полимеров значение отличается лишь в несколько раз.

Для оценки значения коэффициента теплопроводности металлополимерных композиций (МПК) используют соотношения [9]:

$$\lambda_{\text{см}} = \frac{V_1\lambda_1 + V_2\lambda_2}{V_1 + V_2}; \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{мпк}} = \theta\lambda_a + \lambda_{\text{см}}(1 - \theta), \quad (6)$$

где V_1 , λ_1 , и V_2 , λ_2 – объемные доли компонентов МПК и их теплопроводности; λ_a – теплопроводность воздуха; $\lambda_{\text{мпк}}$ – теплопроводность металлополимерной композиции.

С учетом слабой тепловой проводимости воздуха в порошковых смесях [10] считается, что теплопроводность порошка λ_p равняется

$$\lambda_p = \frac{(1-\theta)\lambda_s}{1 + \phi\lambda_s/\lambda_a}, \quad (7)$$

где λ_s – теплопроводность твердого тела, из которого сделан порошок; ϕ – некоторый эмпирический множитель.

Во всех тепловых модельных постановках по СЛП порошковых композиций у зарубежных исследователей [11–13] используется соотношение (7) или его модификации не только для определения теплопроводности, но и плотности, теплоемкости, температуропроводности.

Теплопроводность порошковых материалов

В настоящее время в ряде отраслей промышленности имеются большие тепловые потоки от одной поверхности к другой, вследствие чего даже незначительные контактные сопротивления вызывают местные перегревы, что часто крайне нежелательно. В работе [14] была изучена эффективная теплопроводность зернистых систем, которая рассматривалась как функция пористости, теплопроводности газа, заполняющего поры материала, теплопроводности газового микрозазора, теплопроводности самих частиц и контактной теплопроводности на стыке частиц.

Для теоретических исследований процессов селективного лазерного спекания необходимой является разработка методов описания эффективных коэффициентов теплопроводности (ЭКТ) порошковой среды, которые учитывают, что при нагреве может происходить частичное или полное плавление материала сфер, приводящее к изменению структуры среды. Отсюда следует важное требование к моделям ЭКТ: структурная модель в пределе полного плавления материала твердых частиц должна давать значение эффективной теплопроводности, которое сшивается с эффективной теплопроводностью, даваемой бесструктурной моделью. Для случая полного плавления частиц предлагается метод расчета эффективной теплопроводности расплава с газовыми включениями, который описан в работе [15].

Результаты экспериментальных исследований теплопроводящих свойств порошковых сред в газовой атмосфере представлены зависимостями ЭКТ от давления и температуры среды, размеров частиц и их объемной доли [16–18]. Эксперименты свидетельствуют, что ЭКТ увеличивается с увеличением давления газа и стремится при высоких давлениях к насыщению.

Реализация модели

Современные вычислительные технологии и пакеты программ позволяют рассматривать достаточно подробные модели, в том числе – состоящие из большого числа взаимодействующих частиц. Но создание модели процесса селективного лазерного плавления наталкивается не только на вычислительные трудности, но и на необходимость описывать сложное поведение среды, включая теплопередачу от луча к частицам порошка, теплопередачу между частицами через области контакта и газовые зазоры малой толщины, фазовые превращения материала и т. д.

В качестве первого этапа создания модели, описывающей материал как набор отдельных взаимодействующих частиц, предлагается использование существующих пакетов, реализующих метод конечных элементов. При этом часть физических особенностей задачи не может быть напрямую смоделирована и должна быть заменена подбором «эффективных» значений параметров, обеспечивающих получение корректных результатов. Рассмотрим такой процесс на примере подбора параметров теплопроводности.

Для проверки возможности подбора параметров, описывающих теплопроводность в дискретной (состоящей из отдельных частиц) модели, было выполнено сопоставление численного решения двух задач: 1) о нагреве объема однородного материала с параметрами, определенными для порошка (рис. 4); 2) о нагреве набора шарообразных частиц, контактирующих между собой (шарообразная форма характерна для частиц, получаемых распылением расплавов) (рис. 5). Расчеты выполнялись численно с использованием пакета ANSYS (ANSYS/LS-DYNA).

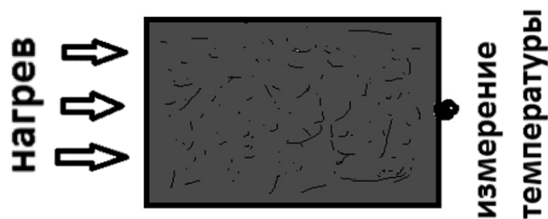


Рис. 4. Расчетная модель однородного материала

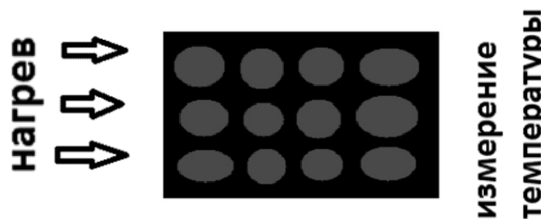


Рис. 5. Расчетная модель шарообразных частиц (порошковая среда)

Нагрев производился с одной стороны по всему объему, а зависимость температуры от времени регистрировалась на противоположной стороне. Примеры зависимостей показаны на рис. 6. Из графика следует, что расплавление хромового порошка происходит при температуре 300 °С в течение 0,5 минут, в качестве параметров теплового контакта использовался контакт типа *CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE_THERMAL. Описание теплового контакта осуществляется при помощи ряда параметров:

- K – теплопроводность через среду, заполняющую пространство между контактными поверхностями. Теплопередача описывается уравнением $h_{cond} = \frac{K}{l_{gap}}$;

- FRAD – теплопередача за счет излучения, описывается формулой:

$$f_{rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1},$$

где σ – постоянная Больцмана; ϵ_1 и ϵ_2 – степень черноты взаимодействующих тел.

Теплопередача описывается уравнением $h_{rad} = f_{rad}(T_m + T_s)(T_m^2 + T_s^2)$;

- H_0 – теплопередача между касающимися телами;

- LMIN – величина минимального зазора, для которого теплопроводность считается как для касающихся тел;

- LMAX – расстояние между поверхностями, при превышении которого тепловой контакт не рассчитывается.

Тепловой контакт во 2-й задаче описывался следующим набором параметров: K , $Frad$, H_0 , L_{min} , L_{max} (теплопроводность контакта равна H_0 при зазоре $L < L_{min}$, $K/L + Hrad$ при $L_{min} < L < L_{max}$).

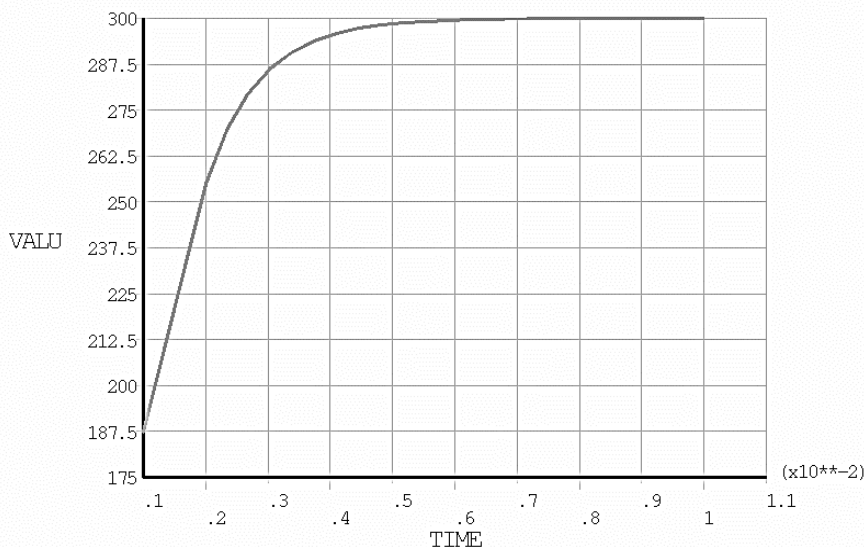


Рис. 6. Результаты (график зависимости температуры от времени)

Таким образом, изменяя глубину пористого слоя (параметр L_{min}), в описании контакта можно добиваться различных значений теплопередачи.

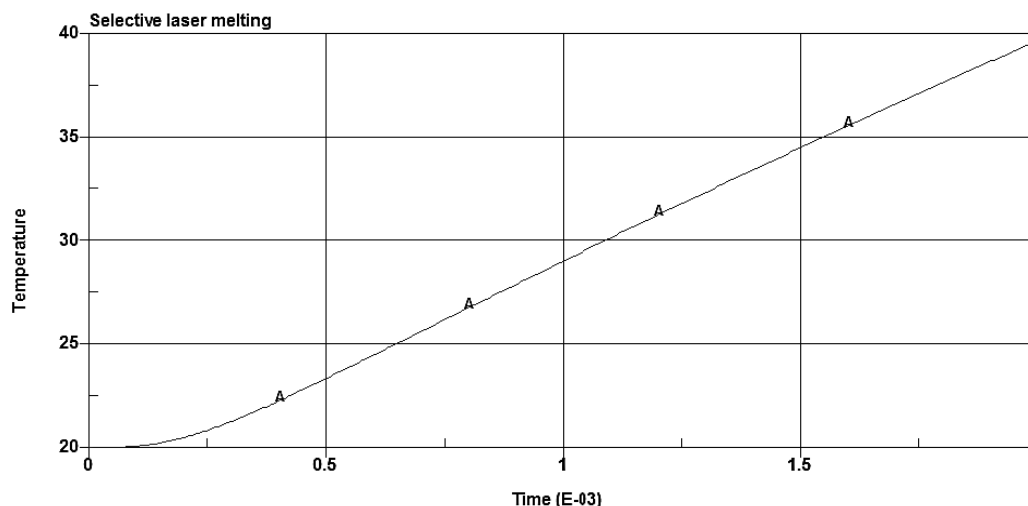


Рис. 7. Зависимость температуры в узле от времени при $L_{\min} = 40$ мкм

Новое поколение СЛП

Инновационные технологии стали еще одним шагом на пути к энергоэффективному производству, примером является промышленная система селективного лазерного плавления SLM 500 HL с уникальной технологией мультилазерного луча. Система SLM 500HL может быть оснащена двумя лазерами мощностью 400 или 1000 Вт каждый или до четырех лазеров по 400 Вт. Область построения моделей – $500 \times 280 \times 325$ см³, минимальная толщина наносимого слоя – 20 мкм.

Работа обоих лазерных лучей (400 + 1000 Вт) происходит на порошковом слое с применением блока для 3D сканирования. В SLM 500HL включен процесс для отображения оболочкового стержня с двумя различными лазерными лучами. Работа лазерных лучей может осуществляться одновременно и параллельно, либо независимо, что позволяет улучшить производительность. Транспортировка металлического порошка производится с использованием конвейерной системы подачи в связи с увеличением веса и объема. Автоматизированное распределение порошка позволяет сократить время работы и освобождает от загрузки вручную из различных емкостей [19].

Заключение

Теоретическое и экспериментальное изучение процесса теплопроводности порошковой среды применительно к методу селективного лазерного плавления является важной задачей.

Рассмотрены основные факторы, определяющие качество спекаемых слоев при СЛП. Выявлено, что знание о распределении температур по глубине позволяет оценить значение коэффициентов теплопроводности в этих порошковых следах; значение теплопроводности на несколько порядков у металлических порошков меньше соответствующих значений монолитных материалов, для полимеров значение отличается лишь в несколько раз. Изучен экспериментальный метод по исследованию переноса тепла в пористых средах. Составлены модели, и проведены расчеты с помощью пакета ANSYS (ANSYS/LS-DYNA).

Литература

1. Шишковский, И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий / И.В. Шишковский. – М.: Физматлит, 2009. – 424 с.
2. Назаров, А.П. Перспективы быстрого прототипирования методом селективного лазерного плавления/спекания / А.П. Назаров // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – № 4(16). – С. 46–51.
3. Исследование режимов селективного лазерного плавления металлических порошков / П.Н. Килина, Е.А. Морозов, А.М. Ханов, Л.Д. Сиротенко // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 133.
4. Гегузин, Я.Е. Физика спекания / Я.Е. Гегузин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. 1984. – 312 с.
5. Gusarov, A.V. Gas-dynamic boundary conditions of evaporation and condensation: numerical analysis of the Knudsen layer / A.V. Gusarov, I. Smurov // Phys. Fluids. – 2002. – Vol. 14. – P. 4242–4255.

6. Шишковский, И.В. Тепловые поля в металл-полимерных порошковых композициях при лазерном воздействии / И.В. Шишковский, Н.Л. Куприянов // *Теплофизика высоких температур*. – 1997. – Т. 35, № 5. – С. 722–726.
7. Nelson, J.S. Model of Selective Laser Sintering of Bisphenol-A Polycarbonate / J.S. Nelson, S. Xue, J.W. Barlow // *Ind. Chem. Eng. Res.* – 1993. – Vol. 32. – P. 2305–2317.
8. Ho, H.C.H. Effects of energy density on morphology and properties of selective laser sintered drug delivery devices / H.C.H. Ho, I. Gibson, W.L. Cheung // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1999. – Vol. 89–90. – P. 204–210.
9. Левданский, В.В. Нагрев излучением модельного пористого тела / В.В. Левданский // *Воздействие концентрированных потоков энергии на вещество: сб. статей / под ред. Н.Н. Рыкалина*. – М.: Наука, 1985. – С. 99–107.
10. Yagi, S. Studies on effective thermal conductivities in packed beds / S. Yagi, D. Kunii // *J. AIChE*. – 1957. – Vol. 3, № 3. – P. 373–381.
11. Kandis, M. Observation and Modeling of Part Growth and Shape Evolution of Polymer Parts Produced by Non-Isothermal and Laser-Induced Sintering of Powders: PhD thesis / M. Kandis. – University of Texas at Austin, 1999. – 188 p.
12. Zhang, Y. Thermal Modeling of Advanced Manufacturing technologies: Grinding, Laser Drilling, and Solid Free Form Fabrication: PhD thesis / Y. Zhang. – University of Connecticut, 1998. – 277 p.
13. Рагуля, А.В. Селективное лазерное спекание. I Континуальная модель / А.В. Рагуля // *Порошковая металлургия*. – 1998. – № 7–8. – С. 16–26.
14. Муштаев, В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
15. Волченко, Т.С. Расчет эффективной теплопроводности порошковых материалов из сферических частиц в газовой атмосфере / Т.С. Волченко, А.П. Яловец // *Журнал техн. физики*. – 2016. – № 3 (8).
16. Deissler, R.G. An investigation of the effective thermal conductivities of powders in various gases / R.G. Deissler, J.S. Boegli // *Trans ASME*. – 1958. – Vol. 80. – P. 1417–1425.
17. Swift, D.L. The thermal conductivity of spherical metal powders including the effect of an oxide coating / D.L. Swift // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1966. – Vol. 9. – P. 1061–1074.
18. Thermal conductivity of porous systems / A.V. Luikov, A.G. Shashkov, L.L. Vasiliev, Yu.E. Fraiman // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1968. – Vol. 11. – P. 117–140.
19. SLM 500HL. – <http://www.neokon.lt/>.

Аль-Сандокачи Мохаммад Худайр Аббас, аспирант, инженер-механик, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, mohammadkhudhair60@gmail.com.

Поступила в редакцию 27 декабря 2016 г.

DOI: 10.14529/engin170107

MODELLING OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF THE MEDIUM POWDER APPLIED TO THE PROBLEM OF SELECTIVE LASER MELTING

M.Kh.A. Al-Sandoqachi, mohammadkhudhair60@gmail.com
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The speed and the cost of implementation of new techniques are directly dependent on the efficiency of each of the technological chain at all stages, from design and product design to create of its original mockup in full value. Dramatically accelerate the passage of these steps help to high-tech methods of 3-D computer modeling and the creation of hard copies of machine parts.

Currently all over the world carry out intensive scientific research and experimental structure work not only on the creation of new, but also on the improvement technology previously developed of methods and layered systems of laser synthesis of volume products (LSOI) machine parts. Methods of selective laser sintering (SLS), melting (SLM) and a three-dimensional laser melting (the DMD) is one of the most promising ways to implement rapid prototyping technology [1]. There fore, the study of this topic at this point is urgent. Currently in many industries, are large heat flows from one surface to another, whereby even slight contact resistance causes local overheating, which is often highly undesirable. In this work was to study the effectiveness the thermal conductivity of granular systems, which was seen as a function of porosity, thermal conductivity, filling the pores of the material, the thermal conductivity of the gas microgap, the thermal conductivity of the particles themselves and contact the thermal conductivity at the junction of the particles. For theoretical studies of selective laser sintering it is necessary to develop methods to describe the effective thermal conductivity (EKT) powder medium, which take into account, that heating the partial or complete melting of the material areas may occur, resulting in a change in the structure of the medium. This implies an important requirement for EKT model: structural model in the limit of the total melting particulate material should give a value of the effective thermal conductivity, which is cross-linked with an effective thermal conductivity given by non-structured model. For the case of complete melting particles melt method is proposed for calculating the effective thermal conductivity gas as described in work.

Keywords: selective laser melting, powder, thermal conductivity.

References

1. Shishkovskii I.V. *Lazernyi sintez funktsional'no-gradientnykh mezostruktur i ob'emnykh izdelii* [Laser Synthesis of Functionally Graded Mesostructure and Bulk Products]. Moscow, Fizmatlit, 2009. 424 p.
2. Nazarov, A.P. [Prospects for Rapid Prototyping by Selective Laser Melting / Sintering]. *Vestnik MGTU "Stankin"*, 2011, no. 4 (16), pp. 46–51. (in Russ.)
3. Kilina P.N., Morozov E.A., Khanov A.M., Sirotenko L.D. [Research Mode Selective Laser Melting of Metal Powders]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 6, p. 133.
4. Geguzin Ya.E. *Fizika spevaniya* [Sintering Physics]. Moscow, Science, 1984. 312 p.
5. Gusarov A.V. Gas-Dynamic Boundary Conditions of Evaporation and Condensation: Numerical Analysis of the Knudsen Layer. *Phys. Fluids*, 2002, vol. 14, pp. 4242–4255.
6. Shishkovskii I.V., Kupriyanov N.L. [Thermal Field In The Metal-Polymer Powder Compositions Under Laser Irradiation]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1997, T. 35, no. 5, pp. 722–726. (in Russ.)
7. Nelson J.S., Xue S., Barlow J.W. Model of Selective Laser Sintering of Bisphenol-A Polycarbonate. *Ind. Chem. Eng. Res.*, 1993, vol. 32, pp. 2305–2317.
8. Ho H.C.H., Gibson I., Cheung W.L. Effects of Energy Density on Morphology and Properties of Selective Laser Sintered Drug Delivery Devices. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, vol. 89–90, pp. 204–210.
9. Levanskii V.V. [Heating Model Porous Body Radiation]. *Vozdeistvie kontsentririrovannykh potokov energii na veshchestvo*. Moscow, Science, 1985, pp. 99–107. (in Russ.)
10. Yagi S., Kunii D. Studies on Effective Thermal Conductivities in Packed Beds. *Journal AIChE*, 1957, vol. 3, no. 3, pp. 373–381.
11. Kandis M. Observation and Modeling of Part Growth and Shape Evolution of Polymer Parts Produced by Non-Isothermal and Laser-Induced Sintering of Powders: PhD thesis. The University of Texas at Austin, 1999. 188 p.
12. Zhang Y. Thermal Modeling of Advanced Manufacturing technologies: Grinding, Laser Drilling, and Solid Free Form Fabrication: PhD thesis. The University of Connecticut, 1998. 277 p.
13. Ragulya A.V. [Selective Laser Sintering. I Continuum Model]. *Poroshkovaya metallurgiya*, 1998, no. 7-8, pp. 16–26. (in Russ.)
14. Mushtaev V.I. Ul'yanov V.M. *Sushka dispersnykh materialov* [Drying of Disperse Materials] Moscow, 1988. 352 p.
15. Volchenko T.S. Yalovets A.P. [Calculation of the Effective Thermal Conductivity of the Material Powder of Spherical Particles in a Gas Atmosphere]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2016, no. 3 (8). (in Russ.)

-
16. Deissler, R.G., Boegli J.S. An Investigation of the Effective Thermal Conductivities of Powders in Various Gases. *Trans ASME*, 1958, vol. 80, pp. 1417–1425.
 17. Swift, D.L. The Thermal Conductivity of Spherical Metal Powders Including the Effect of an Oxide Coating. *Int. J. Heat Mass Transfer.*, 1966, vol. 9, pp. 1061–1074.
 18. Luikov A.V., Shashkov A.G., Vasiliev L.L., Fraiman Yu.E. Thermal Conductivity of Porous Systems. *Int. J. Heat Mass Transfer.*, 1968, vol. 11, pp. 117–140.
 19. SLM 500HL. Available at: <http://www.neokon.lt/>.

Received 27 December 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Аль-Сандокачи, М.Х.А. Моделирование теплопроводности порошковой среды применительно к задаче селективного лазерного плавления / М.Х.А. Аль-Сандокачи // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 55–63. DOI: 10.14529/engin170107

FOR CITATION

Al-Sandoqachi M.Kh.A. Modelling of the Thermal Conductivity of the Medium Powder Applied to the Problem of Selective Laser Melting. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 55–63. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin170107