

УДК 621.91

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ ПОРОШКА В ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

© 2017 В.И. Богданович, М.Г. Гиорбелидзе, А.В. Сотов, Н.Д. Проничев, В.Г. Смелов, А.В. Агаповичев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 31.08.2017

В статье приведены результаты разработки математической модели процесса оценки термического состояния шаровых частиц порошковой композиции обрабатываемых на одном режиме в технологии селективного лазерного сплавления. Модель учитывает: особенности передачи энергии лазерного излучения частицам при их размерах меньших, но сравнимых 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; зависимость теплофизических параметров материала от температуры. Модель адаптирована к виду применимому для реализации в стандартном конечно-элементном программном продукте ANSYS Transient Thermal, на котором проведено численное моделирование процесса. Установлено, что величина диапазона размеров частиц, используемой фракции порошковой композиции, определяет возможность выбора и назначения режима лазерной обработки для обеспечения высокого качества материала после сплавления.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, математическая модель, термическое состояние порошковых частиц, численное моделирование, плавление, испарение, диапазон фракции порошка, режим лазерной обработки.

*Работа выполнена на оборудовании ЦКП САМ-технологий (RFMEFI59314X0003)
при поддержке Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации
Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития
научно - технологического комплекса России на 2014-2020 годы».*

ВВЕДЕНИЕ

Создание нового технологического уклада современного производства, имеющие место в настоящее время во всех развитых странах мира, фактически реализуется за счет применения мощного компьютерного обеспечения систем автоматизированного проектирования и примене-

ния 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 в состоянии поставки. Исследования по выбору оптимальных режимов обработки в этой технологии приведены в значительном количестве публикаций [1-17], которые можно с некоторой условностью разделить на следующие основные виды.

Во-первых, это публикации по экспериментальным исследованиям, в которых по результатам металлографического исследования значительного количества треков проплавления порошкового слоя делается заключение о выборе режима обработки [14, 16, 10, 8, 11, 12, 17, 7, 13]. Во-вторых, это публикации, в которых исследование режимов обработки проводится методом математического моделирования и, сравнивая полученные результаты с результатами экспериментов, выбирается режим обработки [4, 2, 1, 15, 3, 6, 5, 9].

В свою очередь, в работах по математическому моделированию можно выделить два уровня рассмотрения процесса - макромасштабный и

Богданович Валерий Иосифович, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: bogvi@yandex.ru

Гиорбелидзе Михаил Георгиевич, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

E-mail: mikhailgiorbelidze@mail.ru

Сотов Антон Владимирович, аспирант кафедры технологий производства двигателей.

E-mail: sotovanton@yandex.ru

Проничев Николай Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологий производства двигателей. E-mail: pdla@ssau.ru

Смелов Виталий Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей. E-mail: pdla_smelov@mail.ru

Агаповичев Антон Васильевич, аспирант кафедры технологий производства двигателей.

E-mail: agapovichev5@mail.ru

микро масштабный уровень. На макромасштабном уровне порошковый слой моделируется как, некоторый новый сплошной материал с эффективными значениями физико-механических характеристик этого материала и решаются задачи прогнозирования его нагрева и плавления, тепловых и остаточных напряжений, усадки материала, изменения геометрических размеров слоя и т.д. На микро масштабном уровне, материал рассматривается как порошковый слой различной толщины, с различной укладкой частиц порошка и обычно рассматриваются задачи определения термического состояния отдельных частиц, растекание материала в зонах контакта частиц, оценки проникновения расплава в нижние слои, причины возникновения и зарастивания различных типов пор в материале и т.д.

В этих работах показано, что в зависимости от режима обработки порошковый материал может не нагреваться до температуры плавления, проплавляться только частично или полностью, или нагреваться до испарения, вскипания или даже возгорания. На основании этого, например, в [4] делается убедительный вывод, что диапазон режимов лазерного излучения, при котором формируются требуемые по качеству слои, очень узок и требует значительного объема экспериментальных исследований. Однако, главная причина такого узкого диапазона режимов, связанная с реальным диапазоном рассеивания размеров частиц используемого порошка (диапазоном используемой фракции), в этих работах не выделена.

Проведенный анализ публикаций позволяет сделать вывод, что потенциальные физико-механические характеристики материала изделия, получаемого из порошкового материала при послойной обработке, определяются режимом обработки каждой отдельной частицы этого слоя, а последующая обработка слоев разнонаправленной штриховкой, термической обработкой, спеканием или пропиткой только позволяет повысить эти характеристики и нивелировать другие последствия локальной высокоэнергетической лазерной обработки дискретного слоя порошка.

Режим обработки каждой отдельной частицы должны обеспечить ее обязательное расплавление в местах их контакта с другими частицами и нижележащим слоем для обеспечения протекания топочимических реакций взаимодействия материалов на этих контактирующих поверхностях. Однако, при используемых плотностях тепловых потоков и вводе излучения через верхнюю поверхность порошка, порошковые частицы имеют значительный градиент температуры по своему сечению, что может приводить к их нагреву ниже температуры плавления в нижней части и нагреву до температуры испарения на верхней поверхности.

Это в частности приводит к выводу о низкой информативности результатов только экспериментальных исследований.

В связи с этим достаточно большой объем публикаций посвящен результатам математического моделирования процесса с целью выбора режима обработки. Важнейшим этапом в математическом моделировании является этап построения математической модели, адекватно отражающей все основные особенности процесса в соответствии с целью моделирования [1, 6, 2]. Обзор научных публикаций по моделированию процесса СЛС показал, что большинство разрабатываемых моделей ставят целью исследование какой-либо одной локальной области процесса синтеза. Как правило, в этих исследованиях отражено движение лазерного луча, сфокусированного в зоне обработки в виде пятна, диаметр которого составляет десятки микрометров.

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]. Надо отметить, что в настоящее время разработаны мощные программные продукты численного конечно-элементного (на пример, ANSYS, NF и т.д.) решения краевых задач теплопроводности, представленных в стандартном виде с классическим дифференциальным уравнением теплопроводности для однородной среды. Наличие таких продуктов фактически приводит только к необходимости сведения формулируемых математических моделей рассматриваемого процесса к этому стандартному виду с обоснованием однородности среды, сведения дифференциального уравнения теплопроводности и краевых граничных условий к стандартному виду, представленному в этих продуктах.

В связи с этим, возникает необходимость рассмотрения физически обоснованного подхода к самой постановке математической модели процесса теплопередачи в объемном теле при фазовом превращении материала в виде краевой задачи для сплошного тела, в котором при определенной температуре начинается и при другом значении температуры завершается фазовый переход с образованием области неоднородного, жидкокристаллического состояния материала. 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. Такая постановка задачи моделирования должна быть адаптирована к применению стандартного компьютерного программного продукта. Решение и результаты математического моделирования для такой постановки задачи ранее в литературе не приводились.

Целью настоящей работы является изложение результатов исследований, полученных авторами 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 Transient Thermal и удобной для прикладного применения по определению режима оптимальной обработки композиции. Приведены некоторые результаты численного порошковой композиции из материала жаропрочного хромоникелевого сплава ВВ751П.

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

В типовом процессе СЛС слой порошка наносится на поверхность платформы построения изделия либо на сплавленный ранее слой с последующим сдвигом по вертикали подвижной части платформы на величину 30...100 мкм с выравниванием по высоте и уплотнением слоя за счет перемещения скребка, прижатого к его неподвижной части поверхности. Затем проводится сплавление порошка энергией лазерного луча, непрерывно перемещающегося по заданной траектории вдоль контура сечения модели детали с целью его закрепления на этом контуре. На сле-

дующей стадии процесса проводится сплавление порошка внутри выделенного контура детали перемещающимся также по определенной заданной непрерывной траектории лазерным лучом. На завершающейся стадии формирования слоя он обдувается ламинарным потоком газа для удаления не закрепленных частиц.

Некоторые параметры и характеристики типовой установки СЛС, например, SLM 280HL немецкой компании SLM Solutions следующие. 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 и водяным охлаждением марки YLR-400SM компании IPG Photonics. Вид излучения инфракрасный с длиной волны (1075±5) нм. Тип излучения одномодовый TEM₀₀. Расходимость луча на выходе из волокна 0,18 мрад 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.

Типовые характеристики применяемого порошкового материала рассмотрим на примере порошка жаропрочного хромоникелевого сплава ВВ751П (ХН56КВМТЮБ). Результаты исследования этого порошка в состоянии поставки показали, что порошковый материал имеет явно выраженную сферическую форму (рис.1) с диапазоном рассеивания частиц по величине их диаметра (табл. 1).

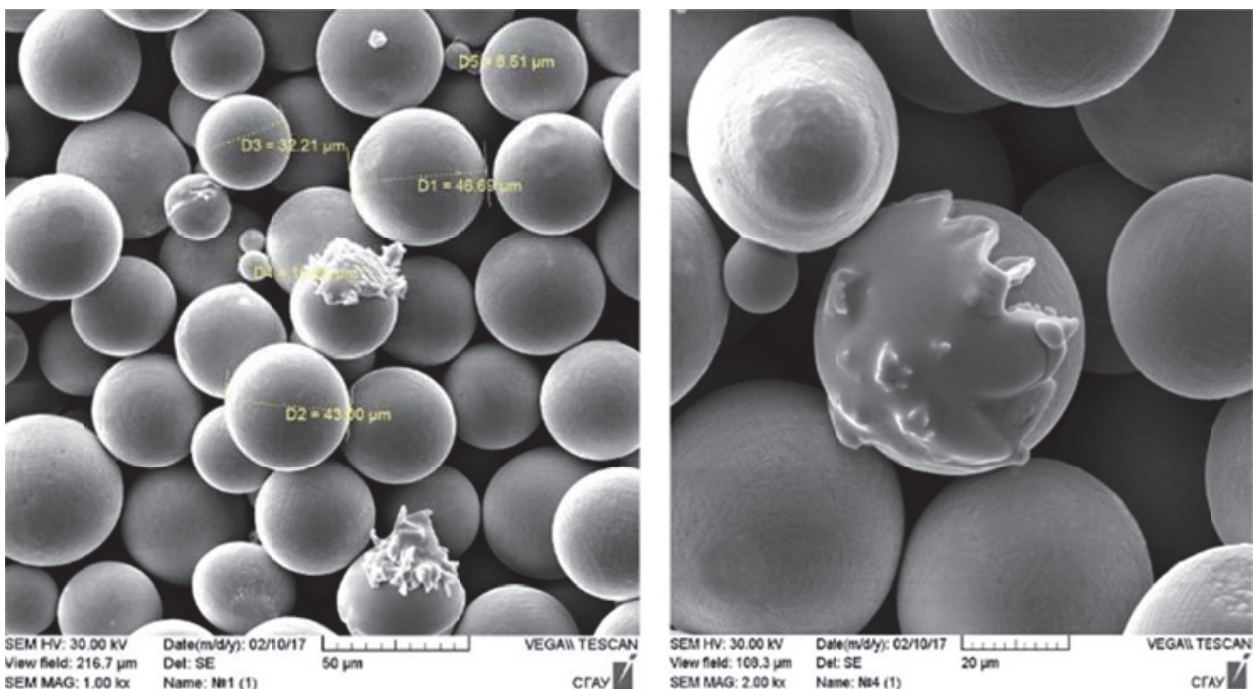


Рис. 1. Внешний вид частиц порошка сплава ВВ751П в состоянии поставки

Таблица 1. Удельные доли количества (n_i/n) и массы (M_i/m) частиц в заданных диапазонах их диаметра 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
n_i/n	0,02	0,05	0,04	0,13	0,17	0,22	0,17	0,07	0,08	0,05
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 такой композиции порошка является мощность потока, скорость движения и шаг смещения траектории лазерного излучения.

При регулировании сдвига по вертикали подвижной части стола построения изделия на величину 50 мкм 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.

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, учитывающего передачу 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 объеме [19] можно свести к следующему виду, учитывающему процессы фазового превращения материала в диапазоне температур ликвидуса и ликвидуса и возможность испарения поверхности и адаптируемому к сквозной конечно-элементной процедуре для использо-

вания стандартного программного продукта ANSYS Transient Thermal:

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

В (1) использованы следующие обозначения:

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

где $T(t, \vec{r})$ - температура в момент времени t точки объема тела с координатой \vec{r} $c(T)$, $\rho(T)$ и $\lambda(T)$ - удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала, T_S , T_L и $T_{\text{ис}}$ - температуры солидуса, ликвидуса и испарения материала, L и $L_{\text{ис}}$ - 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, $\varphi((T - T_S)/(T_L - T_S))$ - функция темпа фазового превращения (в рассматриваемом случае плавления, названная по аналогии с известной функцией, получившей название темпа кристаллизации [20, 21], связанная с удельной долей объема новой жидкой фазы в номинальном объеме расплавляемого материала в жидко-кристаллической области фазового перехода $\psi((T - T_S)/(T_L - T_S))$ 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 материал 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 распре-

деления температур шаровой частицы, краевое условие можно представить в виде:

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

В (4) использованы обозначения: 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 полярный 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 $0 \leq \theta \leq 0,5\pi$, то есть на верхней половине шара.

Величина теплового потока $q(t, \theta, \varphi)$ должна в общем случае зависеть от времени t , от зенитного θ и азимутального угла φ сферической системы координат, так как лазерный источник перемещается над шаром с постоянной скоростью v и величина подводимой плотности лазерного излучения будет функцией этих переменных для точек поверхности, а 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 функцией времени и всех трех координат сферической системы.

В такой постановке краевая задача (1) – (4), при задании вида $q(t, \theta, \varphi)$, разрешима численным моделированием с использования стандартного программного продукта ANSYS Transient Thermal. 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 полярного угла.

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

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПОДВОДА ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ШАРОВЫХ ЧАСТИЦ

Лазерное излучение для указанной цели с достаточной точностью можно моделировать плоским круговым источником с равномерным распределением плотности потока энергии I в фокальной плоскости излучения в пределах круга с диаметром D_L :

$$I = I_{cp} = 4N_L / \pi D_L^2. \quad (5)$$

При обработке порошковой композиции лазерный источник (5) с диаметром пятна излучения D_L перемещается с постоянной скоростью v над частицей порошка диаметром D_n и подводит энергию излучения к верхней части его поверхности. Энергия лазерного излучения W_{lp} попадающая на верхнюю половину поверхности шара в некоторый момент времени t , равна той энергии излучения, которая в этот момент времени проходит через площадь пересечение проекций шара и движущегося круга пятна излучения в фокальной плоскости лазерного излучения (рис. 2,а). Хотя такой подвод энергии в реальном процессе является многовариантным

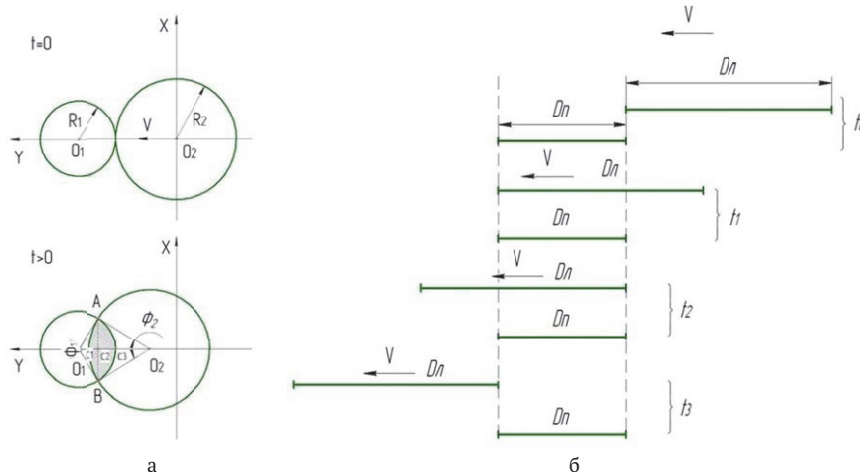


Рис. 2. Движение пятна лазерного излучения относительно частицы порошка: а – схема подвода энергии к поверхности частицы при движении пятна излучения вдоль линии, соединяющей центры шара и пятна излучения; б – схема изменения во времени положения пятна нагрева относительно частицы

из-за различных направлений траектории движения лазерного пятна относительно частицы представляет интерес рассмотрение случая траектории, представленной на рис. 2,а с изменением положения пятна лазерного излучения при его движении относительно размера шара, представленного в виде схемы на рис. 2,б. Из этой схемы видно, что от момента времени $t = 0$ до $t = t_1 = D_{\Pi} / v$ пятно излучения в своем движении не полностью и не симметрично покрывает частицу. Начиная с момента времени $t = t_1$ до момента времени $t = t_2 = D_{\Pi} / v$, пятно полностью и симметрично покрывает частицу, а затем с момента времени $t = t_2$ до момента времени $t = t_3 = (D_{\Pi} + D_{\Pi}) / v$ опять покрывает не полностью и не симметрично. В момент времени t_3 передача энергии частице прекращается.

Энергию лазерного излучения, которая падает на верхнюю половину шара через указанные площади перекрытия за время прохождения излучения над частицей для случая $D_{\Pi} < D_{\Pi}$ с использованием (1), можно записать в виде:

$$W_{\Pi} = \iint I dS dt = I_{cp} \iint dS dt = I_{cp} \int S(t) dt = I_{cp} \left[S_{12}(t_2 - t_1) + \int_0^{t_1} S_{01}(t) dt + \int_{t_2}^{t_3} S_{23}(t) dt \right] = I_{cp} S_{12}(t_2 - t_1) [1 + k_{\text{эф}}(k)]. \quad (6)$$

В соотношении (3) введены следующие обозначения: относительный диаметр частицы $k = (D_{\Pi} / D_{\Pi}) < 1$; $S_{01}(t)$ и $S_{23}(t)$ площади несимметричного перекрытия:

$$S_{12} = \pi D_{\Pi}^2 / 4, \quad t_n = t_2 - t_1 = (D_{\Pi} - D_{\Pi}) / v. \quad (7)$$

$$k_{\text{эф}}(k) = \frac{F(k)}{4\pi k^2(1-k)}, \quad \int_0^{t_1} S_{01}(t) dt + \int_{t_2}^{t_3} S_{23}(t) dt = \frac{D_{\Pi}^3}{16v} F(k). \quad (8)$$

Из полученных соотношений видно, что энергия W_{Π} выражается через функцию $F(k)$ с аргументом относительным диаметром частицы k . Эта функция вычислены в Mathcad, а зависимости $F(k)$ и $k_{\text{эф}}(k)$ от аргумента k представлены в табл. 2 для характерных значений диаметров частиц из табл. 1.

Из проведенного анализа видно, что реальный процесс подвода энергии W_{Π} к частице на рассмотренных трех промежутках времени на основе последнего члена в соотношениях (6) можно также трактовать, как процесс подвода энергии только на втором промежутке времени всей поверхности верхней половине шара (7) с постоянной по величине эффективной плотностью теплового потока:

$$I_{\text{эф}} = I_{cp} [1 + k_{\text{эф}}(k)]. \quad (9)$$

Использование допущения о виде лазерного излучения (5) и на основе сделанного вывода о замене реального процесса подвода энергии на рассмотренных трех промежутках времени, когда на первом и втором промежутках подвод энергии приводит к несимметричному подводу энергии с зависимостью от азимутального угла сферической системы координат и времени и, когда на втором промежутке такая не симметрия исчезает, позволяет рассматривать математически корректно задачи симметричного, относительно азимутального угла, нагрева шара с отсутствием зависимости от времени и азимутального угла в плотности теплового потока. Такое рассмотрение задач нагрева шаровых частиц не только многократно снижает объем численного моделирования, но и существенно снижает сложность анализа получаемых результатов.

Для круговой поляризации лазерного излучения с модой TEM_{00} коэффициент его поглощения материалом металлической поверхности обычно представляют в виде [22, 23]: $k_{\Pi}(\theta) = k_{\Pi,0} \cos \theta$, где $k_{\Pi,0}$ – коэффициент поглощения оптического лазерного излучения при нормальном падении излучения на поверхность, θ – угол между направлением падения излучения на поверхность и нормалью к этой поверхности в точке падения излучения.

В связи с этим, плотность теплового потока, которая вводится в поверхность шаровой частицы можно представить в виде:

$$q_k(\theta) = q_{0,k} \cos \theta, \quad q_{0,k} = q_0 [1 + k_{\text{эф}}(k)], \quad q_0 = k_{\Pi,0} I_{cp} \quad (10)$$

В соотношении (10) с помощью введения относительного диаметра частицы k в индекс величин $q_k(\theta)$ и $q_{0,k}$ констатируется их зависимость от диаметра частицы.

МОДЕЛЬНОЕ КРАЕВОЕ УСЛОВИЕ

Таким образом, на основе проведенного анализа и сформулированного допущения реальный процесс нагрева композиции порошка с заданным диапазоном рассеивания их диаметров движущимся со скоростью v лазерным излучением моделируется процессом передачи поверхности каждой шаровой частице с относительным диаметром $k = (D_{\Pi} / D_{\Pi}) < 1$ плотности теплового потока (10), который действует в течение времени нагрева (7):

$$t_{n,k} = t_2 - t_1 = (D_{\Pi} - D_{\Pi}) / v = (1 - k) D_{\Pi} / v. \quad (11)$$

Таблица 2. Значения функций $F(k)$ и $k_{\text{эф}}(k)$ в зависимости от относительного диаметра частиц k

k	0,1	0,2	0,25	0,3	0,375	0,4	0,5	0,6	0,625	0,7
$F(k)$	0,003	0,025	0,059	0,093	0,203	0,240	0,513	0,974	1,161	1,72
$k_{\text{эф}}(k)$	0,026	0,063	0,09	0,117	0,1785	0,199	0,326	0,538	0,636	0,931

Поэтому краевое условие (4) принимает вид:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = q_k(\theta) [\eta(\theta) - \eta(\theta - 0,5\pi)] - \alpha [T - T_c] - \varepsilon \sigma [T^4 - T_c^4], \text{ при } r = R. \quad (12)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЧАСТИЦАХ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ

Численное моделирование процесса нагрева частиц, представленное краевой задачей (1), (3) и (12), проводилось с использованием стандартного программного продукта ANSYS Transient Thermal. Режим нагрева порошковой композиции проводился плотностью теплового потока q_0 из (10) при скорости движения источника v . Оценка адекватности математического моделирования проводилась на модельных параметрах материала по точности получаемого численного расчета в зависимости от размера конечного элемента, интервалов времени и величины плотности теплового потока по сравнению с результатами известных точных аналитических решений в температурных диапазонах вне фазовых переходов, приближенных аналитических решений в областях фазовых переходов и по оценке изменения точности получаемых решений при уменьшении интервалов разбиения.

Из заданного набора диапазона рассеивания диаметров размеров частиц (табл. 1) были выбраны характерные размеры частиц D_p в 50, 40, 30 и 20 мкм. В соответствии с (10), (11) и табл. 2 значения плотностей теплового потока, передаваемые частицам с этими размерами, и времена действия этих потоков можно представить в виде:

$$\begin{aligned} q_{0,50} &= 1,636 \cdot q_0, & q_{0,40} &= 1,326 \cdot q_0, \\ q_{0,30} &= 1,1785 \cdot q_0, & q_{0,20} &= 1,089 \cdot q_0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} t_{H,50} &= 0,374 \cdot D_p / v, & t_{H,40} &= 0,500 \cdot D_p / v, \\ t_{H,30} &= 0,625 \cdot D_p / v, & t_{H,20} &= 0,750 \cdot D_p / v. \end{aligned} \quad (14)$$

Режим обработки композиции выбирался следующим образом. По результатам моделирования процесса нагрева частицы с максимальным диаметром в композиции (представлены результаты, когда этот максимальный диаметр составлял 50 и 40 мкм), при котором температура в нижней точке шара достигала температуры ликвидуса материала ($T_L = 1346^\circ\text{C}$), а температура в его верхней точке не превышала температуры испарения материала ($T_{ис} = 2913^\circ\text{C}$), определялось время нагрева этой частицы. По этому значению плотности теплового потока определялась плотность теплового потока (13), действующая на другие частицы, а по величине полученного значения времени определялась скорость движения источника и время нагрева (14) частиц этих диаметров. Для удобства анализа и расчетов соотношения между этими параметрами для композиций с максимальным диаметром 50 и 40 мкм приведены в явном виде:

$$\begin{aligned} q_{0,40} &= 0,811 \cdot q_{0,50}, & t_{H,40} &= 1,333 \cdot t_{H,50}, \\ q_{0,30} &= 0,720 \cdot q_{0,50}, & t_{H,30} &= 1,666 \cdot t_{H,50}, \\ q_{0,20} &= 0,666 \cdot q_{0,50}, & t_{H,20} &= 2 \cdot t_{H,50}, \\ q_{0,30} &= 0,884 \cdot q_{0,40}, & t_{H,30} &= 1,250 \cdot t_{H,40}, \\ q_{0,20} &= 0,821 \cdot q_{0,40}, & t_{H,20} &= 1,450 \cdot t_{H,40}. \end{aligned}$$

Типовые результаты математического моделирования приведены на рис. 3-5.

Было установлено, что для композиции порошка с их диаметрами в пределах (50...20) мкм не существует режима обработки, при котором частицы максимального диаметра в 50 мкм полностью проплавлены, а частицы минимального диаметра в 20 мкм не доводятся до состояния вскипания при интенсивном испарении. В связи с этим были проведены исследования по выбору режима обработки порошковой композиции с меньшим диапазоном рассеивания размеров

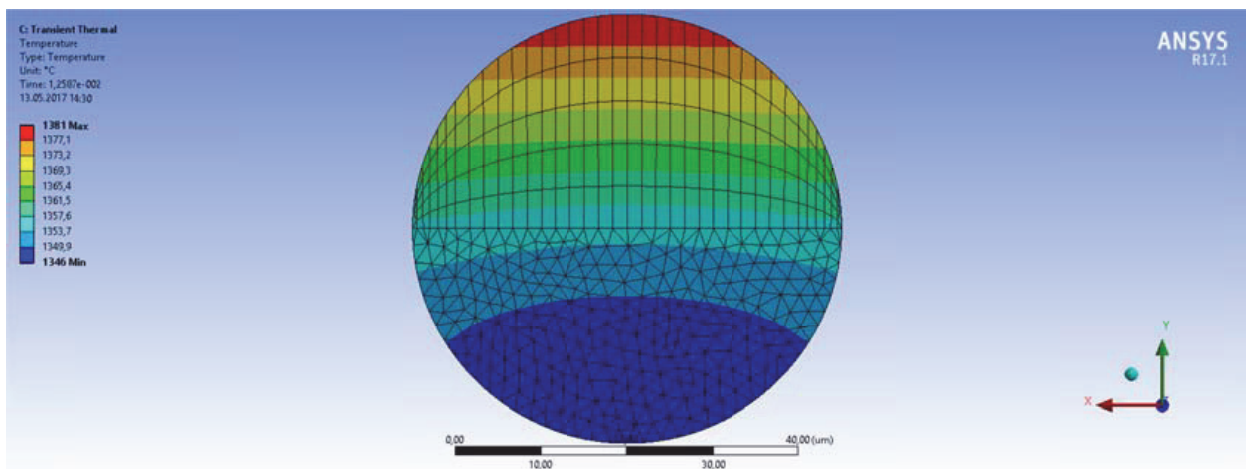


Рис. 3. Распределение температуры по сечению шара диаметром 50 мкм при плотности теплового потока $q_0 = 1 \cdot 10^8$ Вт/м² для момента времени 0,012587 с, при котором его температура в нижней точке достигла температуры ликвидуса в 1346°C

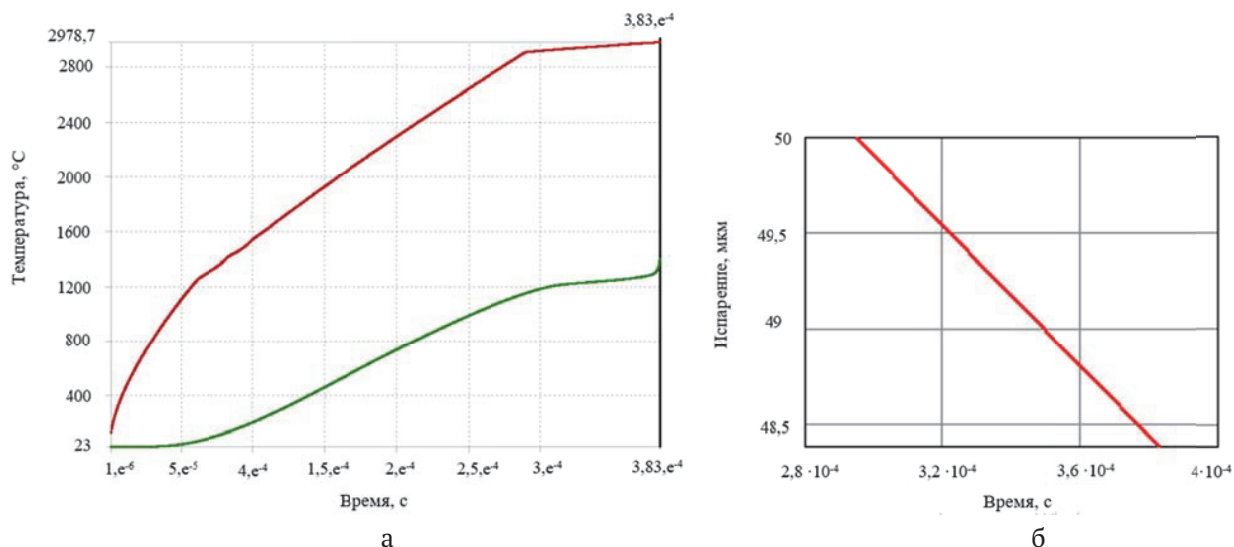


Рис. 4. Графики изменения температуры в зависимости от времени воздействия:
 а – температура верхней и нижней точек шара диаметром 50 мкм в зависимости от времени нагрева;
 б – уменьшение координаты верхней точки шара в зависимости от времени ее испарении при плотности теплового потока $q_0 = 1 \cdot 10^9$ Вт/м²

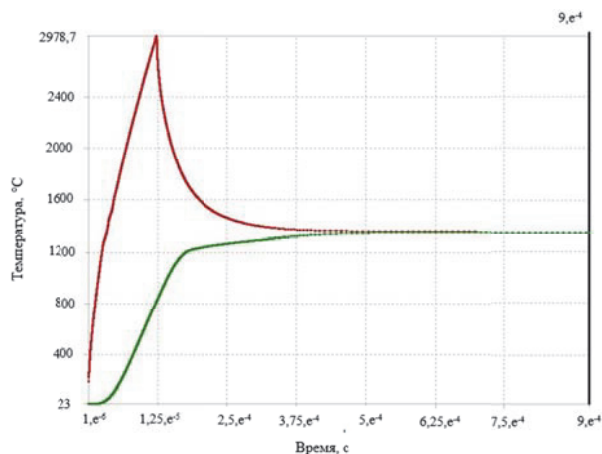


Рис. 5. Температура верхней и нижней точек шара диаметром 40 мкм в зависимости от времени нагрева при оптимальном значении плотности теплового потока $q_{0,40} = 1,6 \cdot 10^9$ Вт/м² до минимального момента времени $t_{H,40} = 1,22 \cdot 10^{-4}$ с, при котором в процессе последующего охлаждения частица полностью проплавляется, и последующего изменения температур этих точек при охлаждении шара со всей поверхности

частиц в пределах (40...20) мкм (рис. 5), которые показали существование режима с полным проплавлением всех частиц и только с началом испарения частиц в 20 мкм.

По результатам численного моделирования процесса СЛС был рекомендован базовый режим обработки порошковой композиции (40...20) мкм, соответствующий плотности теплового потока $1,206 \cdot 10^9$ Вт/м² (что соответствует мощности лазерного излучения 140 Вт) и скорости движения лазерного пятна 328 мм/с.

ВЫВОДЫ

Установлено, что возможность назначения режима обработки порошковой композиции, при которой проходит полное проплавление

всех частиц без начала процесса испарения их поверхности в верхней части, определяется диапазоном рассеивания их диаметров в порошковой композиции.

Для рассмотренной композиции порошка марки ВВ751П (ХН56КВМТЮБ) с диапазоном рассеивания их диаметров в пределах (50...20) мкм в состоянии поставки показано, что при их обработке на любом режиме с полным проплавлением частицы 50 мкм, температура в верхней точке частиц 20 мкм при любой плотности потока достигает интенсивного испарения, характеризуемого как вскипание материала, и с уменьшением скорости движения лазерного пятна этот процесс начинается на частицах фракций в 30 и даже 40 мкм.

Установлено, что при уменьшении диапазона рассеивания размеров порошка в пределах

(40...20) мкм можно реализовать режим, при котором все частицы полностью проплавляются, а в частицах 20 мкм испарение верхней части поверхности реализуется только на начальной стадии с испарением около 4 мкм в течение $5,8 \cdot 10^{-5}$ с. При этом частица в 50 мкм в момент прекращения действия лазерного потока нагревается в нижней точке до температуры около 300°C и в дальнейшем при ее остывании в ней устанавливается температура ниже температуры солидуса материала.

По результатам численного моделирования процесса рекомендован базовый режим обработки порошковой композиции (40...20) мкм и допустимые отклонения плотности потока и скорости движения лазерного пятна от базовых значений только в сторону снижения в пределах не более 2%, а также приведены и проверены на практике технологические рекомендации на способы уменьшения диапазона рассеивания фракции порошка в состоянии поставки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах: Учебное пособие // В.Е. Анкудинов, Д.Д. Аflyatunova, М.Д. Кривилев, Г.А. Гордеев. Ижевск: Удмуртский университет, 2014. 108 с.
2. Калиткин Н.Н. Численные методы: Учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 586 с.
3. Кольдоба А.В., Повешченко Ю.А., Попов М.В. Математическое моделирование лазерного спекания двухкомпонентных порошковых смесей // 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).
4. Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей / М.Д. Кривилев, Е.В. Харанжевский, Г.А. Гордеев, В.Е. Анкудинов // М.: ИПУ РАН, 2010. С. 299-322.
5. Харанжевский Е.В., Кривилев М.Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество. Ижевск: Удмуртский университет, 2011. 188 с.
6. Шишковский И.В. Селективное лазерное спекание и синтез функциональных структур: дис. ... доктор. физ.-мат. наук. Самара, 2005. 390 с.
7. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Изд-во Питер, 2015. 348 с.
8. 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. № 90. P. 1393-1417.
9. Boley C.D., Khairallah S.A., Rubenchik A.M. Calculation of laser absorption by metal powders in additive manufacturing // Applied Optics. 2015. V. 54. P. 2477-2482.
10. Селективное лазерное плавление жаропрочного никелевого сплава / В.Ш. Суфияров, А.А. Попович, Е.В. Борисов, И.А. Полозов // Цветные металлы. 2015. № 1. С. 79-84.
11. Gong H. Generation and detection of defects in metallic parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting and their effects on mechanical properties: Phd dissertation. University of Louisville, 2013. 196 p.
12. Grasso M., Colosimo B.M. Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review // Measurement Science and Technology. 2017. V. 28. P. 1-25.
13. Смелов В.Г., Сотов А.В., Агаповичев А.В. Исследование структуры и механических свойств изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления из порошка стали 316L // Черные металлы. 2016. № 9. С. 61-65.
14. 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. V. 10(4). P. 428-431.
15. Knol M.F. Thermal modelling of selective laser melting: Phd Thesis. Delft University of Technology, 2016. 79 p.
16. 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. Sufiarov, D.V. Masaylo, L. Alzina // Materials & Design. 2017. V. 114. P. 441-449.
17. Zeng K. Optimization of support structures for selective laser melting: Phd dissertation. Louisville, 2015. 201 p.
18. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
19. Карташев Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: Учебное пособие. М.: Высш. шк., 2001. 550 с.
20. Бочвар А.А. Металловедение. М.: Металлургиздат, 1956. 450 с.
21. Горбачев И.В. О ходе кристаллизации твердых растворов // Тр. Дальневосточного политехнического института им. В.В. Куйбышева. 1941. Вып. 6. С. 5-29.
22. Ковалев О.Б., Фомин В.М. Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. М.: Физматлит, 2013. 256 с.
23. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.

REFERENCES

1. Computer modeling of transport processes and deformations in continuous media: Textbook / V.E. Ankudinov, D.D. Aflyatunova, M.D. Krivilev, G.A. Gordeev. Izhevsk: Publishing house "Udmurt University", 2014. 108 p.
2. Kalitkin N.N. Numerical methods: Textbook. St. Petersburg. : BHV-Petersburg, 2011. 586 p.
3. Koldoba A.V., Poveshchenko Yu.A., Popov M.V. Mathematical modeling of laser sintering of two-component powder mixtures. // Electronic Journal. M.V. Keldysh. 2009. № 38. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2009-38> (reference date is 05.05.2017).
4. Controlling laser sintering of metal powder mixtures / M.D. Krivilev, E.V. Kharanzhevsky, G.A. Gordeev, V.E. Ankudinov // М.: IPP RAS, 2010. P. 299-322.
5. Kharanzhevsky E.V., Krivilev M.D. Physics of lasers,

- laser technologies and methods of mathematical modeling of laser effect on matter. Izhevsk: Publishing house "Udmurt University", 2011. 188 p.
6. *Shishkovsky I.V.* Selective laser sintering and synthesis of functional structures: dis. ... the doctor. fiz-mat. sciences. Samara, 2005. 390 c.
 7. *Shishkovsky I.V.* Fundamentals of high-resolution additive technologies. St. Petersburg.: Publishing House Peter, 2015. 348 p.
 8. Influence of scan 625 through laser powder bed fusion / *Y.M. Arisoy, L.E. Ciales, T. Özel, B. Lane, S. Moylan, A. Donmez* // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 2017. No. 90. P. 1393-1417.
 9. *Boley C.D., Khairallah S.A., Rubenchik A.M.* Calculation of laser absorption by metal powders in additive manufacturing // Applied Optics. 2015. V. 54. P. 2477-2482.
 10. Selective laser melting of a high-temperature nickel alloy / *V.Sh. Sufiarov, A.A. Popovich, E.V. Borisov, I.A. Polozov* // Non-ferrous metals. 2015. No. 1. P. 79-84.
 11. *Gong H.* Generation and detection of defects in metallic parts, fabricated by selective laser melting and electron beam melting and their effects on mechanical properties: Phd dissertation. University of Louisville, 2013. 196 p.
 12. *Grasso M., Colosimo B.M.* Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review // Measurement Science and Technology. 2017. V. 28. P. 1-25.
 13. *Smelov V.G., Sotov A.V., Agapovichev A.V.* Investigation of the structure and mechanical properties of articles obtained by selective laser alloying from 316L steel powder // Ferrous metals. 2016. No. 9. pp. 61-65.
 14. 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. V. 10 (4). P. 428-431.
 15. *Knol M.F.* Thermal modelling of selective laser melting: Phd Thesis. Delft University of Technology, 2016. 79 p.
 16. 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. Sufiarov, D.V. Masaylo, L. Alzina* // Materials & Design. 2017. V. 114. P. 441-449.
 17. *Zeng K.* Optimization of support structures for selective laser melting: Phd dissertation. Louisville, 2015. 201 p.
 18. *Samarskii A.A., Vabishchevich P.N.* Computational heat transfer. M.: Editorial URSS, 2003. 784 p.
 19. *Kartashev E.M.* Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids: Textbook. M: Высш. шк., 2001. 550 c.
 20. *Bochvar A.A.* Metal science. Moscow: Metallurgizdat, 1956. 450 p.
 21. *Gorbachev I.V.* On the progress of crystallization of solid solutions, Tr. Far Eastern Polytechnic Institute. V.V. Kuibyshev. 1941. Issue. 6. P. 5-29.
 22. *Kovalev O.B., Fomin V.M.* Physical principles of laser cutting of thick sheet materials. Moscow: Fizmatlit, 2013. 256 p.
 23. *Grigoriants A.G.* Fundamentals of laser processing of materials. M.: Mechanical Engineering, 1989. 304 p.

MATHEMATICAL MODELING OF POWDER MELTING PROCESS IN SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY

© 2017 V.I. Bogdanovich, M.G. Giorbelidze, A.V. Sotov, N.D. Pronichev, V.G. Smelov, A.V. Agapovichev

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

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

Valery Bogdanovich, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Production and Quality Management in Mechanical Engineering Department. E-mail: bogvi@yandex.ru

Mihail Giorbelidze, Graduate Student at the Aircraft Production and Quality Management in Mechanical Engineering Department. E-mail: mikhailgiorbelidze@mail.ru

Anton Sotov, Graduate Student at the Technology Production Engines Department. E-mail: SotovAnton@yandex.ru

Nikolai Pronichev, Doctor of Technics, Professor at the Technology Production Engines Department.

E-mail: pdla@ssau.ru

Vitaly Smelov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Technology Production Engines Department.

E-mail: pdla_smelov@mail.ru

Anton Agapovichev, Graduate Student at the Technology Production Engines Department. E-mail: agapovichev5@mail.ru