

06

Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом

© А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев, Ю.А. Соколов, В.Н. Копаев

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: petroprom2013@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 19 января 2015 г. В окончательной редакции 27 апреля 2015 г.)

Рассмотрены особенности моделирования процесса изготовления порошковых изделий методом послойного электронно-лучевого синтеза. Проанализированы различные типы пространственного распределения удельной мощности луча по поверхности слоя порошка: усеченное гауссовское распределение и β -распределение. Показано, что математическое описание процесса послойного синтеза изделий электронным лучом включает модель взаимодействия сканирующего электронного луча с изделием и модель процессов тепло- и массопереноса при формировании изделия.

Введение

Повышение эксплуатационных свойств деталей оборудования и снижение себестоимости продукции промышленного производства связаны с необходимостью создания новых технологических процессов получения материалов и готовых изделий из них. Одним из наиболее перспективных направлений развития материаловедения является порошковая металлургия [1–5]. Создание технологии синтеза изделий электронным лучом (EBS) и разработка принципиально нового технологического оборудования для промышленной реализации этого процесса открывают дополнительные возможности по получению изделий из порошка различного химического состава с программируемой структурой и прогнозируемыми свойствами [6–8].

Процесс EBS, в основу которого положена операция послойного спекания/плавления порошка в вакууме, можно рассматривать как задачу периодического нагрева сканирующим электронным лучом. Сущность электронно-лучевой обработки состоит в использовании кинетической энергии пучка электронов, движущихся в вакууме. Подбором функциональных зависимостей отклонения луча по двум осям можно получить изделие практически любой геометрии.

Исследование процесса послойного синтеза изделий электронным лучом включает построение модели взаимодействия сканирующего электронного луча с изделием и модели процессов тепло- и массопереноса при формировании изделия. Первая модель должна включать мощность луча, скорость сканирования, удельную энергию, магнитное и электрическое поля луча. Во второй математической модели решается система, состоящая из уравнений тепло- и массообмена: передачи энергии, движения (уравнение Навье–Стокса), неразрывности.

Цель настоящей работы — анализ особенностей математического моделирования всего технологического процесса послойного синтеза порошковых изделий электронным лучом.

Математическое описание процесса послойного синтеза изделий электронным лучом

Модель взаимодействия сканирующего электронного луча с изделием включает:

- расчет мощности луча и параметров фокусирующей и отклоняющей систем для формирования заданного температурного поля на плоскости;
- расчет магнитных и электрических параметров.

Ускоренные электроны теряют свою энергию в глубине порошка. Электрон, ускоренный в электрическом поле, попадая на поверхность металла, испытывает ряд столкновений с его частицами. В результате этих столкновений он изменяет свою первоначальную траекторию и проникает на некоторую величину в глубину металла, называемую пробегом электронов [9]:

$$\delta = 2.1 \cdot 10^{-12} U^2 / \rho, \quad (1)$$

где δ — глубина проникновения, см; U — ускоряющее напряжение, В; ρ — плотность металла, g/cm^3 .

Параметрами, характеризующими тот или иной процесс электронно-лучевой технологии, в первую очередь являются: мощность электронного пучка W (рис. 1),

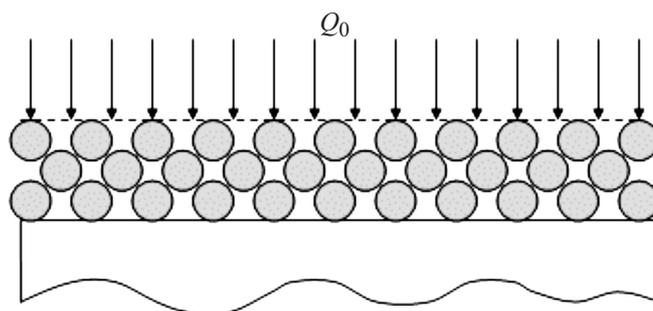


Рис. 1. Схема распределения тепловой нагрузки Q_0 на слой порошка.

удельная поверхностная мощность в месте встречи пучка с объектом q , ускоряющее напряжение U , диаметр пучка в месте его встречи с объектом d , связывающий значения W и q .

Мощность электронного пучка определяется как произведение ускоряющего напряжения U на ток луча (пучка) I

$$W = UI. \quad (2)$$

Тепловое воздействие луча на металл определяется параметрами поглощенного излучения, т.е. плотностью мощности теплового источника q . Расчет удельной мощности электронного луча необходим для решения уравнения теплопроводности.

Удельная поверхностная мощность пучка q в месте его встречи с поверхностью объекта рассчитывается как

$$q = \frac{A(T)UI}{F} = \frac{4A(T)UI}{\pi d^2} = A(T)Uj, \quad (3)$$

где $A(T)$ — доля поглощенной мощности от поступающей на поверхность мишени мощности пучка или эффективный коэффициент полезного действия нагрева, F и j — площадь и плотность тока пучка в месте его встречи с поверхностью объекта.

Поглощательная способность материала порошка A является функцией температуры (нелинейность второго рода). В ряде работ [10,11] расчету этого параметра уделяется большое внимание. Коэффициент поглощения мощности пучка чистой металлической поверхностью растет с увеличением температуры. Возрастание коэффициента A описывается уравнением

$$A(T) = a + bT, \quad (4)$$

где T — температура, a и b — коэффициенты.

Распределение мощности электронного луча по поверхности порошка

Для моделирования источника теплоты от воздействия электронного луча необходимо знать характер распределения удельной поверхностной мощности на поверхности слоя порошка. При численном моделировании упрощения свойств источника теплоты приводят к погрешностям при расчете. Одним из таких упрощений является выбор типа пространственного распределения удельной мощности луча по поверхности слоя порошка. Известны несколько видов распределения мощности: равномерное по пятну луча [11], нормальное гауссовское распределение [12], усеченное гауссовское распределение, β -распределение [13].

Равномерное распределение удельной мощности, как наиболее простое, используется для приближенных ориентировочных расчетов.

Гауссовское распределение удельной мощности электронного луча диаметром d_0 можно представить в следующем виде [12]:

$$q_g(r) = q_0 \exp(-r/r_0)^2, \quad (5)$$

где r_0 — радиус пучка в месте его встречи с объектом, q_0 — максимальная удельная мощность в центральной

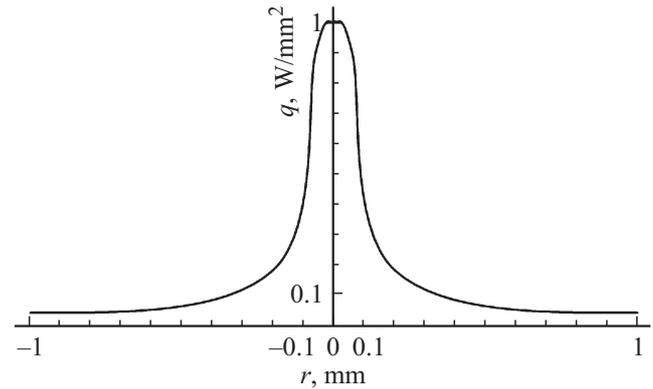


Рис. 2. Гауссовское распределение плотности тока q по радиусу r электронного луча в соответствии с уравнением (5).

точке при $r = 0$. Такое распределение характеризуется амплитудным значением в центре пятна взаимодействия луча с мишенью и неограниченностью распределения удельной мощности по радиусу. Экспоненциальный член в уравнении (5) описывает распределение удельной мощности по площади действия луча (рис. 2).

В общем виде мощность луча можно представить как двойной интеграл по площади воздействия

$$W = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} q_0 \exp(-r/r_0)^2 r dr d\alpha = \pi r_0^2 q_0. \quad (6)$$

Отсюда максимальная удельная мощность q_0 в центральной точке равна

$$q_0 = \frac{W}{\pi r_0^2}. \quad (7)$$

Если принять, что удельная мощность электронного луча распределяется по кругу с радиусом r_k , то можно говорить об усеченном гауссовском распределении, которое характеризуется скачкообразным переходом удельной мощности при конечном радиусе распределения r_k . Тогда основной задачей является перераспределение общей мощности на площадь круга с радиусом r_k , что приводит к увеличению амплитудного значения удельной мощности в центре.

В этом случае мощность луча определяется как

$$W = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_k} q_0 \exp(-r/r_0)^2 r dr d\alpha = \pi r_0^2 q_0 (1 - \exp(-(r_k/r_0)^2)). \quad (8)$$

Рассмотрим случай, когда $r_k = r_0$:

$$W = \pi r_0^2 q_0 (1 - e^{-1}) = \pi r_0^2 q_0 \frac{e-1}{e}. \quad (9)$$

Тогда максимальная удельная мощность q_0 в центральной точке равна

$$q_0 = \frac{W}{\pi r_0^2} \frac{e}{e-1} = 1.582 \frac{W}{\pi r_0^2}. \quad (10)$$

Увеличение амплитудного значения в 1.582 раз позволяет перераспределить общую мощность луча по площади воздействия луча.

Формула (8) позволяет задать процентное значение от общей площади распределения луча. Например, пусть

$$W = 0.9\pi r_0^2 q_0, \quad (11)$$

тогда

$$\exp(-(r_k/r_0)^2) = 0.1. \quad (12)$$

Отсюда конечный радиус при 90% от общей площади распределения луча равен

$$r_k = r_0 \sqrt{\ln \frac{1}{0.1}} = 1.517r_0. \quad (13)$$

Удельная мощность луча при гауссовском распределении в любой точке области воздействия луча с радиусом r_i может быть рассчитана по следующей формуле:

$$q(r_i) = \frac{W}{\pi r_0^2} \exp(-(r_i/r_0)^2). \quad (14)$$

Рассмотрим β -распределение удельной мощности по площади воздействия электронного луча на поверхность подложки

$$q(r) = q_m \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right)^\beta, \quad (15)$$

где q_m — максимальная удельная мощность в центральной точке круга, β — показатель степени ($\beta > 1$, чтобы $\frac{\partial q}{\partial r}|_{r=r_0} = 0$).

Особенностью β -распределения удельной поверхностной мощности электронного луча q_β является монотонное плавное уменьшение от максимального значения в центре круга до нуля при $r = r_0$ (15).

Мощность луча при β -распределении равна

$$\begin{aligned} W &= q_m \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right)^\beta r dr d\alpha \\ &= 2\pi q_m r_0^2 \int_0^1 \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right)^\beta d\left(\frac{r}{r_0}\right)^2. \end{aligned} \quad (16)$$

После интегрирования получаем

$$W = \frac{\pi q_m r_0^2}{(\beta + 1)}. \quad (17)$$

Максимальная удельная мощность q_m в центральной точке круга равна

$$q_m = \frac{(\beta + 1)W}{\pi r_0^2}. \quad (18)$$

Удельная мощность луча при β -распределении в любой точке области воздействия луча с радиусом r_i может быть рассчитана по следующей формуле:

$$q_\beta(r_i) = \frac{(\beta + 1)W}{\pi r_0^2} \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_0}\right)^2\right)^\beta. \quad (19)$$

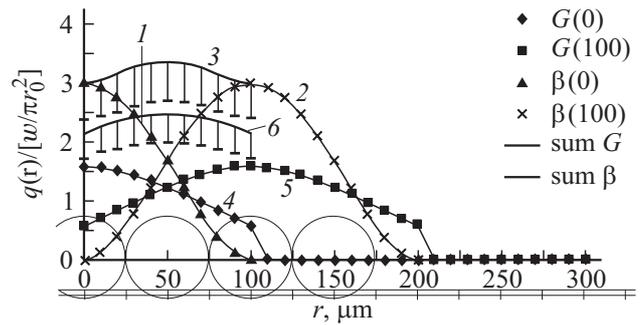


Рис. 3. Типы пространственного распределения удельной мощности луча диаметром 0.2 mm по поверхности порошка при синтезе изделий электронным лучом: β -распределение — первого теплового источника 1, второго теплового источника 2, суммирующая зависимость 6; усеченное гауссовское распределение — первого теплового источника 4, второго теплового источника 5, суммирующая зависимость 3.

К числу основных задач при описании удельной мощности луча по β -распределению относится определение показателя степени β , который должен быть больше единицы, чтобы обеспечить $\frac{\partial q}{\partial r}|_{r=r_0} = 0$.

При сканировании поверхности электронным лучом происходит наложение тепловых источников. Рассмотренное распределение источника тепла по различным законам приведено на рис. 3: усеченное гауссовское распределение (3, 4, 5), β -распределение двух тепловых источников (1, 2, 6).

Считаем, что при нагреве в течение малого времени перемещения луча на 100 μm тепло от места воздействия луча не отводится. На рис. 3 показаны графические суммирующие зависимости 6 и 3, учитывающие перемещение электронного луча по поверхности подложки: 3 — усеченное гауссовское распределение, 6 — β -распределение.

Максимальная удельная мощность q_0 в центральной точке при усеченном гауссовском распределении определяется по формуле (10).

Общая мощность луча, приложенная к площади луча в месте встречи с подложкой, при различных видах распределений постоянна.

На рис. 4 показано пространственное гауссовское и β -распределения удельной мощности луча диаметром 0.6 mm по поверхности слоя порошка.

Расчет требуемого диаметра электронного луча, который во многом определяет геометрические параметры источника нагрева, зависит не только от ускоряющего напряжения и тока луча, но и от конструктивных особенностей узла эмиссии электронов и оптических параметров фокусирующей системы [14]:

$$d_0 = f(S, U, I), \quad (20)$$

где S — постоянная электронно-оптической системы, которую, в свою очередь, можно представить в виде

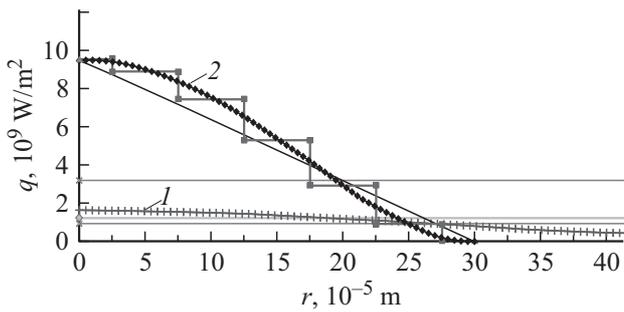


Рис. 4. Типы пространственного распределения удельной мощности луча диаметром 0.6 mm по поверхности порошка при синтезе изделий электронным лучом: 1 — пространственное гауссовское, 2 — β -распределение.

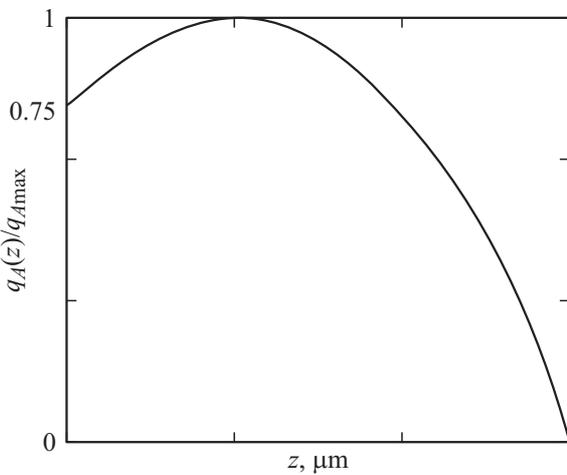


Рис. 5. Графическая зависимость распределения мощности от расстояния z от поверхности мишени.

следующей функциональной зависимости [14]:

$$S = f(C, f, T_k, j_e), \tag{21}$$

где C — безразмерная постоянная сферической aberrации системы электромагнитных линз пушки, f — фокусное расстояние, T_k — температура катода, j_e — сила тока эмиссии электронов с катода.

Модель источника тепла может быть поверхностной или объемной. Для металлов, где глубина проникновения электронов составляет примерно $10^{-3} - 10^{-5}$ mm, можно принять поверхностный тип источника тепла. Если глубина проникновения электрона соизмерима с размерами порошка или с диаметром пятна нагрева, то целесообразно считать источник тепла объемным. Поскольку глубина проникновения электронов в процессе EBS составляет десятки микрон, считаем источник тепла объемным.

Передача энергии по мере проникновения электрона вглубь вещества происходит неравномерно. Поэтому мощность, поглощаемая единичным объемом вещества, является функцией расстояния z от поверхности [15].

Эта функция в широких пределах не зависит от энергии электронов в пучке (рис. 5):

$$\frac{q_A(z)}{q_{A \max}} = 1 - \frac{9}{4} \left(\frac{z}{\delta} - \frac{1}{3} \right)^2, \tag{22}$$

где $q_A(z)$ — удельная объемная мощность, поглощаемая материалом мишени в зависимости от расстояния z от ее поверхности, $q_{A \max} = \frac{4}{3} A(T) U j$ — максимальное значение $q_A(z)$ на расстоянии $z = \delta/3$ от поверхности мишени.

При малых значениях удельной мощности будет происходить лишь нагрев поверхности, при более высокой — плавление, если плотность мощности станет еще выше — испарение. При плавлении материала необходимо учитывать энтальпию.

Геометрическая модель шарообразного порошка

В первом приближении модель шарообразного порошка может быть заменена на прямоугольный параллелепипед равновеликого с шаром объема, который с достаточной большой долей погрешности отражает процессы тепло- и массопереноса. Существенно повысить точность расчета позволяет послойная геометрическая модель порошка, представленная на рис. 6, а. Предлагаемая модель представляется совокупностью параллелепипедов высотой $1 \mu\text{m}$, причем объем каждого из малых прямоугольных параллелепипедов равен соответствующему объему усеченного сегмента шара. Например, представленная на рис. 6, б модель шара диаметром $50 \mu\text{m}$ разделена на 50 слоев.

Подход, позволяющий точно заменить шарообразную форму порошка набором прямоугольных параллелепипедов, обеспечивает более точный тепловой расчет.

Учет пористости верхнего слоя порошка

Пористость верхнего слоя порошка следует учитывать при операциях предварительного нагрева формируемого

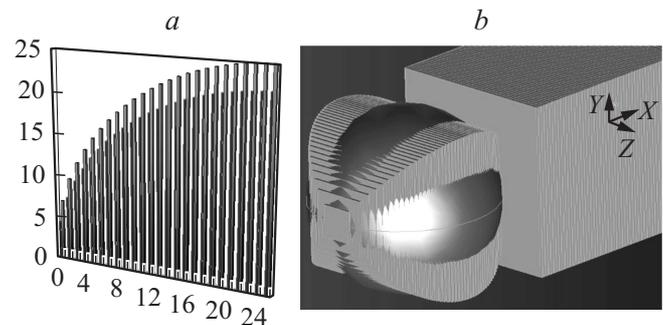


Рис. 6. Геометрическая модель шарообразного порошка: а — общая, б — для шара диаметром $50 \mu\text{m}$.

изделия, а при плавлении порошка — только в начальный малый момент времени. Поэтому при моделировании операции плавления порошка пористостью можно пренебречь. Верхний слой порошка, как правило, укладывается в гексагонально плотнейшую упаковку. Влияние пористости верхнего слоя порошка следует учитывать через коэффициент теплопроводности, а также излучательный теплоперенос в порах. В работе [11] предложена следующая формула для определения эффективной теплопроводности λ_e двухфазной системы, состоящей из металлической матрицы с теплопроводностью λ_m и теплопроводностью среды в порах λ_f , в предположении, что фазы расположены последовательно по отношению к одномерному тепловому потоку:

$$\lambda_e/\lambda_m = 1/[1 + P(\lambda_m/\lambda_f - 1)]. \quad (23)$$

Эффективное значение коэффициента теплопроводности поры

$$\lambda_{f,eff} = \lambda_f + \lambda_r. \quad (24)$$

Лучистый теплообмен в вакуумном пространстве между порошком учитывается следующей зависимостью [11]:

$$\lambda_{f,eff} = \lambda_r = 4\gamma d\epsilon\sigma T^3. \quad (25)$$

Перемещение твердо-жидкой границы в слое при электронно-лучевом воздействии (задача Стефана)

В процессе синтеза электронным лучом при достижении определенной температуры происходит плавление верхнего слоя порошка с перемещением твердо-жидкой границы в глубь изделия для надежного сплавления с предыдущим слоем. Тепло распространяется по изделию. Одновременно происходит отток тепла вследствие излучения верхнего слоя порошка.

Будем считать, что в рассматриваемом металлическом порошке происходят фазовые превращения, сопровождающиеся поглощением и выделением тепла. В этом случае определение температурного поля в твердой и жидкой фазах и скорости перемещения границы раздела фаз можно выполнить решением задачи Стефана [16].

Условие фазового перехода (условие Стефана) имеет следующий вид:

$$\lambda_s \partial T_s / \partial n = \lambda_l \partial T_l / \partial n - \rho L_m dz(t)/dt, \quad (26)$$

где n — нормаль в каждой точке поверхности раздела твердо-жидкой фазы, $z(t)$ — координата границы раздела фаз в произвольный момент времени, L_m — удельная теплота плавления, λ_l , λ_s — коэффициенты теплопроводности материала соответственно в жидком и твердом состояниях, T_s , T_l — температура материала соответственно в жидком и твердом состояниях, ρ — плотность материала.

В качестве инструмента моделирования выбран программный комплекс ANSYS Workbench [17], пространственный режим — 3D, режим расчета — динамический,

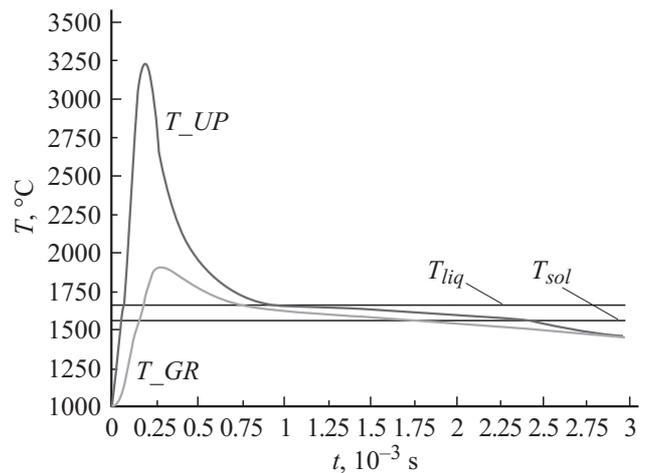


Рис. 7. Динамика изменения температур на верхней (T_{UP}) и нижней (T_{GR}) границах слоя порошка в результате первого воздействия электронного луча мощностью 900 W (на примере сплава ВТ6). T_{sol} и T_{liq} — температуры солидус и ликвидус соответственно.

тепловой режим — неадиабатный. В среде ANSYS Workbench рассчитываются процессы нагрева и плавления порошка электронным лучом с учетом нелинейной зависимости теплофизических параметров от температуры и энтальпии фазового перехода при плавлении и кристаллизации порошка. Размерная обработка материалов осуществляется лучом периодического действия. Поскольку нагрев осуществляется до температуры плавления сплава (например, для титанового сплава ВТ6 — до 1680°C), то скорости нагрева и охлаждения очень высокие: dT/dt — выше 10^5 K/s.

На элементарный объем в рассматриваемой модели выполнено одно электронно-лучевое воздействие. Динамика изменения температур на поверхности порошка (обозначение T_{UP}) и на границе слоев (обозначение T_{GR}) в интервале времени первого воздействия электронного луча мощностью 900 W приведена на рис. 7. Видно, что происходит уменьшение скоростей изменения температур при прохождении фазового перехода.

На рис. 7 хорошо видно влияние скрытой теплоты плавления на процессы нагрева и охлаждения. При нагреве поглощается скрытая теплота, при охлаждении — выделяется. Пространственное распределение температуры приблизительно соответствует распределению удельной мощности.

Решение задачи Стефана позволяет рассчитать глубину проплавления и динамику перемещения твердо-жидкой границы вследствие периодического воздействия электронного луча на поверхность. Для решения задачи при анализе динамики перемещения твердо-жидкой границы задан малый интегральный шаг по времени, равный $2\mu s$. Глубина фазового перехода после первого воздействия показана на рис. 8, где изображена температура поверхности соприкосновения порошка с уже сплавленной структурой. Глубина проплавления,

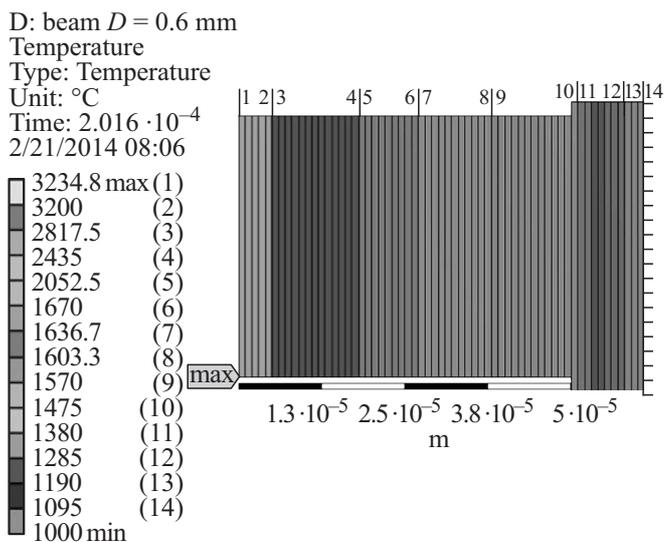


Рис. 8. Глубина фазового перехода в материале после первого воздействия электронного луча. Цифры — границы различных участков изменения скоростей нагрева и охлаждения.

зависящая от удельной мощности луча, составляет от 1 до 2 слоев.

В зависимости от теплофизических характеристик материала порошка и режима обработки поверхности электронным лучом граница раздела твердо-жидкой фазы перемещается с различной скоростью.

Выводы

1. Сложность физико-химических процессов и наличие фазовых переходов, протекающих в металлах и сплавах при воздействии электронным лучом, определяют необходимость построения математической модели технологического процесса синтеза порошковых изделий электронным лучом как необходимой составляющей при написании управляющей программы обработки.

2. При моделировании источника теплоты от воздействия электронного луча необходимо учитывать, что важное значение имеет характер распределения удельной поверхностной мощности по поверхности слоя порошка. В процессе синтеза изделий электронным лучом может происходить наложение тепловых источников с различным типом пространственного распределения удельной мощности луча по поверхности слоя порошка: нормальное и усеченное гауссовское распределение, β -распределение.

3. Задача, описывающая нагрев и плавление порошка электронным лучом, является нелинейной вследствие зависимости теплофизических параметров от температуры. Для ее решения эффективно использовать метод конечных элементов, позволяющий учитывать геометрическую форму сечения, зависимость теплофизических параметров от температуры, энтальпию фазового перехода при плавлении и кристаллизации порошка.

4. Решение задачи Стефана позволяет рассчитывать скорости нагрева и охлаждения слоя порошка, температурное поле синтезируемого изделия и подложки, глубину проплавления, скорость перемещения твердо-жидкой границы в глубь изделия при послойном синтезе порошковых изделий электронным лучом, за счет чего управлять процессами формирования синтезируемого слоя и сплавления текущего слоя с предыдущим. Таким образом, математическое моделирование позволяет программировать структуру и формировать требуемые свойства готового изделия.

Список литературы

- [1] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов В.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 178. С. 148–155.
- [2] Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
- [3] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.
- [4] Кокорин В.Н., Рудской А.И., Филимонов В.И., Булыжев Е.М., Кондратьев С.Ю. Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
- [5] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кожин А.М., Наумов В.В., Кокорин В.Н., Сизов Н.А. // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 11 (200). С. 11–14.
- [6] Murr L.E., Gaytan S.M., Ceylan A., Martinez E., Martinez J.L., Hernandez D.H., Machado B.I., Ramirez D.A., Medina F., Collins S., Wicker R.B. // Acta Materialia. 2010. N 58. P. 1887–1894.
- [7] Viamino S., Penna A., Ackelid U., Sabbadini S. // Intermetallics. 2011. N 19. P. 776–781.
- [8] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.
- [9] Будкин Ю.В., Сивов Е.Н., Соколов Ю.А. Электронно-лучевая сварка. М.: ДПК Пресс, 2010. 96 с.
- [10] Веденов А.А., Глуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
- [11] Углов А.А., Смуров И.Ю., Лашин А.М., Гуськов А.Г. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы. М.: Наука, 1991. 288 с.
- [12] Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
- [13] Gusarov A.V., Yadroitsev I., Bertrand Ph., Smurov I. // J. Heat Transfer. 2009. Vol. 131. N 7. P. 072101-1.
- [14] Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
- [15] Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. М.: Энергия, 1980. 528 с.
- [16] Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
- [17] Каплуи А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.