

УДК 621.791.722:621.762.04

А.И. Рудской, Ю.А. Соколов, В.Н. Копаев

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СИНТЕЗА
ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ-6
С УЧЕТОМ ТЕПЛОТЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА
(ДВУХФАЗНАЯ ЗАДАЧА СТЕФАНА)**

A.I. Rudskoi, Yu.A. Sokolov, V.N. Kopaev

**MODELLING THE PROCESS OF ELECTRON BEAM SYNTHESIS
OF PRODUCTS FROM GRANULES OF TITANIC ALLOY VT-6 ALLOWING
FOR HEAT CAPACITY OF PHASE TRANSITION
(DIPHASE STEFAN TASK)**

В статье рассматривается моделирование процесса электронно-лучевого синтеза изделий из порошка титанового сплава ВТ-6 с учетом теплоты фазового перехода. Решение задачи Стефана позволило определить скорости нагрева и охлаждения, глубину проплавления, скорость движения перемещения твердо-жидкой границы вглубь изделия.

СИНТЕЗ ИЗДЕЛИЙ; ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ЗАДАЧА СТЕФАНА; ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ.

The present article considers modelling the process of electron beam synthesis of products from granules of titanic alloy VT-6 allowing for heat capacity of phase transition. It is established that during the electron beam synthesis of products the process of transforming the powder in a liquid state with its subsequent crystallization can be described by the Stefan two-phase task. The principles of calculating an effective mode of processing are shown at the layer-by-layer melting of powder of the VT-6 titanic alloy on the basis of the mathematical model allowing for processes of heat and mass transfer. The solution to the Stefan task has allowed to define speeds of heating and cooling, fusion depth, traverse speed of moving the firm-liquid boundary into the product.

SYNTHESIS OF PRODUCTS; ELECTRON BEAM; MODELLING; STEFAN TASK; TEMPERATURE FIELD.

Несмотря на широкое применение порошковой металлургии в современной промышленности, работы по созданию новых технологий получения таких материалов остаются актуальными [1–3]. Так, для получения поверхностных слоев с заданной структурой и свойствами перспективно использование лазерной [4, 5] и электронно-лучевой обработки деталей, изготавливаемых из различных металлических материалов.

В основу технологии синтеза изделий электронным лучом (СИЭЛ) положена операция послойного плавления порошка тугоплавких сплавов. К преимуществам данной технологии следует отнести способность электронов, достигших поверхности обработки, внедряться в материал на некоторую глубину, называемую пробегом электронов. Длина пробега электронов, зависящая от ускоряющего напряжения и плотности материала, может достигать не-

скольких десятков микрон, что повышает твердость и износостойкость синтезируемого слоя. Высокие скорости нагрева слоя порошка, достигающие значений 10^5 – 10^6 °C/с, создают необходимые условия для формирования изделия с мелкодисперсной структурой.

Целью работы является расчет эффективно-го режима обработки при послойном плавлении порошка титанового сплава ВТ-6 на базе математической модели, построенной с учетом процессов тепло- и массопереноса.

Постановка задачи

Использование концентрированного потока электронов при процессе СИЭЛ позволяет управлять глубиной проплавления и формированием структуры изделия. К числу важнейших вопросов, которые необходимо решить при реализации технологии СИЭЛ, относится расчет режимов обработки, использующий математическую модель, построенную с учетом процессов тепло- и массопереноса при формировании изделия. Для анализа глубины проплавления и динамики перемещения твердо-жидкой границы вследствие периодического воздействия электронного луча на поверхность необходимо решить задачу Стефана.

Температурное поле при нагреве и теплота фазового перехода, выделяющаяся на границе плавления (кристаллизации), описываются двухфазной задачей Стефана [6, 7]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q - \delta_s L V_n, \quad (1)$$

где c — теплоемкость материала; λ — коэффициент теплопроводности материала; ρ — плотность материала; T — температура; q — плотность теплового источника; δ_s — поверхностная δ -функция; V_n — скорость движения границы фазового перехода по нормали; L — энтальпия фазового перехода.

Температурную зависимость поглощательной способности металлов можно аппроксимировать полиномом первой степени, коэффициент теплопроводности и объемную теплоемкость — полиномом третьей степени:

$$A(T) = a + bT; \quad (2)$$

$$\lambda(T) = \lambda_1 + \lambda_2 T + \lambda_3 T^2 + \lambda_4 T^3; \quad (3)$$

$$C(T) = C_1 + C_2 T + C_3 T^2 + C_4 T^3. \quad (4)$$

В работе [8] приводятся полиномы для расчета теплопроводности, теплоемкости и плотности титана в зависимости от температуры:

$$\lambda(T) = 9,13 + 0,00323T - 3,94 \cdot 10^{-5} T^2 + 1,17 \cdot 10^{-8} T^3, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \quad (5)$$

$$C(T) = 404,2 + 0,21T, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}; \quad (6)$$

$$\rho(T) = 4574 - 0,194T, \text{ кг/м}^3. \quad (7)$$

Пористость верхнего слоя порошка следует учитывать при операциях предварительного нагрева формируемого изделия, при плавлении порошка — только в начальный малый момент времени.

Построение модели

В качестве инструмента моделирования выбран программный комплекс ANSYS Workbench, пространственный режим — 3D, режим расчета — динамический, тепловой режим — неадиабатный.

Исходные данные: диаметр порошка — $50 \cdot 10^{-6}$ м; высота подложки (изделия) — 0,1 м; температурный интервал между температурами солидус и ликвидус — 100 °C; температура солидус $T_{\text{sol}} = 1570$ °C; температура ликвидус $T_{\text{liq}} = 1670$ °C. Подложка моделируется тепловой массой со значением теплового захвата $3,4069 \cdot 10^{-2}$ Дж/°C.

Скорость сканирования электронного луча диаметром 1 мм по поверхности подложки составляет 4530 мм/с, шаг смещения луча — 1 мм. Размер сечения синтезируемого изделия толщиной 0,1 м составлял 70×70 мм. Для моделирования был выбран элементарный объем размером $100,050 \times 1 \times 1$ мм.

Источник тепла перемещается по подложке со скоростью $V_{\text{ск}}$ по определенной траектории. Способ сканирования электронного луча по поверхности показан на рис. 1, на котором изображен объем элементарной ячейки.

Значения размерных и скоростных параметров процесса электронно-лучевого синтеза образцов из порошка сплава ВТ-6 приведены в таблице.

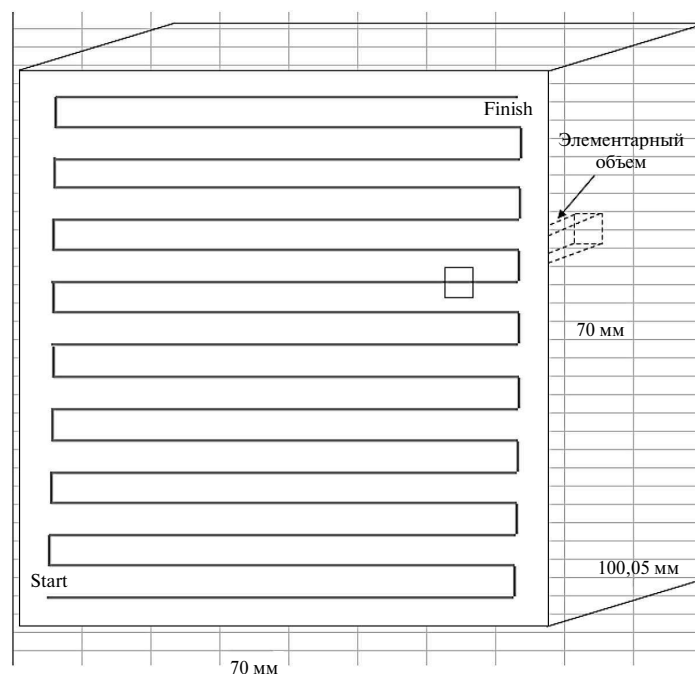
При моделировании были исследованы два режима электронно-лучевой обработки при постоянном ускоряющем напряжении 60 кВ:

ток луча 15 мА (мощность 900 Вт);

ток луча 20 мА (мощность 1200 Вт).

Нагрев каждой элементарной ячейки происходит за время, равное времени перемещения электронного луча над этой ячейкой. Для нашего случая это эквивалентно приложения тепловой нагрузки треугольной формы:

$$t = d_{\text{пятна}} / V_{\text{ск}}, \quad (8)$$



Значения размерных и скоростных параметров процесса синтеза образцов из порошка титанового сплава ВТ-6 лучом мощностью 1200 Вт

Параметр сканирования	Обозначение	Единица измерения	Значение
Площадь изделия	$A = a^2$	мм ²	4900
Площадь, перекрываемая лучом в секунду	$V_{ск} d_0$	мм ² /с	4530
Период сканирования	$A/V_{ск} \cdot d_0$	с	1,081678
Частота сканирования	f	Гц	0,92449
Число проходов	N		32,35714
Подведенное тепло	Q_J	Дж	42000
Плотность подведенного тепла к изделию за время процесса	$J_{опер}$	Дж/мм ²	8,571429
Время сканирования участка 1×1 мм при прямоугольном характере воздействия	$t_{1 \times 1} = d_0/V_{ск}$	с	0,000221

Из таблицы следует, что время сканирования данного участка при прямоугольном воздействии $t_{1 \times 1}$ равно 221 мкс. При треугольном воздействии время увеличится в два раза и составит 442 мкс.

Граничные и начальные условия математической модели (ММ) показаны на рис. 2:

области A и B (верхняя и нижняя поверхности изделия) — радиационное тепловое излучение на экран вакуумной камеры;

область C — переменная начальная температура по глубине синтезируемого изделия;

область D, E — начальная температура предварительного нагрева (1000 °С);

область F — начальная температура подложки;

область G — тепловой поток, приложенный к элементарному объему;

область H — точечная тепловая масса, моделирующая подложку.

Охлаждение на границах «изделие — окружающая среда» задается через лучистый теплообмен (передача тепла посредством электромагнитных волн) поверхности спекания/плавления с внутренней оболочкой вакуумной рабочей

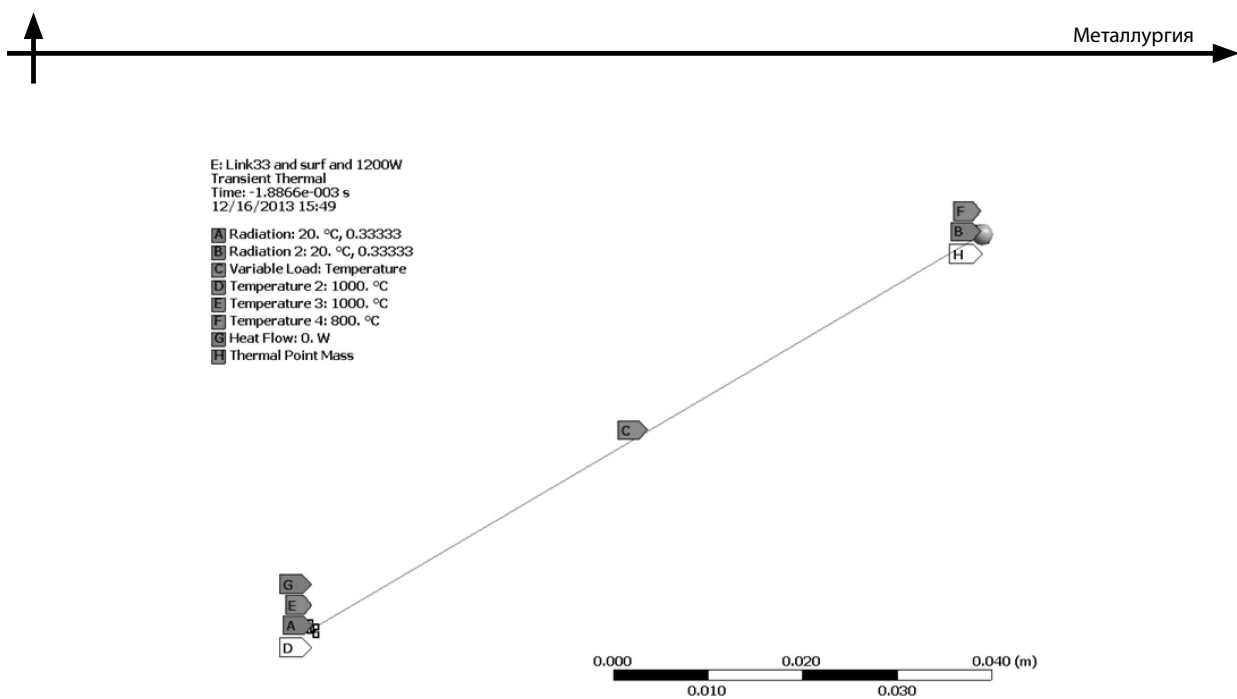


Рис. 2. Граничные и начальные условия модели

камеры. При расчете теплообмена излучением необходимо учитывать потоки тепла в областях, попадающих на экраны, установленные в вакуумной камере установки. С поверхности подложки тепло теряется излучением по закону Стефана — Больцмана.

В верхней области формируемого изделия задаем граничные условия второго рода (условия Неймана), соответствующие заданию на границе распределенного теплового потока. Для уравнения теплопроводности в изотропной среде оно записывается в виде

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q(t). \quad (9)$$

Начальные условия:
 приведенная степень черноты излучательных потоков — $\varepsilon_{пр} = 0,333$;
 температура окружающей среды и тепловых экранов — $20\text{ }^\circ\text{C}$;
 распределение температуры в зависимости от координаты z :

$$800 + (z/0,1)^{0,3} 200 \text{ при } 0 \leq z \leq 0,1;$$

$$1000 \text{ при } 0,1 < z < 0,10005 \text{ м.} \quad (10)$$

Начальная температурная нагрузка на уже сплавленную структуру, как функция от Z , представлена на рис. 3.

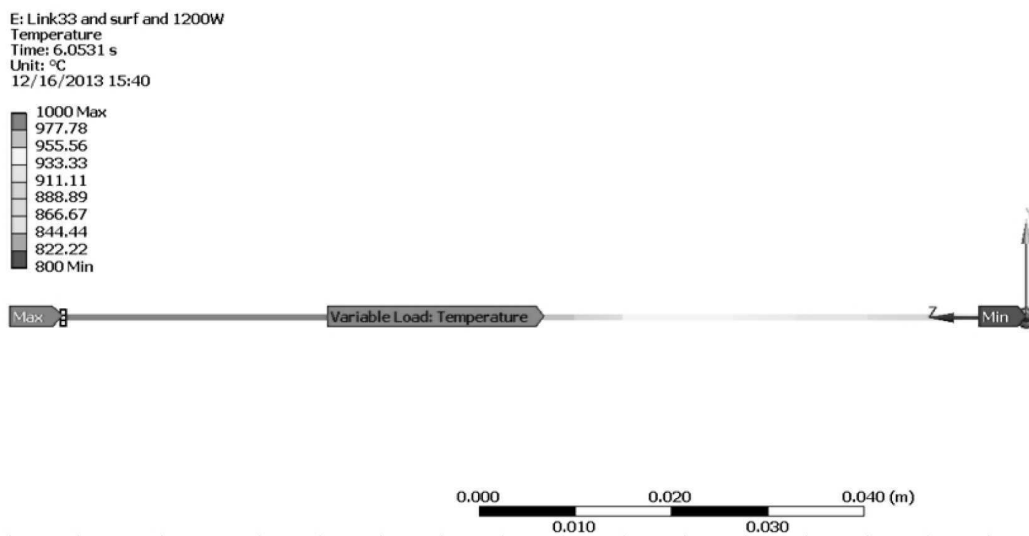


Рис. 3. Начальная температурная нагрузка

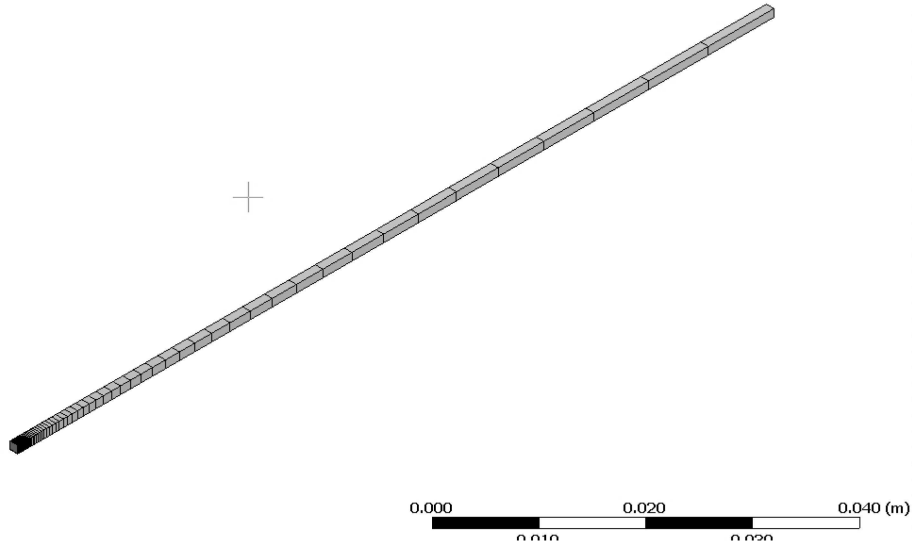


Рис. 4. Сетка конечных элементов модели

На рис. 4 представлена сетка конечных элементов модели. Как видно из рисунка, сетка имеет сгущение около поверхности нагрева. Размер элемента составляет 1 мкм около верхней поверхности и 8,7 мм в районе подложки. Такое различие в размерах элементов обусловлено минимизацией количества конечных элементов (КЭ), что важно при решении нестационарных задач, и возможностью поймать движение фазового перехода как по времени, так и в пространстве.

Типы конечных элементов, используемых в модели:

LINK 33 — линейный элемент, моделирующий теплопроводность;

SURF152 — поверхностный элемент, позволяющий отобразить нагрузку в виде излучения.

На элементарный объем в модели проведено несколько воздействий треугольной формы. Динамика изменения температур на поверхности порошка (обозначение T_UP), на границе слоев (обозначение T_GR) в интервале времени первого воздействия электронного луча мощностью соответственно 1200 и 900 Вт на ЭЯ приведена на рис. 5.

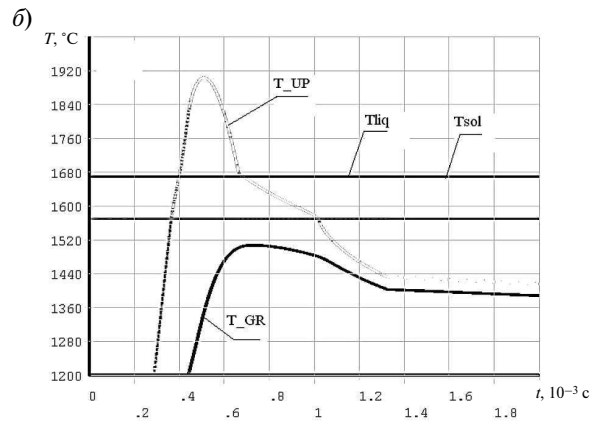
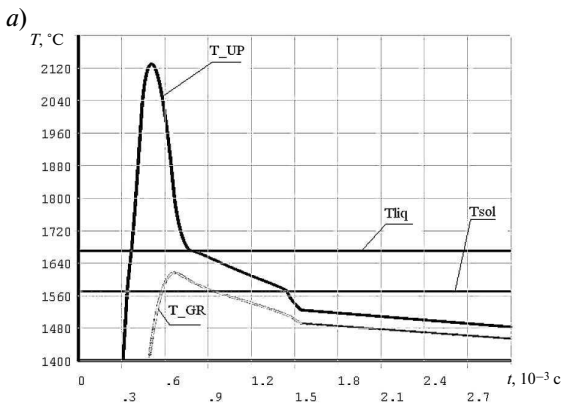


Рис. 5. Динамика изменения температур на верхней и нижней границах слоя порошка в результате первого воздействия электронного луча мощностью 1200 (а) и 900 (б) Вт

Наблюдаются уменьшения скорости изменения температур при прохождении фазового перехода. На рис. 5 хорошо видно влияние скрытой теплоты плавления на процесс нагрева и охлаждения: на графике представлены участки изменения скорости нагрева и охлаждения. При нагреве поглощается скрытая теплота, при охлаждении — выделяется.

При мощности луча 1200 Вт скорость нагрева верхней поверхности слоя порошка в диапазоне температур от 1400 до 2120 °С равна $3,6 \cdot 10^6$ °С/с, для нижней поверхности в диапазоне температур от 1400 до 1600 °С скорость нагрева равна $1 \cdot 10^6$ °С/с.

При мощности луча 900 Вт скорость нагрева верхней поверхности слоя порошка в диапазоне температур от 1200 до 1900 °С равна $3,5 \cdot 10^6$ °С/с, для нижней поверхности в диапазоне температур от 1200 до 1500 °С она равна $1,5 \cdot 10^6$ °С/с.

Скорость охлаждения в диапазоне температур от ликвидус до солидус при мощности электронного луча 1200 Вт для верхней границы слоя равна $1,4 \cdot 10^5$ °С/с, при мощности луча 900 Вт — $3 \cdot 10^5$ °С/с.

Время нагрева верхнего слоя порошка в результате воздействия электронного луча мощностью 900 Вт и 1200 Вт соответственно составляет $0,4 \cdot 10^{-3}$ и $0,2 \cdot 10^{-3}$ с, время кристаллизации — $0,67 \cdot 10^{-3}$ с и $0,65 \cdot 10^{-3}$ с. На рис. 5 видно, что скорости охлаждения верхнего и нижнего слоя порошка практически совпадают.

Для анализа динамики перемещения твердой границы задан малый интегральный шаг по времени, равный 2 мкс. Глубина фазового перехода после первого воздействия показана на рис. 6 (а — для луча мощностью 1200 Вт, б — 900 Вт).

На флажке указана температура поверхности соприкосновения порошка с уже сплав-

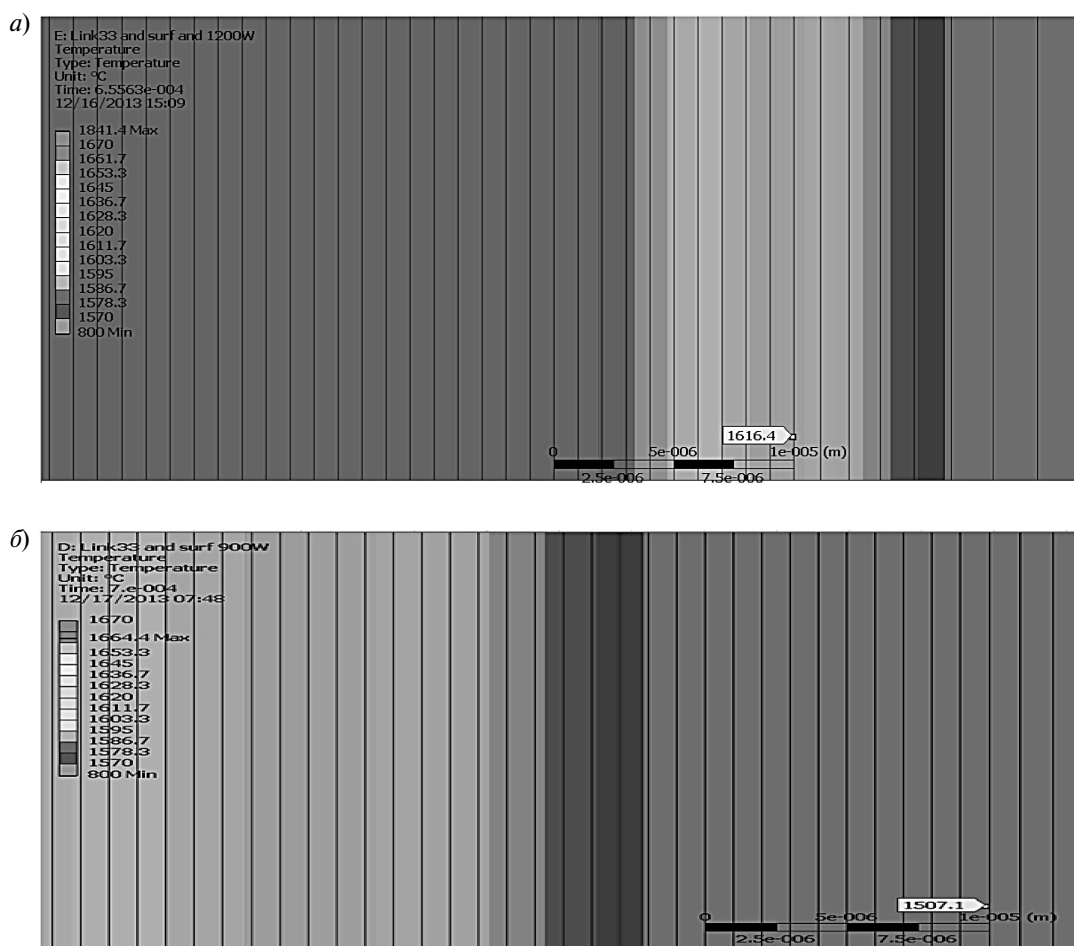


Рис. 6. Глубина фазового перехода после первого воздействия электронного луча

ленной структурой. Особенности тепловых процессов связаны с эффектами накопления тепла и движения твердо-жидкой границы под воздействием предыдущих периодических импульсов.

Таким образом, решение задачи Стефана позволяет определить важнейшие параметры процесса СИЭЛ (скорости нагрева и охлаждения слоя порошка, время плавления и кристаллизации порошка, перемещение твердо-жидкой границы в слое при электронно-лучевом воздействии). При оптимизации процесса синтеза изделия модель позволяет определить значения составляющих вектора варьируемых параметров (ток $I_{\text{л}}$ луча, диаметр d_0 пятна на мишени, скорость $V_{\text{ск}}$ сканирования луча, способ сканирования луча, шаг $s_{\text{см}}$ смещения луча при сканировании), которые обеспечивают надежное сплавление текущего слоя порошка с предыдущим, формируют необходимую структуру изделия.

Сложность физико-химических процессов, фазовые переходы при воздействии на металл электронным лучом определяют необходимость создания математической модели синтеза изделия.

В ходе процесса СИЭЛ важно размерное формирование синтезируемого слоя порошка,

обеспечение управляемого сплавления текущего слоя с предыдущим.

Математически процесс превращения порошка в жидкое состояние с последующей их кристаллизацией описывается двухфазной задачей Стефана.

Модель учитывает нелинейную зависимость теплофизических характеристик материала порошка от температуры. На графиках отражено влияние скрытой теплоты плавления на процесс нагрева и охлаждения.

Решение задачи Стефана позволило определить скорости нагрева и охлаждения, глубину проплавления, скорость движения перемещения твердо-жидкой границы вглубь изделия при мощности луча 900 и 1200 Вт.

Показана динамика изменения температур на верхней и нижней поверхностях слоя порошка в результате одиннадцати воздействий электронного луча мощностью 900 и 1200 Вт.

Моделирование в среде ANSYS APDL позволяет более гибко реагировать на вариации входных параметров: мощность луча, скорость сканирования, смещение луча и т. д.

Исследования КЭ-модели с мощностью 1200 и 900 Вт показали, что изменения мощности электронного луча до 900 Вт практически не гарантируют проплавления границы верхнего слоя порошка с изделием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А. Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3 (178). С. 148–155.
2. Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В. Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
3. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.
4. Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. August 2012. Vol. 26. № 8. P. 629–632.
5. Кондратьев С.Ю., Горьнин В.И., Попов В.О. Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.
6. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
7. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при ЛЮ материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
8. 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.



REFERENCES

1. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Iu., Kokorin V.N., Sizov N.A. Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 3 (178). S. 148–155. (rus.)
2. Rudskoy A.I., Kokorin V.N., Kondratyev S.Iu., Filimonov V.I., Kokorin A.V. Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)
3. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Iu., Kokorin V.N. Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskiykh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)
4. Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components. *Welding International*. August 2012. Vol. 26. № 8. P. 629–632. (rus.)
5. Kondratyev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)
6. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. Vychislitel'naya teploperedacha. M.: Yeditorial URSS, 2003. 784 s. (rus.)
7. Vedenov A.A., Gladush G.G. Fizicheskiye protsessy pri LO materialov. M.: Energoatomizdat, 1985. 208 s. (rus.)
8. Uglov A.A., Smurov I.Iu., Lashin A.M., Guskov A.G. Modelirovaniye teplofizicheskikh protsessov impulsnogo lazernogo vozdeystviya na metally. M.: Nauka, 1991. 288 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РУДСКОЙ Андрей Иванович — доктор технических наук ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: rector@spbstu.ru

СОКОЛОВ Юрий Алексеевич — кандидат технических наук главный конструктор ООО «НТК Электромеханика». 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: s5577@inbox.ru

КОПАЕВ Владимир Николаевич — ведущий инженер ООО «НТК Электромеханика». 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: vkopaev_ela@mail.ru

AUTHORS

RUDSKOI Andrei I. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: rector@spbstu.ru

SOKOLOV Yuri A. — «Electromechanica». 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: s5577@inbox.ru

КОПАЕВ Vladimir N. — «Electromechanica». 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: vkopaev_ela@mail.ru