



УДК 621.791.722:621.762.04

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СКАНИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ В ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА ПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

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

DETERMINATION OF TEMPERATURE FIELD AT SURFACE SCANNING BY ELECTRONIC BEAM SYNTHESIS TECHNOLOGIES OF POWDER PRODUCTS

На базе математической модели, описывающей процесс термической обработки, решена задача определения температурного поля при сканировании поверхности подложки электронным лучом. Моделирование выполнено на основе метода конечных элементов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; СКАНИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ; ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ; НАГРЕВ ПОДЛОЖКИ; ТЕПЛОПЕРЕНОС; ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ.

In present article on the basis of the mathematical model describing process of thermal treatment, the problem of definition of a temperature field is solved per scanning of surface's substrate by an electronic beam. Modelling is executed on the basis of finite element method.

MATHEMATICAL MODELING; SURFACE SCANNING; ELECTRONIC BEAM; SUBSTRATE HEAT; CONDUCTION; TEMPERATURE FIELD.

В порошковой металлургии интенсивно разрабатываются новые технологии, позволяющие шире использовать ее возможности по созданию материалов с повышенными эксплуатационными свойствами [1–3]. В то же время в промышленности широко применяются технологии, позволяющие формировать на поверхности различных материалов слои с заданной структурой и свойствами [4, 5]. Одна из наиболее перспективных технологий — это синтез изделий с помощью электронного луча (СИЭЛ), где в основу положена операция последовательного наплавления слоев из порошка различных сплавов, успешно зарекомендовавшая себя при изготовлении изделий авиационной и медицинской промышленности [6, 7]. Технологический процесс происходит в вакууме, что позволяет проводить синтез изделий из порошка химически активных металлов, таких, как титан, молибден, вольфрам и др.

В процессе электронно-лучевого синтеза изделия нагрев поверхности осуществляют две

операции: предварительный прогрев подложки; предварительный нагрев поверхности формируемого изделия перед плавлением.

Предварительный прогрев подложки, создающий необходимые начальные тепловые условия для проведения процесса синтеза, осуществляется сканированием электронного луча по поверхности. Для реализации данной операции необходимо выбрать способ сканирования и рассчитать параметры нагрева подложки электронным лучом до заданной температуры $T_{\text{зад}}$: ток луча, скорость сканирования луча, диаметр луча, шаг смещения луча, размеры сканируемой площади x_i и y_i (угол отклонения луча). Основная задача на данном этапе — достичь равномерного температурного поля по всей поверхности подложки. Одним из инструментов решения этой задачи служит выбор оптимального способа сканирования поверхности обработки.

Целью работы, о которой идет речь в статье, расчет температурного поля подложки и изделия в процессе СИЭЛ, базирующийся на нелиней-

ной математической модели, учитывающей зависимость теплофизических параметров от температуры.

Описание задачи. Нагрев подложки толщиной $S_{\text{под}}$, по поверхности которой перемещается электронный луч со скоростью $V_{\text{ск}}$, будем рассматривать в движущейся прямоугольной системе координат ($OXYZ$), помещенной в центр пятна нагрева (рис. 1).

Процесс распространения тепла вследствие действия сканирующего луча от кругового источника с мощностью q , перемещающегося по поверхности со скоростью $V_{\text{ск}}$, описывается следующим дифференциальным уравнением теплопроводности [8]:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - c(T) V_X \frac{\partial T}{\partial x} - c(T) V_y \frac{\partial T}{\partial y} - c(T) V_z \frac{\partial T}{\partial z} + q (V_x t, V_y t, V_z t), \quad (1)$$

где T — температура; V_x, V_y, V_z — проекции вектора скорости быстродвижущегося источника тепла по осям X, Y и Z ; $c(T)$ и $\lambda(T)$ — теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала; $q(V_x t, V_y t, V_z t)$ — удельная мощность движущегося источника тепла.

При решении уравнения (1) методом конечных элементов используется следующее граничное условие: заданный поток тепла q имеет вид

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = A(T) q (V_x t, V_y t, V_z t), \quad (2)$$

где $A(T)$ — доля поглощенной мощности от мощности пучка поступающей на поверхность мишени, или эффективный КПД нагрева; n — нормаль к поверхности.

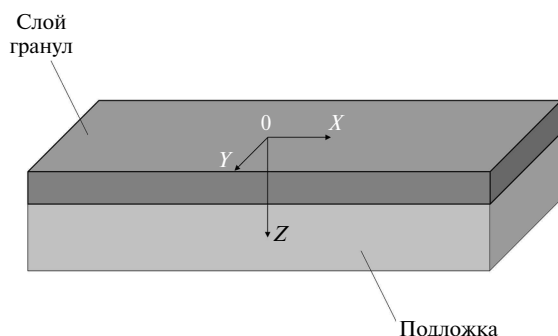


Рис. 1. Система координат при синтезе изделия

Важно отметить, что эффективный КПД нагрева — нелинейная функция, зависящая от температуры и материала. В ряде работ [9, 10] большое значение уделено расчету данного параметра. С увеличением температуры коэффициент поглощения чистой металлической поверхностью растет, а также существенно изменяется теплоемкость и теплопроводность металлов и сплавов, что необходимо учитывать в расчетах.

В работе [10] приведена следующая линейная зависимость от температуры для расчета поглощательной способности и определения доли поглощенной мощности:

$$A(T) = a + bT, \quad (3)$$

где a, b — коэффициенты.

К сожалению, зачастую аналитическое исследование ограничено рамками «линейности» задачи. Поставленная задача — нелинейная, требующая применения численных методов. Нелинейность обусловлена не только зависимостью теплофизических параметров материала от температуры, что само по себе значительно усложняет задачу, но и зависимостью источника тепла от времени (периодическое воздействие луча на формируемое изделие).

Поэтому для ее решения в работе используется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в среде программного комплекса ANSYS APDL. Расчет температурного поля формируемого изделия проводился в трехмерной постановке с применением системы конечно-элементного анализа ANSYS.

Построение модели расчета. Процедура проведения нестационарного теплового анализа состоит из четырех основных этапов: создания модели; задания граничных условий и тепловых нагрузок; решения задачи на основе уравнения теплопроводности; анализа результатов.

Процедура создания модели включает задание типа элементов, свойств материала и геометрии модели. Далее выполняется наложение сетки на модель (создание конечно-элементной модели) и задаются граничные и начальные условия. Поскольку в начальный момент времени температура модели совпадает с температурой окружающей среды, то последнюю и принимаем в качестве начальной температуры для всех узлов модели.

Нелинейные зависимости теплопроводности, плотности и теплоемкости титана приведены на рис. 2–4. Для температур до 1100°C характерен

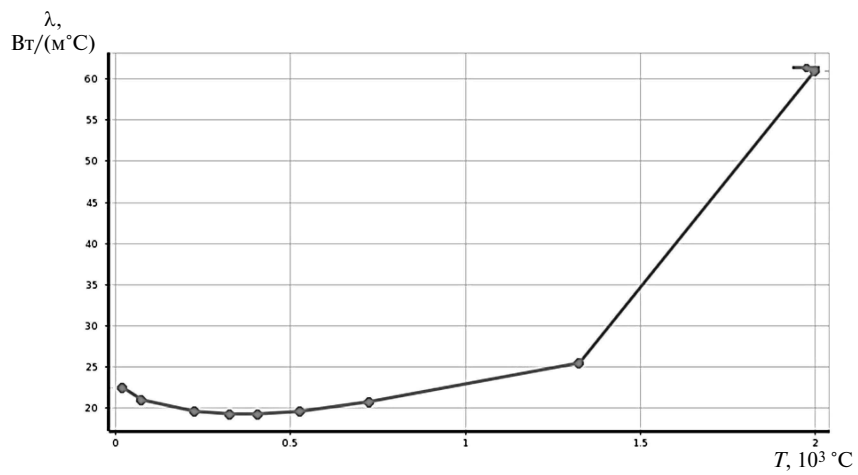


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности титана от температуры

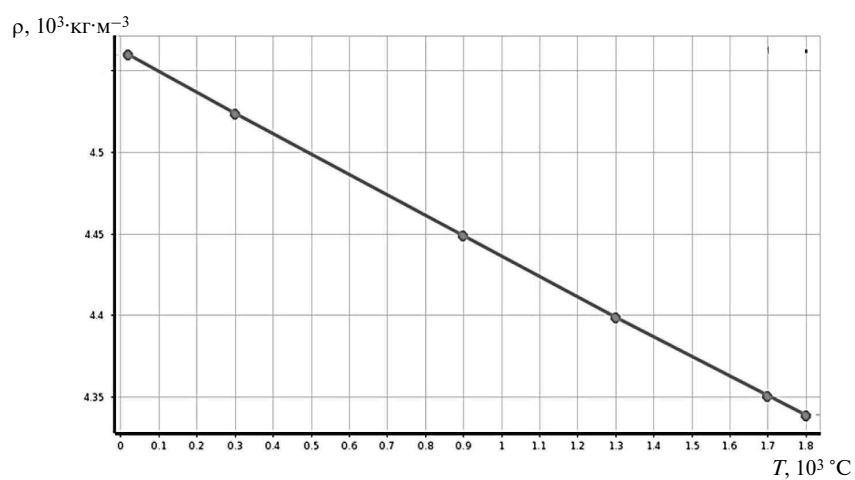


Рис. 3. Зависимость плотности титана от температуры

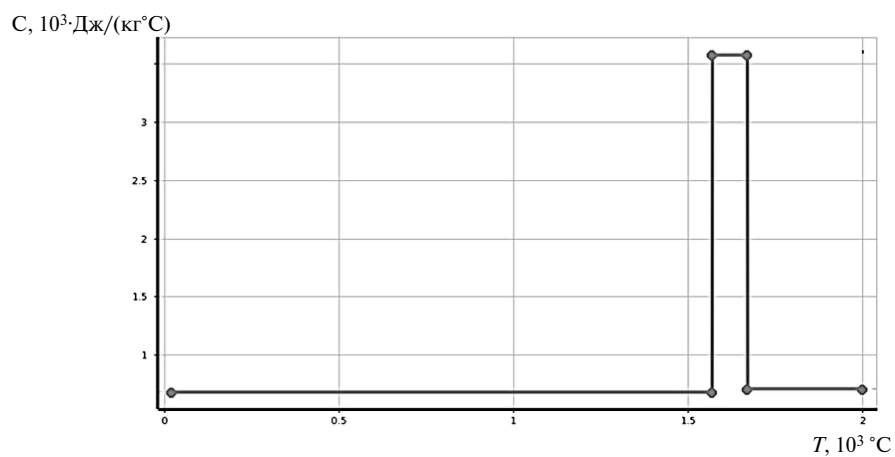


Рис. 4. Зависимость теплоемкости титана от температуры

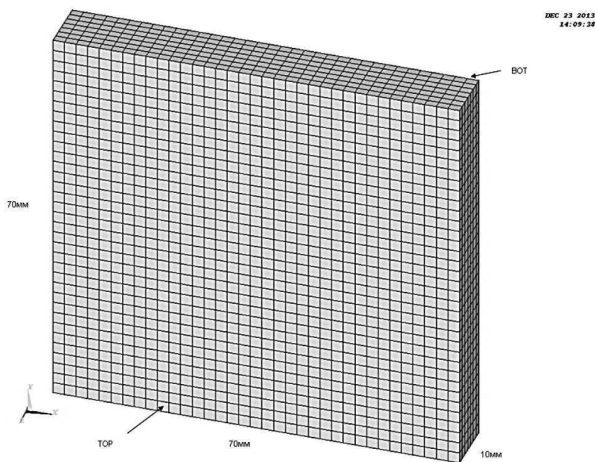


Рис. 5. Конечно-элементная модель

участок с малыми значениями коэффициента теплопроводности, что соответствует большей скорости нагрева. При более высоких температурах наступает резкое нелинейное увеличение коэффициента теплопроводности.

Значительные изменения теплопроводности $\lambda(T)$, плотности $\rho(T)$, теплоемкости $c(T)$ показывают, что система уравнений описывающая процесс электронно-лучевого синтеза, существенно нелинейная.

Конечно-элементная модель с нижней (BOT) и верхней (TOP) поверхностями представлена на рис. 5. Электронный луч взаимодействует с верхней поверхностью TOP.

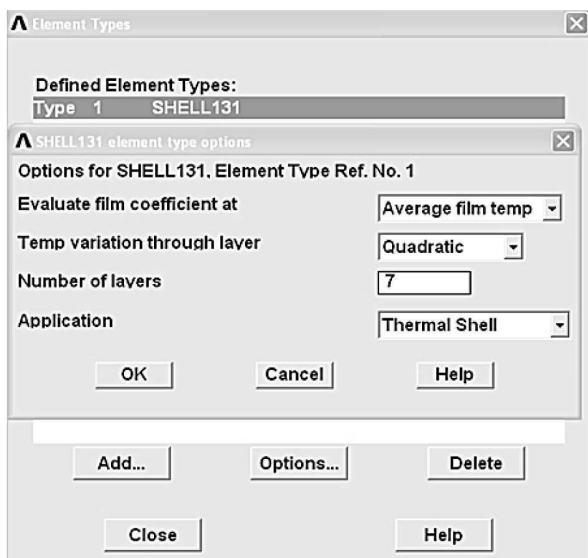


Рис. 6. Описание свойств элемента SHELL131

Расчетная модель для определения температурного поля формируемого изделия создавалась с использованием многослойных оболочечных конечных элементов SHELL131 с 15 степенью свободы (TEMPBOT, TEMP2, ... TEMP14, TEMPTOP).

В качестве базового принимаем элемента SHELL131 — четырехугольный оболочечный элемент, который используется в трехмерных моделях. Описание свойств элемента SHELL131 приведено на рис. 6: изменение температуры в слое — по квадратичной зависимости, количество слоев равно 7.

Каждый из слоев включает три точки, причем одна точка одновременно общая для двух соседних слоев. Нумерация точек начинается от нижней поверхности BOT (первая точка) к верхней поверхности TOP (15 точка).

Принимаем, что с верхней и нижней поверхностей подложки (изделия) осуществляется радиационный теплоотвод. Плотность электронного излучения задавалась равномерным распределением по пятну нагрева радиусом r_0 ($r_0 = d_0/2$). Поскольку с поверхности подложки тепло теряется радиационным излучением, то имеем задачу с нелинейным граничным условием.

Исходные данные модели. Режим обработки поверхности подложки электронным лучом определяется током луча, скоростью сканирования луча, диаметром пятна, геометрическими размерами изделия.

К исходным параметрам модели относятся: сторона подложки $a = 70$ мм; диаметр луча $d_0 = 1$ мм; скорость сканирования $V_{ск} = 9060$ мм/с; время операции $t_{опер} = 35$ с; ток луча $I_{л} = 30$ мА; ускоряющее напряжение $U_y = 60$ кВ; смещение луча $S_{см} = 1$ мм; время сканирования участка 1×1 мм при прямоугольном характере воздействия, с; площадь перекрытия лучом в секунду $A_{п} = V_{ск}d_0 = 9060$ мм²/с; период $t_{пер} = a^2/(V_{ск}d_0k_{см}) = 1,081678$ с ($k_{см}$ — коэффициент перекрытия); частота $f = 0,92449$ Гц; число проходов $N = 32$; подведенное тепло $Q_j = I_{л}U_y t_{опер} = 63000$ Дж; плотность подведенного тепла к подложке или изделию за время процесса $J_{опер} = Q_j/a^2 = 12,85$ Дж/мм².

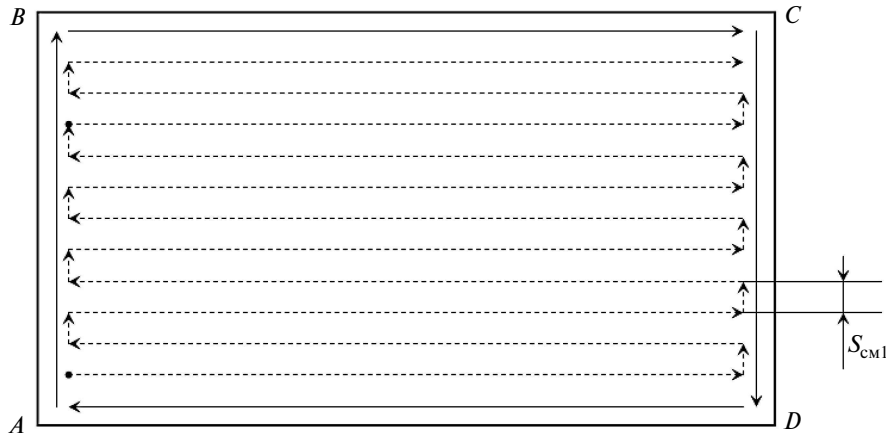


Рис. 7. Способ сканирования электронного луча по поверхности

Источник тепла перемещается по подложке со скоростью $V_{ск}$. Способ сканирования электронного луча по поверхности показан на рис. 7.

Это эквивалентно приложению периодической тепловой нагрузки с длительностью импульса $d_{пятна}/V_{ск}$ (при скорости сканирования луча равной 9060 мм/с и диаметре пятна $d_{пятна} = 1$ мм длительность импульса составляет $1,1 \cdot 10^{-4}$ с).

Плотность теплового потока также является поверхностным граничным условием. Модель использует данную тепловую нагрузку, так как известна величина тепла, проходящего через поверхность (тепловой поток, приходящийся на единичную площадку):

$$HFLU = Q/A_{эя} = I_{л} U_{эя} / a_{эя}^2 = 1800 / 0,002^2 = 0,45 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2, \quad (4)$$

где $A_{эя}$ — площадь элементарной ячейки; $a_{эя}$ — сторона квадратной элементарной ячейки.

Положительная величина плотности теплового потока означает, что тепло поглощается элементом. Стартовая позиция электронного луча показана темным цветом на рис. 8.

Электронный луч стартует с элемента № 1 и далее перемещается слева направо по узлам (нумерация элементов пропорционально увеличивается). В крайнем правом узле строки следует переход луча вверх на один элемент (по столбцу) и перемещение луча по элементам справа налево по второй строке. Далее переход вверх на один элемент и повторение приведенных операций.

Таким образом, сканируется вся поверхность до последнего элемента.

Результаты расчета. Температурное поле на верхней поверхности во время второго прохода электронного луча над элементом, содержащим узел 668, который находится в центре исследуемой поверхности, показано на рис. 9.

Рассмотрим динамику изменения температуры в восьми верхних степенях свободы в узле 668 (точки узла №8, ... №15), которые наиболее сильно реагируют на воздействие электронного луча (рис. 10).

Из рис. 10 видно, что температура в узле на верхней поверхности (ТТОР_668) имеет зависимость от предистории (прохождения электронного луча рядом «до»), от настоящего (прохождение электронного луча «над») и практически не зависит от будущего (прохождение электронного луча «после»).

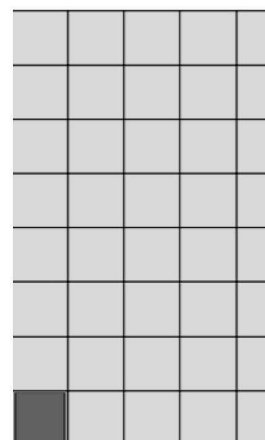


Рис. 8. Стартовая позиция электронного луча

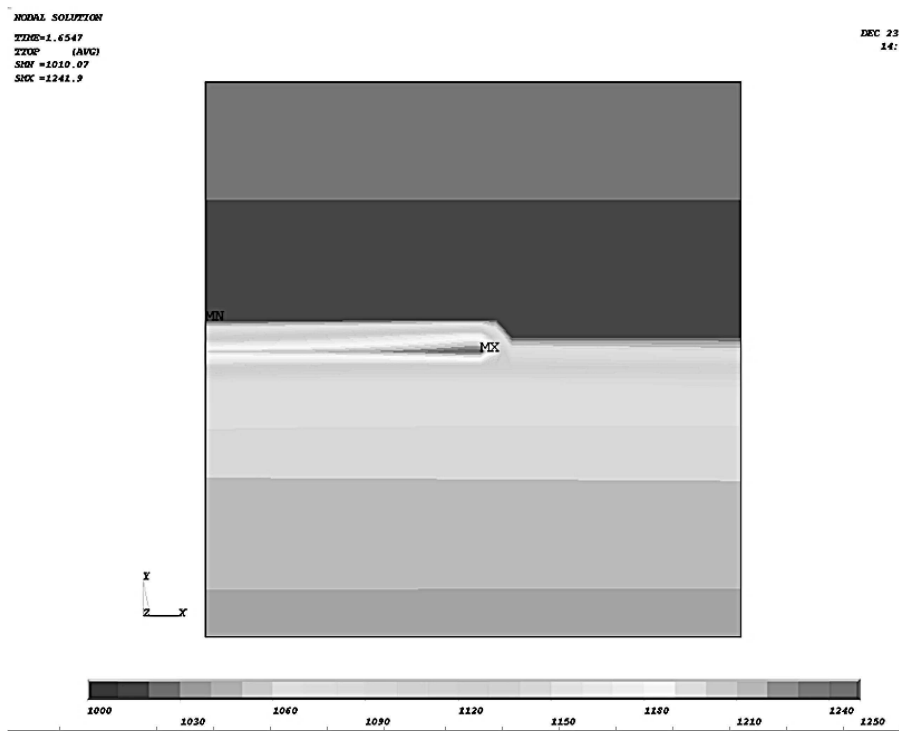


Рис. 9. Температурное поле на верхней поверхности во время второго прохода электронного луча над узлом 668

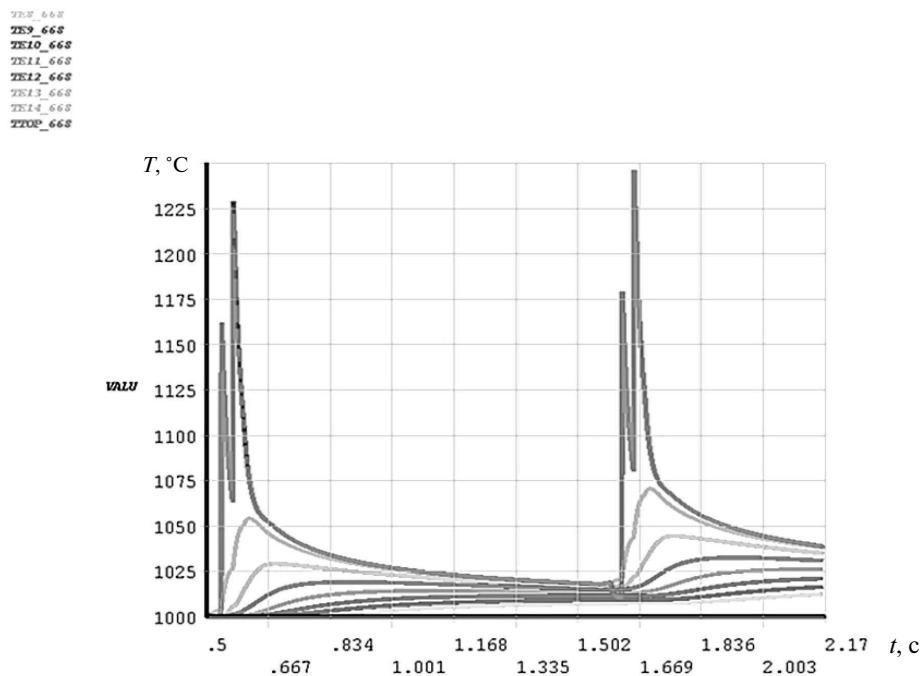


Рис. 10. Динамика изменения температуры в 8-ми верхних степенях свободы (температуры) в узле 668 исследуемой модели

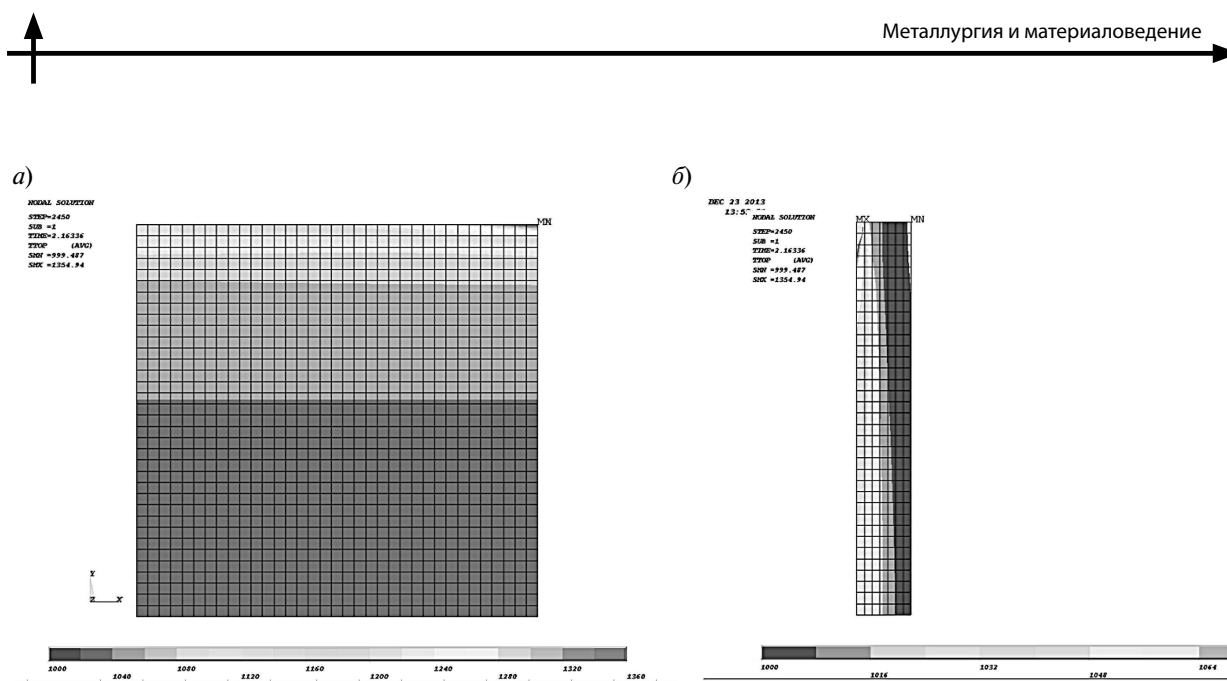


Рис. 11. Температурное поле верхней (а) и боковой (б) поверхности формируемого изделия после двух циклов сканирования

Приращение температуры за один цикл сканирования электронным лучом поверхности размером 70×70 мм составляет примерно 20°C , что соответствует экспериментальным данным.

Температурное поле верхней и боковой поверхности после двух циклов сканирования электронным лучом показано на рис. 11.

Подведем итоги.

Показана важность операции нагрева подложки для технологии послойного синтеза изделий из порошка различных сплавов, включая тугоплавкие.

Режим термической обработки поверхности электронным лучом должен обеспечивать условия для удержания гранул на поверхности подложки и формируемого изделия.

Для решения нелинейной модели, описывающей нагрев подложки электронным лучом, используется метод конечных элементов, который позволяет учитывать, во-первых, геометри-

ческую форму изделия, во-вторых, зависимость теплофизических параметров от температуры.

Проведенный расчет температурного поля позволяет качественно описывать процесс электронно-лучевого нагрева в вакуумной среде с учетом передачи тепла посредством излучения.

Модель адекватно отражает связь между действием электронного луча и распределением температурного поля.

Анализ результатов показывает, что для качественной оценки температурного поля можно использовать многослойные элементы SHELL131, что позволяет оперативно рассчитать температурное поле для многослойных конструкций.

Модель учитывает историю предыдущих периодических тепловых воздействий электронного луча. Нестационарный тепловой расчет позволяет определить температурное поле, изменяющееся во времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

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 ис-

пользовании 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. Инженер-

ный 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. **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.** Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting // *Acta Materialia*. 2010. № 58. P. 1887–1894.

7. **Biamino S., Penna A., Ackelid U., Sabbadini S., Tassa O., Fino P., Pavese M., Gennaro P., Badini C.** Electron beam melting of Ti48Al2Cr2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation // *Intermetallics*. 2011. № 19. P. 776–781.

8. **Самарский А.А., Вабишевич П.Н.** Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

9. **Веденов А.А., Гладуш Г.Г.** Физические процессы при ЛО материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.

10. **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.Yu., 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.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya. *Naukoymkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

3. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., 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.

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. **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. **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.** Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting // *Acta Materialia*. 2010. № 58. S. 1887–1894. (rus.)

7. **Biamino S., Penna A., Ackelid U., Sabbadini S., Tassa O., Fino P., Pavese M., Gennaro P., Badini C.** Electron beam melting of Ti48Al2Cr2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation. *Intermetallics*. 2011. № 19. P. 776–781. (rus.)

8. **Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N.** Vychislitel'naya teploperedacha. М.: Yeditorial URSS, 2003. 784 s. (rus.)

9. **Vedenov A.A., Gladush G.G.** Fizicheskiye protsessy pri LO materialov. М.: Energoatomizdat, 1985. 208 s. (rus.)

10. **Uglov A.A., Smurov I.Yu., Lashin A.M., Guskov A.G.** Modelirovaniye teplofizicheskiykh protsessov impul'snogo lazernogo vozdeystviya na metally. М.: Nauka, 1991. 288 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РУДСКОЙ Андрей Иванович — доктор технических наук ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, член-корреспондент РАН; 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 Andrey I. — 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: rector@spbstu.ru

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

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