

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОКУСАТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2007 С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров, С.А. Сорокина

Самарский государственный аэрокосмический университет

Наиболее эффективные режимы обработки определяются только при решении обратной задачи теплопроводности, которая заключается в определении распределения плотности мощности воздействующего энергетического потока по заданным значениям температур в зоне термического влияния материалов. В рамках данной работы рассматривается нелинейная задача теплопроводности при нагреве технологического объекта полосовым поверхностным энергетическим источником. Применение разработанной методики расчета распределения мощности позволяет создать более равномерное температурное поле по длине движущегося полосового источника.

Введение

Преимущества применения лазеров в технологических операциях обработки материалов определяются возможностью бесконтактного, строго дозированного интенсивного подвода энергии на поверхность изделия [1]. Основной причиной, ограничивающей применение лазерной технологии в машиностроении, является несоответствие распределения плотности теплового потока на поверхности заданному изменению состояния технологических объектов. В связи с этим, можно утверждать, что наиболее целесообразным при реализации технологических процессов лазерной обработки является выполнение условия формирования определенного пространственного профиля интенсивности излучения в заданной области на поверхности детали, что достигается только при использовании соответствующих оптических систем. Создать требуемое пространственное распределение мощности энергетического потока позволяет применение дифракционных оптических элементов – фокусаторов излучения [2-4]. Фокусатор излучения в виде отражающей пластины предназначен для обработки деталей лазерным излучением и выполняется с возможностью перемещения (поворота, вращения, колебательного движения и т.д.). В этом случае при разработке технологических процессов лазерной обработки материалов необходимо учитывать специфику создания заданного температурного поля в технологических объектах. Наиболее эффективные режимы обработки определя-

ются только при решении обратной задачи теплопроводности, которая заключается в определении распределения плотности мощности воздействующего энергетического потока по заданным значениям температур в зоне термического влияния материалов. Целью данной работы является разработка методики расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения для формирования требуемого энергетического воздействия на технологические объекты.

Расчет пространственного распределения мощности лазерного излучения

При обработке деталей лазерным излучением имеют место большие градиенты температур, происходят изменения оптических и теплофизических свойств материалов [5, 6]. Численное интегрирование дифференциального уравнения теплопроводности проводится с учетом зависимостей от температуры теплофизических характеристик обрабатываемых материалов (теплопроводности, объемной теплоемкости, поверхностной теплоотдачи) и эффективного коэффициента поверхностного поглощения лазерного излучения.

В рамках данной работы рассматривается нелинейная задача теплопроводности при нагреве технологического объекта полосовым поверхностным энергетическим источником для выравнивания значений максимальных температур в поперечных сечениях зоны термического влияния при обработке материалов. Расчет проводится с учетом реальной геомет-

рической формы обрабатываемого объекта, который перемещается с постоянной линейной скоростью v вдоль Oy в системе координат (x, y, z) , помещенной в центр энергетического источника мощностью Q . Для решения задачи принимаются следующие допущения: энергетический источник с заданными геометрией и пространственным распределением мощности является поверхностным и занимает область ϕ на поверхности исследуемого объекта. На остальной части поверхности задаются нелинейные условия теплообмена с окружающей средой. Для преобразования нелинейных уравнений теплопроводности используется метод конечного контрольного объема. Основными этапами численного решения задачи являются: создание массива узлов; получение дискретных аналогов дифференциального уравнения теплопроводности; составление и приближенное решение системы алгебраических уравнений с неизвестными значениями температуры в каждом узле в рассматриваемый момент времени.

Получению однозначного решения полученной системы уравнений соответствует условно-корректная постановка задачи, заключающаяся в условии постоянства во времени плотности воздействующего энергетического потока. Пространственное распределение мощности $q(x, y)$ задаем в виде уравнения для полосового энергетического источника и определяется выражением:

$$q = \begin{cases} A(T)q(\xi, \eta) & \text{при } \xi \in [-a/2; a/2] \text{ и } \eta \in [-b/2; b/2]; \\ 0 & \text{при } \xi \notin [-a/2; a/2] \text{ или } \eta \notin [-b/2; b/2], \end{cases} \quad (1)$$

где $A(T)$ – эффективный коэффициент поверхностного поглощения; где a, b – соответственно длина и ширина области ϕ , ограниченной прямыми $\xi = -a/2; \xi = a/2; \eta = -b/2; \eta = b/2$; $\xi = x \cos \varphi_1 - y \sin \varphi_1; \eta = x \sin \varphi_1 + y \cos \varphi_1$; φ_1 – угол поворота светового пятна в фокальной плоскости.

$q(\xi, \eta)$ представляем в виде уравнения:

$$q(\xi, \eta) = q_0(a_n \xi^{-2n} + a_{n-1} \xi^{-2(n-1)} + \dots + a_2 \xi^{-4} + a_1 \xi^{-2} + a_0) \cdot (b_n \eta^{-2m} + b_{n-1} \eta^{-2(m-1)} + \dots + b_2 \eta^{-4} + b_1 \eta^{-2} + b_0) v(\xi, \eta), \quad (2)$$

где q_0 – плотность мощности в центре

энергетического источника; $\bar{\xi} = \xi / 10^{-3} \text{ м}$, $\bar{\eta} = \eta / 10^{-3} \text{ м}$ – безразмерные координаты; $a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1, a_0$; $b_n, b_{n-1}, \dots, b_2, b_1, b_0$ – коэффициенты полиномов (степенных многочленов); n_1, n_2 – целые числа; $v(\xi, \eta)$ – дополнительная функция.

Расчет пространственного распределения мощности лазерного излучения для формирования требуемого энергетического воздействия на технологические объекты проводится в следующей последовательности:

1. Задается допустимая максимальная температура T_{\max} на поверхности исследуемого объекта.

2. Вводится первоначальное значение распределения мощности воздействующего энергетического источника

$$q(x, y) = q(x, y)_1.$$

3. Определяется значение скорости перемещения v энергетического источника, при которой максимальная температура на поверхности технологического объекта не превышает T_{\max} :

$$\max[T(x, y, z)|_{z=0}]_y \leq T_{\max}.$$

4. Вводятся значения требуемых максимальных температур на заданной глубине $z = h_\delta$ технологического объекта вдоль линии перемещения энергетического источника $T_{\text{Эmax}}(x)|_{z=h_\delta} = [T_{\max}(x, y, z)|_{z=h_\delta}]_y$

5. Проводится расчет значений максимальных температур $\max[T(x, y, z)|_{z=h_\delta}]_y$ на заданной глубине $z = h_\delta$ технологического объекта по ширине зоны термического влияния для введенного значения распределения мощности воздействующего энергетического источника $q(x, y)_1$.

6. Определяется среднеквадратичное отклонение ε_T расчетных температур от требуемых:

$$\varepsilon_T = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\bar{N}} \{ \max[T(x, y, z)|_{z=h_\delta}]_y - T_{\text{Эmax}}(x)|_{z=h_\delta} \}^2}{\bar{N}(\bar{N}-1)}}, \quad (3)$$

где \bar{N} – количество точек исследуемого объекта, в которых заданы дискретные значения температур T_Σ .

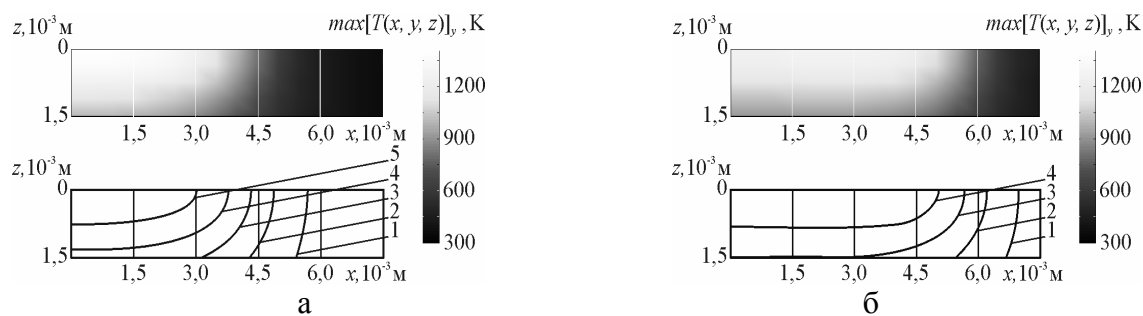


Рис. 1. Результаты расчета значений максимальных температур $max[T(x, y, z)]_y$ вдоль линии перемещения энергетического источника мощностью $Q = 950$ Вт, движущегося с постоянной скоростью $v = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м/с по поверхности технологического объекта из хромоникельмолибденовой стали 40ХНМА:

$\bar{k} = 1$ (а); $\bar{k} = 10$ (б). T , К: 1 – 600; 2 – 750; 3 – 900; 4 – 1050; 5 – 1200

7. Сравнение среднеквадратичного отклонения ε_T с заданным допустимым значением ε_δ .

8. Осуществляется коррекция распределения мощности потока энергии на поверхности технологического объекта $q(x, y) = q(x, y)_{\bar{k}}$, где \bar{k} – номер итерации. Выбираются значения $q(x, y)$, соответствующие условию $\varepsilon_T \leq \varepsilon_\delta$.

9. Проводится коррекция пространственно-временных характеристик лазерного воздействия (пространственного распределения мощности $q(x, y)$, а также скорости перемещения v энергетического источника) с учетом условий достижения благоприятных термических циклов для получения заданных свойств материала технологического объекта [7].

В подвижной системе координат скорости нагрева и охлаждения определяются уравнением:

$$v_n; v_{охл} = \frac{v [T(x, y + \Delta y, z) - T(x, y, z)]}{\Delta y}, \quad (4)$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – степень дискретизации пространственной разностной сетки.

В результате расчета определено пространственное распределение мощности лазерного излучения $q(x, y)$ для формирования требуемого энергетического воздействия на детали из хромоникельмолибденовой стали 40ХНМА. На рис. представлены результаты расчета значений максимальных температур $max[T(x, y, z)]_y$ вдоль линии перемещения энергетического источника мощностью $Q = 950$ Вт, движущегося с постоянной скоростью $v = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м/с по поверхности технологического объекта из хромоникельмолибденовой

стали 40ХНМА

Результаты расчета и экспериментальных исследований

Визуальное наблюдение процессов изменения температурного поля проводилось с помощью системы бесконтактной диагностики, предназначенной для регистрации температурных полей, которая содержит ИК-радиометр (тепловизор “Радуга”) и устройство ввода-вывода видеоизображения на персональный компьютер. Для устранения влияния диффузно-рассеянного лазерного излучения использовались германиевый и сапфировый фильтры, ограничивающие спектральный диапазон пропускания полосой $d\lambda = (2 \dots 7) \cdot 10^{-3}$ м.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что расчетные значения температур в исследуемых диапазонах скорости ($v = (2 \dots 30) \cdot 10^{-3}$ м/с), мощности ($Q = (0,2 \dots 1) \cdot 10^3$ Вт) для выбранного класса материалов и геометрических параметров энергетических источников достаточно точно (погрешность $\delta_T \leq 10 \dots 15\%$) согласуются с результатами экспериментальных исследований. Изменение параметров режима обработки приводит к изменению температуры материала.

Использование разработанной методики расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения позволяет создать более равномерное температурное поле по длине движущегося полосового ис-

точника, формируемого фокусаторами излучения. Применение фокусаторов излучения для создания требуемого энергетического воздействия на технологические объекты предоставляет возможность увеличить ширину зоны обработки без перегрева ее центральных участков.

Заключение

В результате математического моделирования тепловых процессов и использования методов решения обратной задачи теплопроводности разработана методика расчета пространственного распределения мощности, проведен расчет температуры поверхности обрабатываемого материала в зоне нагрева.

Установлено, что учет изменения формы светового пятна и распределения интенсивности приводит к существенным отличиям в распределении температурных полей. Пространственное перераспределение мощности движущихся энергетических источников позволяет регулировать распределение температуры в зоне обработки.

Применение методики расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения позволяет создать более равномерное температурное поле по длине полосового источника. Достигается выравнивание значений максимальных температур вдоль линии перемещения энергетического источника в центре и на периферии зоны термического влияния. Для создания требуемого энергетического

воздействия на технологические объекты целесообразно применять оптические системы на основе фокусаторов излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of laser processing / ed. J.F. Ready. Orlando: Laser Institute of America; Magnolia publ. Inc., 2001.
2. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2000.
3. *Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Клочков С.Ю.* Формирование требуемого энергетического воздействия при лазерной обработке материалов с применением фокусаторов излучения // Компьютерная оптика. Самара-Москва, 2005. Вып. 28.
4. *Мурзин С.П.* Оптические устройства формирования лазерных потоков // Вестник Самарского государственного университета. Самара, 2006. № 3(43).
5. *Григорьянц А.Г.* Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989.
6. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 6. Основы лазерного термоупрочнения сплавов: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1988.
7. *Гуреев Д.М., Камашев А.В., Ямщиков С.В.* Механизмы фазовых превращений в железе и сталях при лазерном нагреве. Самара: Изд-во "Самарский университет", 1999.

MODELING OF THERMAL PROCESSES AT LASER MATERIALS TREATMENT WITH APPLICATION RADIATIONS FOCUSATORS

© 2007 S.P. Murzin, E.L. Osetrov, S.A. Sorokina

Samara State Aerospace University

The most effective modes of processing are defined only at the decision of a return task of heat conductivity which consists in definition of capacity density distribution of an influencing power stream on preset values of temperatures in a zone of thermal influence of materials. Within the framework nonlinear task of heat conductivity at heating technological object by a strip superficial power source is considered. Application of the developed design method of capacity distribution allows to create more uniform moving strip source temperature field on length.