

РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБУЕМОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2005 С.П. Мурзин, С.Ю. Ключков

Самарский государственный аэрокосмический университет

Наиболее эффективные режимы обработки определяются только при решении обратной задачи теплопроводности, поэтому разработка математических моделей тепловых процессов при лазерной обработке требует новых подходов, учитывающих специфику создания требуемого энергетического воздействия на технологические объекты. Разработана методика расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения, применение которой позволяет формировать более равномерное температурное поле по длине движущегося полосового энергетического источника. Для создания требуемого энергетического воздействия на технологические объекты целесообразно применять оптические системы на основе динамических фокусаторов излучения.

Теоретическое и экспериментальное изучение тепловых процессов в зоне энергетического воздействия позволяет выделить общие закономерности и определить основные направления совершенствования технологических процессов. Приближенные аналитические решения известных систем дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями могут использоваться в относительно простых схематизированных моделях для проведения качественного и приближенного количественного анализа тепловых явлений. Возрастающие возможности вычислительных средств обуславливают широкое применение численных методов решения нестационарных трехмерных задач нелинейной теплопроводности. Известно, что наиболее эффективные режимы обработки определяются только при решении обратной задачи теплопроводности [1]. Поэтому разработка математических моделей тепловых процессов при лазерной обработке требует новых подходов, учитывающих специфику создания требуемого энергетического воздействия на технологические объекты.

При обработке деталей лазерным излучением характерны большие градиенты температур, смещение точек структурных и фазовых переходов, изменение в процессе обработки оптических и теплофизических свойств материалов [2]. Численное интегри-

рование дифференциального уравнения теплопроводности проводится с учетом зависимостей от температуры теплофизических характеристик обрабатываемых материалов (теплопроводности, объемной теплоемкости, а также полной поверхностной теплоотдачи) и эффективного коэффициента поверхностного поглощения лазерного излучения.

Рассматривается нелинейная задача теплопроводности при нагреве технологического объекта полосовым поверхностным энергетическим источником. Расчет проводится с учетом реальной геометрической формы технологического объекта, который перемещается либо с постоянной линейной скоростью v в положительном направлении оси Oy , либо с постоянной угловой скоростью ω в положительном направлении оси $O\Phi$ соответственно в системах координат (x, y, z) или (ρ, Φ, ζ) , помещенных в центр энергетического источника мощностью Q . Принимается допущение: 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 в частных про-

изводных в систему линейных алгебраических уравнений относительно температуры в дискретных точках исследуемого объекта используется метод конечного контрольного объема [3]. Основными этапами численного решения задачи являются дискретизация расчетной области – создание массива узлов; получение дискретных аналогов дифференциального уравнения теплопроводности методом контрольного объема; составление и приближенное решение системы алгебраических уравнений с неизвестными значениями температуры в каждом узле в рассматриваемый момент времени.

В работе [4] показано, что температура во всех узлах расчетной области в моменты времени, следующие с интервалом Δt_m , равна:

$$T_{i,j,k}^{m+1} = \left\{ \sum_{g=1}^{S^*} \left[a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i-1,j,k \\ i,j-1,k \\ i,j,k-1 \end{smallmatrix} \right\}} T_{\left\{ \begin{smallmatrix} i-1,j,k \\ i,j-1,k \\ i,j,k-1 \end{smallmatrix} \right\}}^m + a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i+1,j,k \\ i,j+1,k \\ i,j,k+1 \end{smallmatrix} \right\}} T_{\left\{ \begin{smallmatrix} i+1,j,k \\ i,j+1,k \\ i,j,k+1 \end{smallmatrix} \right\}}^m \right] + \Delta V_{i,j,k} \left(S_{C_{i,j,k}} + T_{i,j,k}^m c_V (T_{i,j,k}^m) / \Delta t_m \right) \right\} / \left\{ \sum_{g=1}^{S^*} \left[a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i-1,j,k \\ i,j-1,k \\ i,j,k-1 \end{smallmatrix} \right\}} + a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i+1,j,k \\ i,j+1,k \\ i,j,k+1 \end{smallmatrix} \right\}} \right] + \Delta V_{i,j,k} c_V (T_{i,j,k}^m) / \Delta t_m \right\}, \quad (1)$$

где $T_{i,j,k}$ – температура, определяемая в узлах пространственной сетки;

$\left\{ \begin{smallmatrix} i \\ j \\ k \end{smallmatrix} \right\} = 1, 2, \dots, \left\{ \begin{smallmatrix} I \\ J \\ K \end{smallmatrix} \right\}$ – размерность индексного пространственного массива; S^* – размер тела; g – номер орта; m и $m + 1$ – индексы двух последовательных моментов времени, промежуток между которыми равен Δt_m ;

$S_{C_{i,j,k}}$ и $S_{P_{i,j,k}}$ – результат линеаризации воздействующего энергетического источника в виде $S_{CP_{i,j,k}} = S_{C_{i,j,k}} + S_{P_{i,j,k}} T_{i,j,k}$;

$\Delta V_{i,j,k}$ – контрольный объем;

$a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i-1,j,k \\ i,j-1,k \\ i,j,k-1 \end{smallmatrix} \right\}}$, $a_{\left\{ \begin{smallmatrix} i+1,j,k \\ i,j+1,k \\ i,j,k+1 \end{smallmatrix} \right\}}$ – проводимости между

узловой точкой и соответствующими ей точками семиточечного крестообразного шаблона, при численном решении системы дифференциальных уравнений теплопроводности в прямоугольной системе координат определяются следующими выражениями

$$\left. \begin{aligned} a_{i-1,j,k} &= k_{i-1,j,k} \Delta y \Delta z / (\delta x)_{i-1,j,k} \\ a_{i+1,j,k} &= k_{i+1,j,k} \Delta y \Delta z / (\delta x)_{i+1,j,k} \\ a_{i,j-1,k} &= k_{i,j-1,k} \Delta x \Delta z / (\delta y)_{i,j-1,k} \\ a_{i,j+1,k} &= k_{i,j+1,k} \Delta x \Delta z / (\delta y)_{i,j+1,k} \\ a_{i,j,k-1} &= k_{i,j,k-1} \Delta x \Delta y / (\delta z)_{i,j,k-1} \\ a_{i,j,k+1} &= k_{i,j,k+1} \Delta x \Delta y / (\delta z)_{i,j,k+1} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $k_{\left\{ \begin{smallmatrix} i-1,j,k \\ i,j-1,k \\ i,j,k-1 \end{smallmatrix} \right\}}$, $k_{\left\{ \begin{smallmatrix} i+1,j,k \\ i,j+1,k \\ i,j,k+1 \end{smallmatrix} \right\}}$ – коэффициенты теплопроводности на гранях контрольного объема $\Delta V_{i,j,k} = \Delta x \Delta y \Delta z$; $(\delta x)_{i-1,j,k}$, $(\delta x)_{i+1,j,k}$, $(\delta y)_{i,j-1,k}$, $(\delta y)_{i,j+1,k}$, $(\delta z)_{i,j,k-1}$, $(\delta z)_{i,j,k+1}$ – расстояния между узловой точкой и соответствующими точками семиточечного крестообразного шаблона.

При решении системы дифференциальных уравнений теплопроводности в цилиндрической системе координат проводимости определяются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} a_{i-1,j,k} &= k_{i-1,j,k} \rho_{i-1,j,k} \Delta \Phi \Delta \zeta / (\delta \rho)_{i-1,j,k} \\ a_{i+1,j,k} &= k_{i+1,j,k} \rho_{i+1,j,k} \Delta \Phi \Delta \zeta / (\delta \rho)_{i+1,j,k} \\ a_{i,j-1,k} &= k_{i,j-1,k} \Delta \rho \Delta \zeta / \rho_{i,j-1,k} (\delta \Phi)_{i,j-1,k} \\ a_{i,j+1,k} &= k_{i,j+1,k} \Delta \rho \Delta \zeta / \rho_{i,j+1,k} (\delta \Phi)_{i,j+1,k} \\ a_{i,j,k-1} &= k_{i,j,k-1} \rho_{i,j,k-1} \Delta \Phi \Delta \rho / (\delta \zeta)_{i,j,k-1} \\ a_{i,j,k+1} &= k_{i,j,k+1} \rho_{i,j,k+1} \Delta \Phi \Delta \rho / (\delta \zeta)_{i,j,k+1} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Задача нахождения распределения мощности воздействующего энергетического источника, входящего в граничные условия уравнения теплопроводности второго рода, не всегда является корректной, поскольку ее решение не всегда однозначно и устойчиво. Для некорректных задач известен алгоритм [5], основанный на сужении области возмож-

ных решений путем использования дополнительных априорных сведений относительно искомой функции и получивший название метода сведения к условно корректной задаче. Наиболее широко распространенным способом решения таких задач является метод подбора, подробно описанный в работе [5], заключающийся в решении прямых задач с итерациями на каждом шаге. Условием окончания итераций является совпадение с требуемой точностью заданного и полученного на \bar{k} -ой итерации температурных полей, определяемых дискретными значениями температур в точках исследуемого объекта.

Условно-корректной постановке граничной обратной задачи теплопроводности удовлетворяют условие постоянства во времени плотности теплового потока, поскольку по истечении определенного времени температурное поле во внутренних точках исследуемого объекта регулируется [5, 6].

Пространственное распределение мощности $q(x, y)$ задается в виде уравнения для полосового энергетического источника, что предоставляет возможность обеспечить условие однозначности решения, и определяется выражением

$$q = \begin{cases} A(T)q(\xi, \eta) & \text{при } \xi \in [-a/2; a/2] \text{ и } \eta \in [-b/2; b/2]; \\ 0 & \text{при } \xi \notin [-a/2; a/2] \text{ или } \eta \notin [-b/2; b/2], \end{cases} \quad (4)$$

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.

Можно представить $q(\xi, \eta)$ в виде уравнения

$$q(\xi, \eta) = q_0(a_{n_1} \xi^{-2n_1} + a_{n_1-1} \xi^{-2(n_1-1)} + \dots + a_2 \xi^{-4} + a_1 \xi^{-2} + a_0) \cdot (b_{n_2} \eta^{-2m_2} + b_{n_2-1} \eta^{-2(m_2-1)} + \dots + b_2 \eta^{-4} + b_1 \eta^{-2} + b_0) v(\xi, \eta), \quad (5)$$

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; $a_{n_1}, a_{n_1-1}, \dots, a_2, a_1, a_0; b_{n_2}, b_{n_2-1}, \dots, b_2, b_1, b_0$ – коэффициенты полиномов (степенных многочленов); n_1, n_2 – целые числа; $v(\xi, \eta)$ – дополнительная функция.

Совокупность значений температур в точках объекта воздействия определяется в соответствии с требуемым изменением его теплового состояния. На первом этапе целесообразно провести расчет пространственного распределения мощности воздействующего энергетического потока, обеспечивающую требуемую максимальную температуру термических циклов точек объекта, находящихся на заданной глубине по ширине зоны термического влияния.

Структурные превращения, протекающие при лазерном воздействии, определяются в большей степени не максимальной температурой, а совокупностью процессов нагрева, выдержки при определенной температуре и охлаждения, то есть термическим циклом. Поэтому, на втором этапе на основе выявленных закономерностей изменения температурного поля на поверхности и в объеме материала целесообразно определить условия достижения благоприятных термических циклов для получения заданных свойств объекта воздействия и провести коррекцию пространственно-временных характеристик лазерного воздействия с целью обеспечения требуемых температурно-скоростных режимов.

В соответствии с разработанной методикой расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения обратная задача теплопроводности решается методом итераций, а определение требуемого распределения мощности содержит следующие этапы:

- определение допустимой максимальной температуры на поверхности исследуемого объекта, соответствующей проектируемому технологическому процессу;
- ввод первоначального значения распределения мощности воздействующего

энергетического источника и определение значения скорости перемещения энергетического источника, при которой максимальная температура на поверхности технологического объекта не превышает допустимую максимальную;

- ввод значения требуемой максимальной температуры на заданной глубине объекта вдоль линии перемещения энергетического источника;

- расчет значений максимальной температуры на заданной глубине технологического объекта;

- определение среднеквадратичного отклонения расчетной температуры от требуемой и сравнение его с заданным допустимым значением;

- коррекция распределения мощности потока энергии на поверхности технологического объекта;

- коррекция пространственно-временных характеристик лазерного воздействия (мощности, ее пространственного распределения, а также скорости перемещения энергетического источника) с учетом условий достижения благоприятных термических циклов для получения заданных свойств материала технологического объекта.

В результате расчета определено пространственное распределение мощности лазерного излучения $q(x, y)$ для формирования требуемого энергетического воздействия на технологические объекты из хромоникельмолибденовой и цементируемой сталей, а

также нагартованных алюминиевых и низколегированных титановых сплавов. Результаты расчета значений максимальных температур вдоль линии перемещения энергетического источника по поверхности технологического объекта из хромоникельмолибденовой стали представлены на рис.

Формирование определенного пространственного профиля интенсивности в заданной области на поверхности детали достигается только при использовании соответствующих оптических систем. Многообразие используемых и разрабатываемых оптических систем демонстрирует широкий интерес исследователей к этому важному вопросу, определяющему уровень совершенства лазерных технологий. В настоящее время созданы принципиально новые оптические элементы с ранее недостижимыми функциями – фокусаторы излучения [7, 8]. Фокусаторы представляют собой дифракционные оптические элементы, имеющие регулярную структуру микрорельефа рабочей поверхности, определяемую в зависимости от заданной формы области фокусировки, распределения в ней интенсивности излучения и его длины волны. Отражающие фокусаторы осуществляют поворот пучка лазерного излучения и перераспределение энергии в различные геометрические фигуры с заранее заданным профилем интенсивности.

Для применения в технологических процессах лазерной обработки деталей фокусатор в виде отражающей пластины выполня-

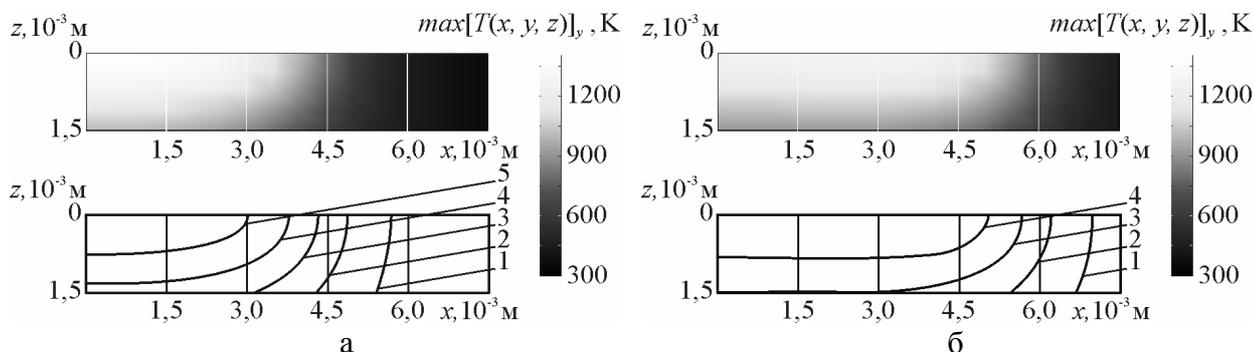


Рис. Результаты расчета значений максимальных температур $max[T(x, y, z)]_y$ вдоль линии

перемещения энергетического источника мощностью $Q = 950$ Вт, движущегося со постоянной скоростью $v = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м/с по поверхности технологического объекта из хромоникельмолибденовой стали.

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

ется с возможностью перемещения (поворота, вращения, колебательного движения и т.д.).

Установлены закономерности перераспределения мощности сформированных лазерных потоков, а также изменения фокусного расстояния и длины фокального отрезка при изменении пространственного положения динамического фокусатора. При повороте оптического элемента происходит поворот лазерного пятна в фокальной плоскости, перераспределение мощности в фокальном отрезке и уменьшение средней величины ее плотности, увеличивается длина лазерного пятна и изменяется положение фокальной плоскости, что позволяет регулировать пространственное распределение мощности лазерного излучения и энергозатрат в обрабатываемый материал.

Для регистрации температурных полей при воздействии на материалы высокоэнергетических потоков и применения в составе систем управления технологическими процессами создана система бесконтактной диагностики. Система содержит ИК-радиометр – блок оптической визуализации температурного поля в рабочей зоне тепловизора “Радуга” и устройство ввода-вывода видеоизображения на персональный компьютер. Устранение влияния диффузно-рассеянного лазерного излучения, уровень мощности которого может значительно превышать тепловое излучение нагретой области, достигается применением германиевого и сапфирового фильтров, ограничивающих спектральный диапазон пропускания полосой $d\lambda = (2...7) \cdot 10^{-3}$ м.

В результате проведенных исследований установлено, что расчетные значения температур в обрабатываемых материалах при воздействии движущихся распределенных поверхностных источников энергии для выбранного класса материалов в исследуемых диапазонах скорости ($v = (2...30) \cdot 10^{-3}$ м/с), мощности ($Q = (0,2...1) \cdot 10^3$ Вт) и геометрических параметров энергетических источников удовлетворительно (погрешность $\delta_T \leq 10...15\%$) коррелируют с результатами экспериментальных исследований. Воздей-

ствие на объекты полосовых движущихся энергетических источников предоставляет возможность обеспечить выравнивание значений максимальных температур в поперечных сечениях зоны термического влияния в ходе термических циклов нагрева и охлаждения, а увеличение плотности мощности лазерного излучения по краям полосы компенсирует повышенный теплоотвод с периферийных участков. В зависимости от степени влияния технологических параметров обработки непрерывным излучением на величину и распределение температур их можно расположить в ряд: мощность излучения Q , скорость перемещения лазерного пятна v , его форма и пространственное распределение плотности мощности излучения на поверхности обрабатываемого материала. Применение фокусаторов излучения для создания требуемого энергетического воздействия на технологические объекты позволяет увеличить ширину зоны лазерной обработки без перегрева ее центральных участков.

Выводы

На основе математического моделирования тепловых процессов и использования методов решения обратной задачи теплопроводности разработана методика расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения для формирования требуемого энергетического воздействия на технологические объекты. Установлено, что пространственное перераспределение мощности движущихся энергетических источников позволяет регулировать распределение температуры в зоне обработки.

Применение разработанной 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 с увеличением ширины требуемых изотерм максимальных температур. Для создания требуемого энергетического воздействия на техно-

логические объекты целесообразно применять оптические системы на основе динамических фокусаторов излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Оборудование и технология лазерной обработки материалов. М.: Высш. шк., 1990.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. S.P. Murzin. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics. Journal of Advanced Materials 2003 10(2) 181-185.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач: М.: Наука, 1986.
6. Коздоба Л.А. Решения нелинейных задач теплопроводности. Киев: Наукова думка, 1976.
7. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2000.
8. Optical phase element for focussing monochromatic radiation: Patent GB 2185126. 24.05.89. Int. cl⁵ G 02 B 5/10. // Prokhorov A.M., Sisakian I.N., Golub M.A., Soifer V.A., Karpeev S.V., Goncharsky A.V.

CALCULATION OF A SPATIAL DISTRIBUTION OF POWER OF LASER RADIATION FOR FORMATION OF REQUIRED POWER EFFECT

© 2005 S.P. Murzin, S.Y. Klochkov

Samara State Aerospace University

The most effective modes of processing are determined only at the solution of the return task of heat conduction, therefore development of mathematical models of thermal processes at laser processing requires the new approaches which are taking into account specificity of creation of required power effect on technological objects. The technique of calculation of a spatial distribution of power of laser radiation designed, which application allows to create more uniform temperature field on length of a driving band power source. It is expedient to apply to creation of required power effect on technological objects optical systems on the basis of dynamic fokusators of radiation.