

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБУЕМОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОКУСАТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, С.Ю. Ключков

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
Институт системы обработки изображений РАН

Аннотация

Успешная реализация технологических процессов лазерной обработки возможна только при условии формирования определенного пространственного профиля интенсивности излучения в заданной области на поверхности детали, что достигается при использовании соответствующих оптических систем.

Наиболее эффективные режимы обработки определяются только при решении обратной задачи теплопроводности, предоставляющей возможность по заданным известным математической модели и температурному полю, а также входящим в основное уравнение теплопроводности коэффициентам определить удельный тепловой поток через поверхность обрабатываемой детали. Разработана методика расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения для формирования требуемого энергетического воздействия на технологические объекты, применение которой позволяет создать более равномерное температурное поле по длине движущегося полосового источника. Показано, что применение дифракционных оптических элементов - фокусаторов излучения предоставляет возможность увеличить ширину зоны обработки без перегрева ее центральных участков.

Введение

Целесообразность и преимущества применения лазеров в технологических операциях обработки материалов определяются возможностью бесконтактного, строго дозированного интенсивного подвода энергии на поверхность изделия. Основной причиной, лимитирующей применение лазерных технологий при производстве деталей в машиностроении, является несоответствие распределения плотности теплового потока на поверхности заданному изменению состояния технологических объектов. Успешная реализация технологических процессов лазерной обработки возможна только при условии 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 (ДОЭ) – фокусаторов излучения [1, 2]. Для обработки деталей лазерным излучением фокусатор в виде отражающей пластины выполняется с возможностью перемещения (поворота, вращения, колебательного движения и т.д.) [3, 4]. В этом случае разработка технологических процессов лазерной обработки материалов с использованием фокусаторов излучения требует новых подходов, учитывающих специфику создания заданного температурного поля в технологических объектах. Наиболее эффективные режимы обработки определяются только при решении обратной задачи теплопроводности, предоставляющие возможность по заданным известным математической модели и температурному полю, а также входящим в основное уравнение теплопроводности коэффициентам определить удельный тепловой поток через поверхность исследуемого объекта [5].

Целью данной статьи является разработка методики расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения для формирования требуемого энергетического воздействия на технологические объекты.

Методика расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения для формирования 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. Численное интегрирование 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 $O\varphi$, 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 об-

ласть ϕ на поверхности исследуемого объекта. На остальной части поверхности задаются нелинейные условия теплообмена с окружающей средой.

Для преобразования нелинейных уравнений теплопроводности в частных производных в систему линейных алгебраических уравнений относительно температуры в дискретных точках исследуемого объекта используется метод конечного контрольного объема. 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.

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 [6], основанный на сужении области возможных 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 [6], заключающийся в решении прямых задач с итерациями на каждом шаге. Условием окончания итераций является совпадение с требуемой точностью заданного и полученного на 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 регуляризируется [6, 7].

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

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

где $A(T)$ – эффективный коэффициент поверхностного поглощения; где a, b – соответственно, длина и ширина области ϕ , ограниченной прямыми

$$\xi = -a/2; \quad \xi = a/2; \quad \eta = -b/2; \quad \eta = b/2;$$

$\xi = x \cos \varphi_1 - y \sin \varphi_1$; $\eta = x \sin \varphi_1 + y \cos \varphi_1$; φ_1 – угол поворота светового пятна в фокальной плоскости.

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

$$\begin{aligned} q(\xi, \eta) = & q_0 (a_{n_1} \bar{\xi}^{2n} + a_{n_1-1} \bar{\xi}^{2(n-1)} + \\ & + \dots + a_2 \bar{\xi}^4 + a_1 \bar{\xi}^2 + a_0) \cdot \\ & \cdot (b_{n_2} \bar{\eta}^{-2m} + b_{n_2-1} \bar{\eta}^{-2(m-1)} + \dots + b_2 \bar{\eta}^{-4} + \\ & + b_1 \bar{\eta}^{-2} + b_0) v(\xi, \eta), \end{aligned} \quad (2)$$

где q_0 – плотность мощности в центре энергетического источника; $\bar{\xi} = \frac{\xi}{10^{-3} \text{ м}}$, $\bar{\eta} = \frac{\eta}{10^{-3} \text{ м}}$ – 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, обеспечивающего 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 [8], то есть термическим циклом. Поэтому, 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.

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, соответствующая проектируемому технологическому процессу.

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 $z = h_0$ технологиче-

ского объекта вдоль линии перемещения энергетического источника $T_{\text{Эmax}}(x)|_{z=h_8} = [T_{\text{max}}(x, y, z)|_{z=h_8}]_y$.

5. Проводится расчет значений максимальных температур $\max[T(x, y, z)|_{z=h_8}]_y$ на заданной глубине $z = h_8$ 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:

$$\varepsilon_T = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\bar{N}} \{ \max[T(x, y, z)|_{z=h_8}]_y - T_{\text{Эmax}}(x)|_{z=h_8} \}^2}{\bar{N}(\bar{N}-1)}}, \quad (3)$$

где \bar{N} – количество точек исследуемого объекта, в которых заданы дискретные значения температур $T_{\text{Э}}$.

7. Среднеквадратичное отклонение ε_T сравнивается с заданным допустимым значением ε_8 .

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 $\varepsilon_T \leq \varepsilon_8$.

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.

В подвижной системе координат скорости нагрева и охлаждения определяются уравнением:

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

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 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. 1.

Результаты экспериментальных исследований

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.

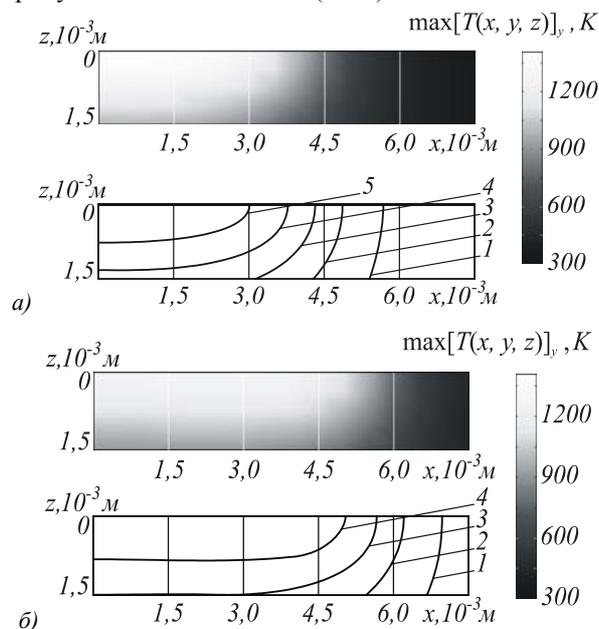


Рис. 1. Результаты расчета значений максимальных температур $\max[T(x, y, z)]_y$ вдоль линии перемещения энергетического источника мощностью $Q = 950$ Вт, движущегося с постоянной скоростью $v = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м/с по поверхности технологического объекта из хромоникельмолибденовой стали: $\bar{k} = 1$ (а); $\bar{k} = 10$ (б). T, K : 1 – 600; 2 – 750; 3 – 900; 4 – 1050; 5 – 1200

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. Воздействие 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 перифе-

рийных участков. Изменение параметров режима обработки приводит к изменению температуры материала в широких пределах. 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.

Металлографические исследования шлифов, изготовленных в поперечном сечении зоны лазерного воздействия хромоникельмолибденовой стали 40ХНМА, показали, что при обработке без оплавления поверхности область термического влияния состоит из нескольких слоев, микротвердость каждого из которых в различной степени отличается от исходной. Верхний, наиболее твердый слой пониженной травимости представляет собой мартенсит с микротвердостью $H_{\mu}=(7500\dots 8000)\cdot 10^6$ Па. Под ним расположена область неполной закалки, имеющая структуру из мартенсита и феррита. Третий слой – переходная зона. При лазерном воздействии на предварительно термообработанную сталь в этом слое имеет место понижение микротвердости, связанное с образованием структур отпуска – троостоферрита, троостита или сорбита. Исходная структура материала – сорбит с твердостью $H_{\mu}=(2850\dots 3410)\cdot 10^6$ Па.

Микротвердость зоны закалки после лазерного термоупрочнения цементированной стали 12Х2Н4А составляет $H_{\mu}=(7200\dots 7500)\cdot 10^6$ Па, что выше, чем после объемной закалки ($H_{\mu}=(6200\dots 6300)\cdot 10^6$ Па). Структура области лазерного воздействия после термоупрочнения цементированной стали, представлена на рис. 2.

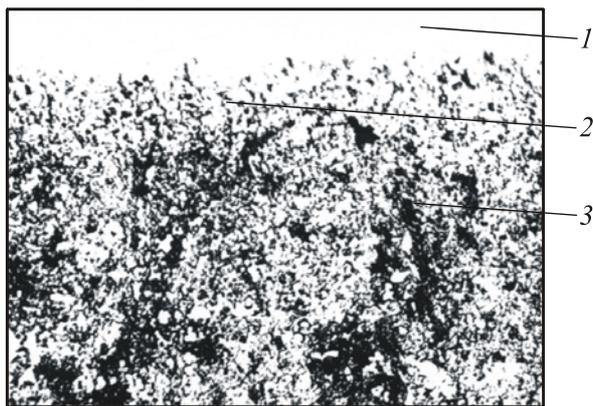


Рис. 2. Структура области лазерного воздействия после термоупрочнения цементированной стали 12Х2Н4А: увеличение $\times 200$. 1 – закаленная структура; 2 – область неполной закалки; 3 – исходная цементированная структура

Проведены исследования структур листового алюминиевого сплава АМг2Н и листового титанового сплава ОТ4-1 после проведения лазерного отжига. Сплав АМг2Н имеет гетерогенную структуру,

состоящую из α -твердого раствора и выделений фазы β (Mg_2Al_3), которая в исходном состоянии частично растворена. Исходный материал ОТ4-1 имеет волокнистую структуру. Зона отжига имеет зернистую структуру, представленную α -фазой и небольшим количеством β -фазы. При лазерном отжиге происходит рекристаллизация деформированной структуры, а также распад метастабильных фаз с образованием стабильной рекристаллизованной структуры.

Формирование таких структур металлических материалов в зоне лазерного воздействия обусловлено характером распределения температурных полей и различием в скорости охлаждения по глубине области термического влияния.

Использование разработанной методики расчета пространственного распределения мощности лазерного излучения позволяет создать более равномерное температурное поле по длине движущегося полосового источника, формируемого фокусаторами. Применение ДОЭ-фокусаторов излучения для создания требуемого энергетического воздействия на технологические объекты предоставляет возможность увеличить ширину зоны обработки без перегрева ее центральных участков.

Заключение

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 учет изменения формы светового пятна и распределения интенсивности приводит к качественным отличиям в распределении температурных полей в конструкционных материалах. 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.

Результаты расчета температурных полей в обрабатываемых материалах при воздействии движущихся распределенных поверхностных источников энергии для выбранного класса материалов в исследуемых диапазонах скорости, мощности и геометрических параметров энергетических источников удовлетворительно (погрешность $\delta_T \leq 10\dots 15\%$) коррелирует с результатами экспериментальных исследований.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что формирование структур металлических

материалов в зоне лазерного воздействия обусловлено характером распределения температурных полей в области термического влияния. Для создания требуемого энергетического воздействия на технологические объекты целесообразно применять оптические системы на основе фокусаторов излучения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, правительства Самарской области и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF Project SA-014-02) в рамках российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRNE), а также при поддержке гранта Президента РФ № НШ-1007.2003.01.

Литература

1. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Соифера. М.: Физматлит, 2000. – 688 с.
2. Prokhorov A.M., Sisakian I.N., Golub M.A., Soifer V.A., Karpeev S.V., Goncharky A.V. Optical phase element for focussing monochromatic radiation // Patent GB 2185126. 24.05.89. Int. cl.⁵ G 02 B 5/10.
3. Мурзин С.П. Тепловое воздействие на материалы комбинированных энергетических потоков при плазменно-лазерном нанесении покрытий // Известия Самарского научного центра РАН. 2002. Т.4. №1. С. 81-86.
4. Murzin S.P. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics // Journal of Advanced Materials 2003 10(2) 181-185.
5. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена // М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач // Учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1986. – 288 с.
7. Коздоба Л.А. Решения нелинейных задач теплопроводности // Киев.: Наукова думка, 1976. – 136 с.
8. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Оборудование и технология лазерной обработки материалов // М.: Высш. шк., 1990. – 159 с.

Formation of the desired energy impact during laser processing of materials using the radiation focusators

N.L. Kazanskiy^{1,2}, S.P. Murzin^{1,2}, S.Y. Klochkov^{1,2}

¹ *Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev*

² *Image Processing Systems Institute of RAS*

Abstract

Successful implementation of technological processes of laser processing is possible only if a certain spatial profile of radiation intensity is formed in a given area on the surface of the workpiece, which is achieved by using appropriate optical systems. The most effective processing modes are determined only by solving the inverse heat conduction problem, which allows to determine the specific heat flux through the workpiece surface using the given mathematical model and temperature field, as well as the coefficients included in the main heat conduction equation. A technique has been developed for calculating the spatial distribution of laser radiation power to form the required energy impact on technological objects; the use of this technique allows to create a more uniform temperature field along the length of a moving strip source. It is shown that the use of diffractive optical elements – radiation focusators allows to increase the width of the treatment area without overheating its central parts.

Keywords: laser processing of materials, radiation focusator, optical system, workpiece surface, mathematical model, temperature field, conduction equation.

Citation: Kazanskiy NL, Murzin SP, Klochkov SY. Formation of the desired energy impact during laser processing of materials using the radiation focusators. *Computer Optics* 2005; 28: 89-93.

References

- [1] Soifer VA, ed. *Methods for computer design of diffractive optical elements*. New York: John Willey and Sons Inc; 2002. ISBN: 978-0-471-09533-0.
- [2] Prokhorov AM, Sisakian IN, Golub MA, Soifer VA, Karpeev SV, Goncharky AV, Danilov VA, Popov VV, Stepanov VV. Method and optical phase element for focusing monochromatic radiation. Patent GB2185126A of May 24, 1989.
- [3] Murzin SP. Thermal effects of combined energy flows on materials during plasma-laser coating [In Russian]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 2002; 4(1): 81-86.
- [4] Murzin SP. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics. *J Adv Mater* 2003; 10(2): 181-185.
- [5] Alifanov OM. *Inverse heat transfer problems* [In Russian]. Moscow: "Mashinostroenie" Publisher; 1988.
- [6] Tikhonov AN, Arsenin VY. *Methods for solving the ill-conditioned problems* [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1986.
- [7] Kozdoba LA. *Solutions of nonlinear problems of heat conduction* [In Russian]. Kiev: "Naukova Dumka" Publisher; 1976.
- [8] Grigoryants AG, Shiganov IN. *Equipment and technology for laser processing of materials* [In Russian]. Moscow: "Vysshaya Shkola" Publisher; 1990.