

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ<sup>1</sup>

© 2006 С.П. Мурзин, С.Ю. Клочков, В.И. Артюшина<sup>2</sup>

Наиболее эффективные режимы лазерной обработки материалов определяются решением обратной задачи теплопроводности. Разработана методика расчета распределения плотности мощности лазерного излучения, применение которой позволяет создать более равномерное температурное поле по ширине зоны термического влияния движущегося распределенного поверхностного энергетического источника. Для формирования требуемого энергетического воздействия на технологические объекты применяются оптические системы на основе динамических фокусаторов излучения.

### Введение

Успешная реализация технологических процессов лазерной обработки материалов возможна только при условии формирования определенного профиля интенсивности излучения в заданной области на поверхности детали. Несоответствие распределения плотности энергетического потока заданному изменению состояния технологических объектов может привести уже на стадии обработки к образованию различных дефектов. Наиболее эффективные режимы лазерной обработки материалов определяются только решением обратной задачи теплопроводности, когда по заданным известным математической модели и температурному полю, а также входящим в основное уравнение теплопроводности коэффициентам определяется удельный энергетический поток через поверхность технологического объекта [1, 2]. Применение дифракционных оптических элементов-фокусаторов излучения [3, 4] позволяет создать требуемое распределение плотности мощности лазерного излучения.

<sup>1</sup>Представлена доктором физико-математических наук профессором В.В. Ивахником.

<sup>2</sup>Мурзин Сергей Петрович (murzin@ssau.ru), Клочков Сергей Юрьевич, Артюшина Вероника Игоревна (aseu@ssau.ru), кафедра автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34.

## 1. Расчет распределения плотности мощности лазерного излучения

Задача нахождения пространственного распределения мощности воздействующего энергетического источника, входящего в граничные условия второго рода уравнения теплопроводности, не всегда является корректной, поскольку ее решение не всегда однозначно и устойчиво. Для некорректных задач известен алгоритм [1, 2], основанный на сужении области возможных решений путем использования дополнительных априорных сведений относительно искомой функции и получивший название метода сведения к условно корректной задаче. Наиболее распространенным способом решения таких задач является метод подбора, подробно описанный в работе [2], 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 удовлетворяет условие постоянства во времени плотности теплового потока, поскольку по истечении определенного времени температурное поле во внутренних точках исследуемого объекта регуляризируется [1, 5]. Распределение плотности мощности  $q(x, y)$  задается в виде уравнения для полосового энергетического источника (что предоставляет возможность обеспечить условие однозначности решения) и определяется выражением:

$$q = A(T)q(\xi, \eta) \text{ при } \xi \in [-a/2; a/2] \text{ и } \eta \in [-b/2; b/2], \quad (1.1)$$

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

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

$$q(\xi, \eta) = q_0(a_n \bar{\xi}^{2n} + a_{n-1} \bar{\xi}^{2(n-1)} + \dots + a_2 \bar{\xi}^4 + a_1 \bar{\xi}^2 + a_0) \times \\ \times (b_m \bar{\eta}^{2m} + b_{m-1} \bar{\eta}^{2(m-1)} + \dots + b_2 \bar{\eta}^4 + b_1 \bar{\eta}^2 + b_0) v(\xi, \eta), \quad (1.2)$$

где  $q_0$  — плотность мощности в центре энергетического источника;  $\bar{\xi} = \xi/10^{-3}$  м,  $\bar{\eta} = \eta/10^{-3}$  м — безразмерные координаты;  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1, a_0$ ;  $b_m, b_{m-1}, \dots, b_2, b_1, b_0$  — коэффициенты полиномов;  $n, m$  — 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 определить плотность 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 сте-

пени 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 плотности мощности воздействующего энергетического источника и определение значения скорости его перемещения, 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 пространственно-временных характеристик лазерного воздействия (мощности, ее пространственного распределения, а также скорости перемещения энергетического источника) с учетом условий достижения заданных свойств материала технологического объекта.

В результате расчета определено пространственное распределение плотности мощности лазерного излучения  $q(x, y)$  для формирования требуемого энергетического воздействия на технологические объекты из хромоникель-молибденовой 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.

Применение разработанной методики позволяет создать более равномерное температурное поле в технологическом объекте при лазерной обработке материалов и устранить дефекты, имеющие место из-за неравномерного тепловыделения по ширине зоны термического влияния.

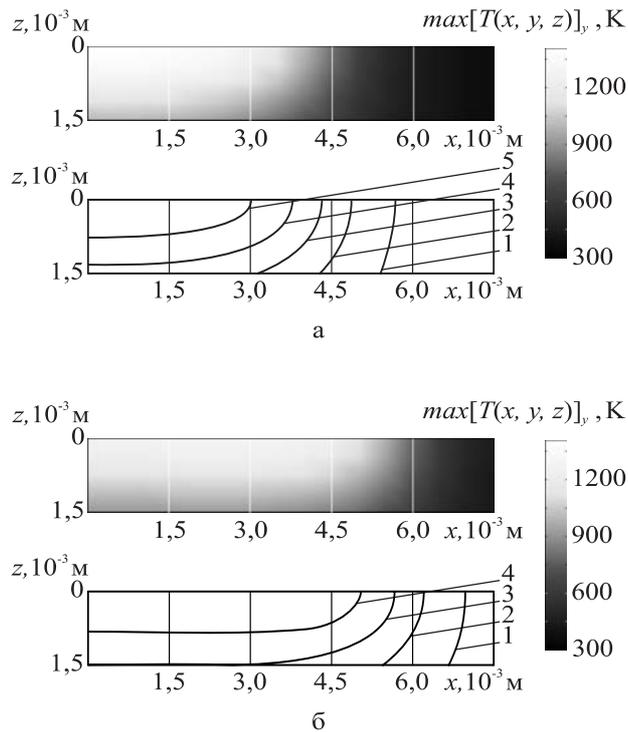


Рис. 1. Результаты расчета значений максимальных температур  $\max[T(x, y, z)]_y$ , К вдоль линии перемещения энергетического источника мощностью  $Q = 950$  Вт, движущегося с постоянной скоростью  $v = 1,1 \cdot 10^{-3}$  м/с по поверхности технологического объекта из хромоникельмолибденовой стали: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

## 2. Применение фокусаторов для формирования лазерного излучения

Формирование определенного профиля интенсивности лазерного излучения в заданной области на поверхности детали достигается только при использовании соответствующих оптических систем. В настоящее время созданы принципиально новые оптические элементы с ранее недостижимыми функциями – фокусаторы излучения [3, 4]. 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.

Отличительной особенностью разработанного метода проектирования технологических устройств формирования лазерных потоков является то, что для применения в технологических процессах лазерной обработки деталей фокусатор в виде отражающей пластины выполняется с возможностью перемещения (поворота, вращения, колебательного движения и т.д.) [6, 7].

Установлены закономерности перераспределения плотности 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 плотности мощности в фокальном отрезке с уменьшением ее средней величины, увеличивается длина лазерного пятна и изменяется положение фокальной плоскости, что позволяет регулировать энерговыход в обрабатываемый материал.

Для проведения операций лазерной обработки материалов на лазерном технологическом комплексе ЛК-1300 "Хебр-1А" динамический фокусатор используется в составе спроектированного и изготовленного приспособления, состоящего из узлов его фиксации, охлаждения, юстировки и вращения. Применение водяного охлаждения позволяет повысить лучевую стойкость фокусатора, т.е. максимальное значение энергетического порога его стабильной работы до значений плотности мощности формируемого непрерывного излучения  $q \geq 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

Проведена обработка образцов из хромоникельмолибденовой стали 40ХНМА. Металлографические исследования шлифов, изготовленных в поперечном сечении зоны лазерного воздействия, 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. Исходная структура материала — сорбит с твердостью  $H_{\mu} = (2850 \dots 3410) \cdot 10^6$  Па. Формирование таких структур в области лазерного воздействия обусловлено характером распределения температурных полей и различием в скорости охлаждения по глубине зоны термического влияния. Структура области лазерного воздействия после термоупрочнения хромоникельмолибденовой стали 40ХНМА представлена на рис. 2.

Применение фокусаторов излучения для создания требуемого энергетического воздействия на технологические объекты при использовании разработанной методики расчета распределения плотности мощности лазерного излучения позволяет 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 распределения плотности мощности лазерного излучения для формирования требуемого энергетического воздействия на техно-



Рис. 2. Структура области лазерного воздействия после термоупрочнения хромоникельмолибденовой стали 40XНМА (увелич.  $\times 300$ ). 1 — закаленная зернистая структура мартенситного типа; 2 — область неполной закалки; 3 — переходная зона; 4 — исходная структура

логические объекты. Ее применение позволяет создать более равномерное температурное поле по длине полосового источника.

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

## Литература

- [1] Алифанов, О.М. Обратные задачи теплообмена / О.М. Алифанов. — М.: Машиностроение, 1988. — 280 с.
- [2] Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач: учебное пособие для вузов / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. — М.: Наука, 1986. — 288 с.
- [3] Методы компьютерной оптики / под ред. В.А. Сойфера. — М.: Физматлит, 2000. — 688 с.
- [4] Optical phase element for focussing monochromatic radiation / A.M. Prokhorov [et al.] // Patent GB 2185126. 24.05.89. Int. cl.<sup>5</sup> — G 02 B 5/10.
- [5] Коздоба, Л.А. Решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. — Киев.: Наукова думка, 1976. — 136 с.
- [6] Device for laser treatment of an object / A.M. Prokhorov [et al.] / United States Patent 5,103,073. Apr. 7, 1992. Int. cl.<sup>5</sup> B 23 K 26/00.
- [7] Murzin, S.P. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics / S.P. Murzin // Journal of Advanced Materials. — 2003. — 10(2). — P. 181–185.

Поступила в редакцию 12/I/2006;  
в окончательном варианте — 17/IV/2006.

**POWER EFFECT FORMING AT LASER TREATMENT  
OF MATERIALS<sup>3</sup>**© 2006 S.P. Murzin, S.Y. Klochkov, V.I. Artyushina<sup>4</sup>

The most effective modes of laser processing materials are determined by the solution of the inversed problem of heat conductor. Calculations procedure of the density capacity of laser radiation is developed allowing to create more uniform temperature field on width a zone thermal effect of the moving distributed superficial power source. Optical systems are applied to formation of required power effect on technological objects on the basis of dynamic focusators radiation.

Paper received 12/I/2006.

Paper accepted 17/IV/2006.

---

<sup>3</sup>Communicated by Dr. Sci. (Phys. & Math.) Prof. V.V.Ivakhnik.

<sup>4</sup>Murzin Sergey Petrovich ([murzin@ssau.ru](mailto:murzin@ssau.ru)), Klochkov Sergey Yurjevich, Artjushina Veronika Igorevna ([aseu@ssau.ru](mailto:aseu@ssau.ru)), Dept. of Automatic Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University, Samara, 443086, Russia.