

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

В.И. Мордасов, С.П. Мурзин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

Разработана модель регулирования теплового воздействия на материалы энергетических источников с пространственно-временным модулированием распределения плотности. Проведены теоретические и экспериментальные исследования формирования требуемого распределения температур в материалах. Расчетные значения температур для выбранных групп материалов в широких диапазонах скорости перемещения и мощности теплового источника удовлетворительно совпадают с экспериментальными значениями (погрешность $\delta_T \leq 15...20\%$).

Введение

Возрастающий уровень надежности при одновременном усложнении конструкции изделий машиностроения вызывает непрерывный рост требований к их качеству, формируемому на стадии изготовления. Использование высококонцентрированных лазерных и комбинированных источников энергии существенно расширяет возможности конкурентоспособных энерго- и ресурсосберегающих производств по созданию надежных и долговечных машин и агрегатов. Разработанные на их основе высокоэффективные производственные технологии должны обеспечивать высокий уровень показателей надежности и долговечности, технологичности и экономичности. Они являются главными составляющими интегрального показателя качества. Применение в составе автоматизированных технологических комплексов систем устойчивого управления передачей энергии и строгого нормирования ее величины при воздействии на материалы позволяет устранить негативные последствия технологических процессов [1]. Направленное энергетическое воздействие обеспечивает требуемые температурно-скоростные режимы формирования структур материалов с улучшенным комплексом физико-механических свойств. Надежность формирования требуемого профиля интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости обеспечивают фокусаторы лазерного излучения [2, 3].

Исследование посвящено совершенствованию методов и средств управления передачей высоких энергий для улучшения качества обработки изделий при использовании лазерных и комбинированных энерго- и ресурсосберегающих технологий. На основе исследования формирования лазерных пучков с помощью фокусаторов лазерного излучения созданы подходы для решения задач технологического назначения регулированием распределения энергии излучения.

1. Выбор функции распределения интенсивности излучения источника

При построении математической модели тепловых процессов плазменно-лазерной обработки с использованием элементов компьютерной оптики использовался прямой численный метод, заключающийся в аппроксимации уравнения теплопро-

водности методом конечных разностей. Приводились три варианта привязки лазерного пятна в зоне плазменного нагрева: перед участком взаимодействия плазменного сгустка, в центре его и за зоной нанесения покрытия. При определении средней температуры поверхности в пятне напыления, вследствие кратковременного действия теплового потока отдельных частиц, нагрев, напыляемым материалом, принимался интегральной оценкой. Для целевого лазерного пятна с интенсивностью мощности энергии, увеличенной по краям (выравнивание температурного поля в зоне комбинированной обработки), принималась расчетная схема с сосредоточенным линейным источником. Поскольку возникновение оптического пробоя в плазменном сгустке отсутствовало, явлениями потери излучения и сдвига положения фокусного пятна пренебрегалось. Считалось, что два физических процесса нанесения покрытия подобны, если они различаются только условиями однозначности (начальными и граничными условиями и т.п.). Исследовалось влияние каждого критерия подобия на изучаемые параметры процесса напыления.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования оптических систем управления передачей высоких энергий. Формирование лазерных пучков осуществляется отражающими плоскими оптическими элементами. На основе существующих подходов к проектированию фокусаторов излучения, обеспечивающих поворот пучка лазерного излучения, фазовую модуляцию и перераспределение его энергии в различные геометрические фигуры с заданным распределением интенсивности, разработаны методы их расчета для конкретных технологических процессов лазерной обработки материалов. Создан новый тип оптических элементов - динамические или нестационарные. Разработанные оптические элементы, способные регулировать тепловое воздействие излучения и создавать новые способы обработки, защищены патентами России, Европейским патентом и патентом США [4]. В отличие от линзовых объективов, фокусаторы имеют меньшие габариты и позволяют в заданный момент времени достичь требуемой формы светового пятна и распределения плотности излучения. Принимается схема нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный (установленный перпендикулярно, под углом и параллельно

траектории движения) или вращающийся отрезок. Выполняется условие неоднородного распределения интенсивности излучения по длине отрезка с ее максимумом по краям для выравнивания поля температур по ширине зоны термического влияния (рис. 1).

В этом случае при выборе конструкции оптической системы целесообразно осуществить поворот отражающего элемента. Его форма рабочей поверхности описывается выражением:

$$Z(U, V) = \frac{U^2 + 2V^2}{5,65f} - UL_0 \cdot \frac{\int_0^{0,71M} dU \int_0^{(R^2 - U^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{r^2}\right) dV}{\pi f \left[\Phi\left(\frac{R}{r}\right)\right]^2}, \quad (1)$$

где Z - ось, перпендикулярная плоскости элемента; U, V - координаты соответственно продольного и поперечного сечения оптического элемента; f - расчетное фокусное расстояние; L_0 - первоначальная длина светового отрезка; R - радиус расчетного пучка излучения; r - параметр расчетного пучка гауссовского распределения излучения; $\Phi(R/r)$ - значение двойного интеграла вероятности в области определения расчетного пучка.

При повороте на угол φ оптического элемента, отражающая поверхность которого выполнена по формуле (1), происходит поворот светового пятна в фокальной плоскости на угол φ_1 : $\varphi_1 = \arctg(\sqrt{2}\tg\varphi)$, увеличивается средняя величина плотности энергии, распределенной в световой отрезок, и уменьшается длина светового отрезка.

При вращении фокусатора, изготовленного с рельефом, рассчитанным по зависимости (1), изменяется и положение фокальной плоскости. Величина изменения фокусного расстояния Δf при повороте фокусатора на угол φ равна:

$$\Delta f = f \{1 - \cos[\arcsin(0,71\sin\varphi)]\} \quad (2)$$

На рис.1 представлены график изменения положения фокуса Δf и распределение интенсивности излучения вдоль продольной оси светового пятна в фокусе оптического элемента в зависимости от угла поворота φ фокусатора.

Величина изменения интенсивности в точке ξ в фокальной плоскости, являющейся проекцией прямой $U = M$, определяется соотношением:

$$\frac{q}{q_0} = \left\{ \frac{L_0}{C_1} \exp\left(-\frac{A_1 M^2}{r^2}\right) \cdot \Phi\left[\frac{(R^2 - A_1 M^2)^{1/2} + B_1 M}{r C_1}\right] \right\} / \left\{ L \cdot \exp\left(-\frac{M^2}{2r^2}\right) \Phi\left[\frac{(R^2 - M^2/2)^{1/2}}{r}\right] \right\}, \quad (3)$$

где L - длина светового отрезка.

$$A_1 = 1/(1 + \cos^2 \varphi) B_1 = \cos\varphi \sin\varphi / [2(1 + \cos^2 \varphi)]^{1/2};$$

$$C_1 = \left(\cos^2 \varphi + \frac{1}{2} \sin^2 \varphi \right)^{1/2}.$$

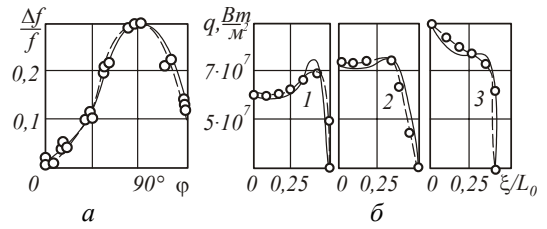


Рис. 1. Изменение фокального расстояния при повороте фокусатора на угол φ (а), распределение интенсивности излучения вдоль продольной оси светового пятна в фокусе оптического элемента (б):

— — — — — расчетные зависимости (2) и (3);

○ — — — — — эксперимент (максимальное значение при фокусировке излучения CO_2 -установки "Хебр-1А" мощностью $W = 10^3$ Вт при $\varphi = 0$ равна $q = (6...7) \cdot 10^7$ Вт/м²); 1 - $\varphi = 0$; 2 - $\varphi = 45^\circ$; 3 - $\varphi = 90^\circ$.

Пространственное распределение интенсивности источника лазерного излучения, преобразованное выполненным по аналитической зависимости (1) фокусатором, определяется следующей аналитической зависимостью (рис. 2):

$$q(\bar{x}, \bar{y}) = q_0 \left(1 + \left(b_0 - c_0 \bar{x} \right)^{-2} \bar{y} \right)^{-4} \left(1 - \bar{y} - a_x \bar{x} \right)^{-4}. \quad (4)$$

3. Оптимизация теплового воздействия на материалы

Определение для проектируемого технологического процесса оптимальных коэффициентов q_0, b_0, c_0 проводится численным интегрированием основного уравнения теплопроводности и включает следующие этапы:

определение температур во всех рассматриваемых точках путем решения матричным способом системы уравнений:

$$KT_{k,n} \cdot T_{k,n} + KTL_{k,n+1} \cdot T_{k,n+1} + (KTL + KTC)_{k,n-1} \cdot T_{k,n-1} + KTL_{k-1,n} \cdot T_{k-1,n} + KTL_{k+1,n} \cdot T_{k+1,n} + Q_{k,n} = 0, \quad (5)$$

где $Q_{k,n}$ - количество тепла, поглощенное в точках на поверхности тела; i, j, k - индексы по координатам x, y, z соответственно; n - индексы по времени;

$$KTL_{k,n+1} = \lambda_{(T)k,n+1} / \Delta x^2; KTL_{k-1,n} = \lambda_{(T)k-1,n} / \Delta x^2;$$

$$KTL_{k,n-1} = \lambda_{(T)k,n-1} / \Delta x^2; KTL_{k+1,n} = \lambda_{(T)k+1,n} / \Delta x^2;$$

$$KTC_{k,n-1} = -(c\rho)_{k,n-1} / \Delta \tau; \quad (6)$$

$$KT_{k,n} = -KTC_{k,n-1} - (KTL_{k,n+1} + KTL_{k,n-1} + KTL_{k1,n} + KTL_{k+1,n});$$

$\lambda_{(T)}$ - теплопроводность материала; $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ - шаги по координатам x, y, z ;

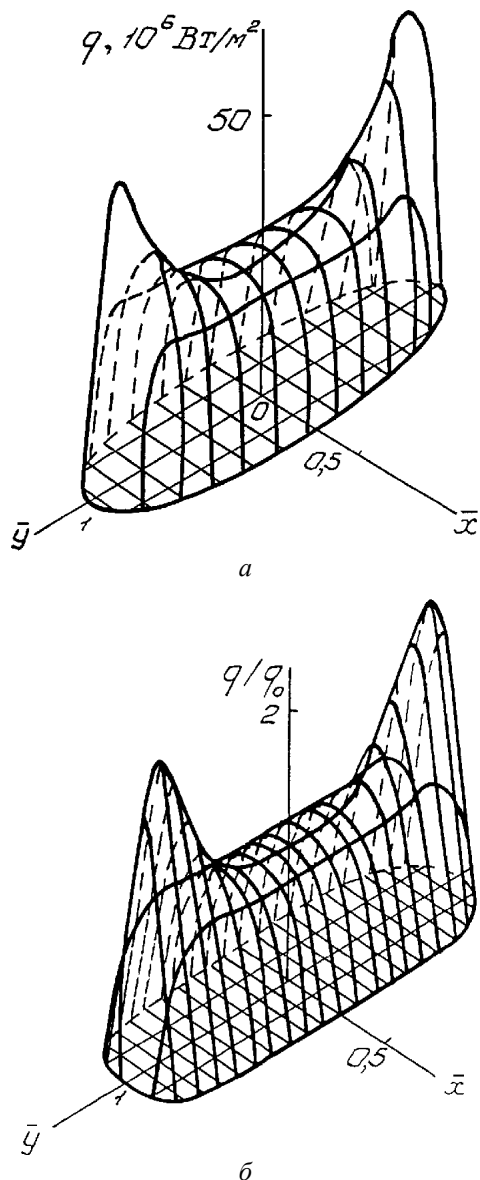


Рис. 2. Пространственное распределение интенсивности теплового потока лазерного источника нагрева по экспериментальным данным (а) и расчета (б): $q_0 = 2,57 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$, $\bar{x} = x / y_{\max}$, $\bar{y} = y / y_{\max}$, $y_{\max} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ где \bar{x} , \bar{y} - безразмерные координаты поверхности обрабатываемой заготовки в системе отсчета, связанной с движущимся источником излучения; \bar{x} соответствует направлению перемещения источника: $\bar{x} = x / y_{\max}$, $\bar{y} = y / y_{\max}$, $y_{\max} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - определен экспериментально; a_x - коэффициент формы источника излучения; q_0 - значение интенсивности излучения в точке с координатами $\bar{x} = 0$, $\bar{y} = 0$; b_0 , c_0 - определяемые коэффициенты [5].

определение тепловых потоков в трех выбранных различных точках отрезка $x = \text{const}$ на поверхности тела согласно выражению:

$$\sum_{n_1}^{n_2} \left[\Delta x K T L_{2n} (T_{i,2n} - T_{i,1n}) \right] = A(T) q_0 \cdot \left\{ 2b_0 \left[y^{-4} (1-y^{-4}) \bar{x}_{\max}(y) - \frac{a_x y^{-5}}{5} \bar{x}_{\max}(y) \right] + 2c_0 \left[-\frac{y^{-4}}{3} (1-y^{-4})^{-3} \bar{x}_{\max}(y) + \frac{a_x y^{-7}}{7} \bar{x}_{\max}(y) \right] + 2 \left[(1-y^{-4}) \bar{x}_{\max}(y) - \frac{a_x y^{-5}}{5} \bar{x}_{\max}(y) \right] \right\}, \quad (7)$$

где n_1 , n_2 - моменты времени касания передней и задней гранями пятна точки на поверхности тела; $A(T)$ - коэффициент поглощения материала при температуре T ;

определение значений коэффициентов b_0 , c_0 , q_0 проводится методом приближений. При этом уточняются значения теплофизических и оптических характеристик для каждого интервала температур.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что расчетные значения температур для выбранных групп материалов в широких диапазонах скорости перемещения ($v = (3 \dots 30) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$) и мощности ($Q = (0,3 \dots 1,2) \cdot 10^3 \text{ Вт}$) теплового источника удовлетворительно совпадают с экспериментальными (рис. 3) (погрешность $\delta_T \leq 15 \dots 20\%$).

Заключение

Применение вращающихся фокусаторов позволяет существенно изменять положение светового пятна и величину фокусного расстояния. Это возможно эффективно использовать при управлении технологическими параметрами плазменно-лазерного нанесения покрытий.

Для эффективной фокусировки излучения при лазерной обработке материалов не могут применяться общеизвестные оптические системы (линзовые или зеркальные объективы, растровые элементы и т.п.). Это вносит технологические ограничения при проведении различных операций нанесения многослойных защитных покрытий, упрочнения инструментальных сталей, модификации поверхности лазерным спеканием, отжиге листовых материалов.

Существующие способы газотермического нанесения покрытий с использованием последующей их лазерной обработки имеют ограничение их номенклатуры из-за отсутствия организации регулируемого профиля разряда плазмотрона. Движущийся вдоль поверхности детали плазменный сгусток напыляемого материала не обеспечивает окно прозрачности для последующего лазерного спекания покрытия. Недостатки проявляются в получении низкой поверхностной твердости материалов, чрезмерном трещинообразовании, низкой адгезионной прочности покрытий и т.п. Данные недостатки возможно устранить путем использования высокоэффективной технологии плазменно-лазерной обработки с фокусаторами лазерного излучения. [6, 7].

Литература

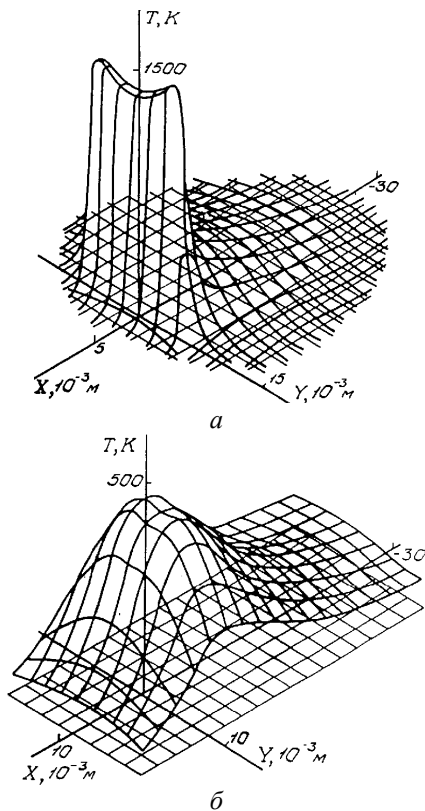


Рис. 3. Общий вид температурных полей, определенных методом радиационной термометрии, на поверхности деталей из жаростойкого хромоникелевого сплава с покрытием КХП+30Н с подслоем НА67 (а) и АЛ4Т6 с покрытием КТП35Н+85Н с подслоем НА67 (б): скорость движения $v=10^{-2}$ м/с, мощность теплового источника $Q=10^3$ Вт.

1. Барвинок В.А., Мордасов В.И., Шорин В.П. Высокоэффективные лазерно-плазменные технологии в машиностроении // М., МЦНТИ. 1997. 75 с.
2. Методы компьютерной оптики // Под ред. В.А. Сойфера. М., Физматлит, 2000. 688 с.
3. M.A. Golub, I.N. Sisakian, V.A. Soifer Infra-red radiation focusators // Optics and lasers in engineering. 1991. V. 15, N 5. P. 297-309.
4. Device for laser treatment of an object: Pat. USA 5, 103, 073. 7.04.1992. Int. cl.⁵ B 23 K, 26/00. V.A. Danilov, V.V. Popov, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakian, D.M. Sagatelian, V.A. Soifer, E.V. Sisakian, L.P. Naumidi, J.K. Danileiko, J.D. Terekhin, V.S. Akopian, V.P. Shorin, V.I. Mordasov, S.P. Murzin
5. Барвинок В.А., Мордасов В.И., Мурзин С.П. К вопросу формирования температурных полей при лазерной поверхностной обработке // Изв. Академии наук "Металлы". 1995, N3. С. 147-152.
6. Мордасов В.И., Мурзин С.П., Шуваев А.А. Установление окон прозрачности плазменного сгустка при лазерном спекании покрытий // Труды IX международного совещ. "Радиационная физика твердого тела", МГИЭМ, Севастополь. 1999, Т.2. С. 1020-1029.
7. Гришанов В.Н., Мордасов В.И., Мурзин С.П. Конвективное перемешивание при лазерном спекании покрытий // Перспективные материалы, 1999, N5. С. 73-79.