

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДАЧЕЙ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

*Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.И. Мордасов, С.П. Мурзин, С.И. Харитонов\**  
*Институт систем обработки изображений РАН*  
*Самарский государственный аэрокосмический университет*

### *Аннотация*

Определена область применений фокусаторов лазерного излучения в технологических операциях обработки материалов. Предложен метод изменения интенсивности излучения и параметров энергетического воздействия на основе применения динамических фокусаторов излучения (подвижных элементов компьютерной оптики) в соответствии с требованиями технологии термообработки. Проведены расчеты изменения размеров и формы фокального пятна, перераспределения профиля интенсивности излучения, изменения фокусного расстояния динамическими фокусаторами излучения. Экспериментальные исследования по определению пространственных характеристик излучения выполнены с использованием изготовленных в лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН отражающих элементов компьютерной оптики.

### *Введение*

Технологические процессы термической обработки, основанные на локальном нагреве конструкционных материалов лазерным излучением, с высокой экономической эффективностью применяются при изготовлении деталей и узлов различных машин и агрегатов. Несмотря на очевидные преимущества лазерных источников тепловой энергии перед традиционными, их применение в машиностроении и производстве аэрокосмической техники целесообразно только при использовании соответствующих систем преобразования излучения, позволяющих осуществить необходимое температурное воздействие.

Произвольный нагрев тонкостенных деталей приводит к значительным деформации из-за высокого уровня остаточных напряжений; образованию концентраторов напряжений в переходной зоне между упрочненными и отожженными участками; пережогам, крупнозернистости, оплавлению материала в центральной зоне лазерного воздействия. Для объемных деталей характерны следующие дефекты: неравномерное распределение механических свойств по ширине лазерного следа; неравномерная глубина обработки; локальное оплавление; повышенная хрупкость изделия вследствие перегрева центральной и недостаточная твердость в результате недогрева периферийных областей лазерного воздействия; образование микро- и макротрещин из-за неодновременного изменения объема обрабатываемой детали при нагреве; поверхностные и глубокие трещины в покрытии и подложке; отслаивание покрытия.

Основные условия возникновения вышеперечисленных дефектов, лимитирующих качественное изготовление деталей методами лазерной термической обработки, определяются геометрией сфокусированного луча, характером распределения интенсивности излучения по его сечению. 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 обеспечи-

вает требуемые температурно-скоростные режимы формирования структур материалов с улучшенным комплексом физико-механических свойств. Надежность формирования требуемого профиля интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости обеспечивают элементы плоской оптики - фокусаторы лазерного излучения [2, 3]. В связи с перспективностью применения фокусаторов излучения для термообработки изделий, актуальной является задача создания систем управления передачей высоких энергий, обеспечивающих требуемое распределение температуры на поверхности технологического объекта. Регулирование теплового воздействия на материалы энергетических источников с пространственно-временным модулированием распределения плотности позволяет получить оптимальные варианты решения научно-практических задач, лежащих в основе технологий лазерной термообработки.

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

### *Теоретические и экспериментальные исследования*

Проведены теоретические и экспериментальные исследования оптических систем управления передачей высоких энергий. Формирование лазерных пучков осуществляется отражающими оптическими элементами (фокусаторами излучения). В отличие от линзовых и металлических объективов фокусаторы излучения имеют меньшие габариты и позволяют в заданный момент времени получить требуемую форму светового пятна и распределение плотности излучения. На основе существующих геометрикооптических подходов к проектированию фокусаторов излучения разработаны методы расчета оптических элементов для формирования требуемого распределения температуры на поверхности технологического объекта при проведении лазерной обра-

ботки материалов. Приведен вывод аналитических зависимостей формы рабочих поверхностей фокусаторов излучения по технологическому назначению, для конкретных деталей и видов лазерной обработки. Определена область применений фокусаторов излучения в технологических операциях. Предложен метод изменения интенсивности излучения и параметров энергетического воздействия на основе применения динамических фокусаторов излучения (подвижных элементов компьютерной оптики) в соответствии с требованиями технологии термообработки [4]

Проведены расчеты изменения размеров и формы фокального пятна, перераспределения профиля интенсивности излучения, изменения фокусного расстояния динамическими фокусаторами излучения. Экспериментальные исследования по определению пространственных характеристик излучения выполнены с использованием изготовленных в лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН отражающих элементов компьютерной оптики.

Проведено определение изменения фокусного расстояния и длины фокального отрезка, пространственного распределения интенсивности излучения при различных углах поворота динамического отражающего оптического элемента. Принимается схема нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный (установленный перпендикулярно, под углом и параллельно траектории движения) или вращающийся отрезок, а также выполняется условие неоднородного распределения интенсивности излучения по длине отрезка с ее максимумом по краям для выравнивания поля температур по ширине зоны термического влияния. В этом случае при выборе конструкции оптической системы целесообразно осуществить поворот отражающего элемента. Его форма рабочей поверхности описывается выражением [5]:

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

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 оптического элемента;  $G$  - расчетный пучок;  $M$  - координата  $U$  прямой на поверхности фокусатора излучения. При синтезе геометрооптических фокусаторов излучения принимают, что прямые на их отражающей поверхности, перпендикулярные световому отрезку, фокусируют излучение в точку на нем.

При повороте на угол  $\varphi$  оптического элемента, отражающая поверхность которого выполнена по

формуле (1), происходит поворот светового пятна в фокальной плоскости на угол  $\varphi_1$ :

$$\varphi_1 = \arctg(\sqrt{2}\operatorname{tg}\varphi), \quad (2)$$

увеличивается средняя величина плотности энергии, распределенной в световой отрезок, и уменьшается длина светового отрезка.

При вращении фокусатора излучения, рассчитанного по зависимости (1), изменяется и положение фокальной плоскости. Величина изменения фокусного расстояния  $\Delta f$  при повороте оптического элемента на угол  $\varphi$  равна:

$$\Delta f = f \{1 - \cos[\arcsin(0,71 \sin \varphi)]\}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлены графики изменения угла  $\varphi_1$  поворота светового пятна в фокальной плоскости и положения фокуса  $\Delta f$  в зависимости от угла поворота  $\varphi$  фокусатора излучения.

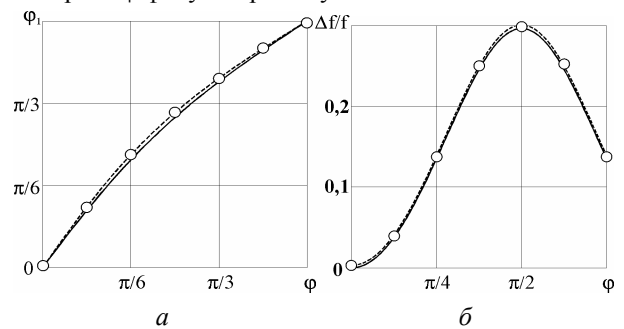


Рис. 1. Изменение угла  $\varphi_1$  поворота светового пятна в фокальной плоскости (а) и положения фокуса  $\Delta f$  (б) в зависимости от угла поворота  $\varphi$  фокусатора излучения: ———— - расчетные зависимости (2) и (3); ○ - эксперимент

Величина изменения интенсивности в фокальной плоскости определяется соотношением:

$$\frac{q}{q_0} = \left\{ \frac{L_0}{C_1} \exp\left(-\frac{A_1 M^2}{r^2}\right) \cdot \Phi\left[\frac{(R^2 - A_1 M^2)^{1/2} + B_1 M}{r C_1}\right] \right\} / \left\{ L \cdot \exp\left(-\frac{M^2}{2r^2}\right) \Phi\left[\frac{(R^2 - M^2/2)^{1/2}}{r}\right] \right\}, \quad (4)$$

где:  $L$  - длина светового отрезка;

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

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

Графики распределения интенсивности излучения  $q$  вдоль продольной оси светового пятна и профили интенсивности излучения  $q$  в фокальной плоскости оптического элемента при различных углах его поворота  $\varphi$  представлены на рис. 2, 3.

На рис. 2, 3 обозначено:  $\bar{\xi}, \bar{x}, \bar{y}$  - безразмерные координаты фокальной плоскости:  $\bar{\xi} = \xi/L$ ;  $\bar{x} = x/L$ ;  $\bar{y} = y/L$ ;  $O\xi$  - ось, проходящая через проекцию начала координат плоскости  $UOV$  на фокаль-

ную плоскость и фокальный отрезок;  $xOy$  – проекция плоскости  $UOV$  на фокальную плоскость.

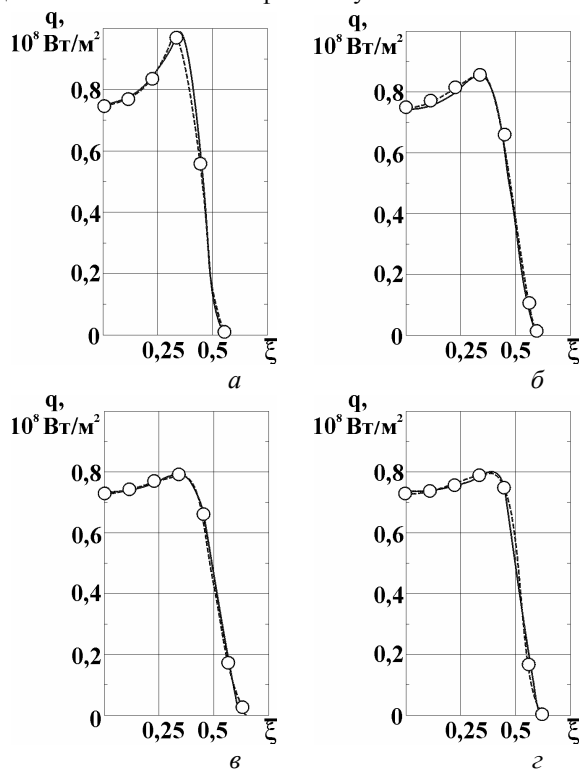


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения  $q$  вдоль продольной оси светового пятна в фокусе оптического элемента при различных углах его поворота:  $\varphi=0^\circ$  (а);  $\varphi=30^\circ$  (б);  $\varphi=60^\circ$  (в);  $\varphi=90^\circ$  (г).

— расчетная зависимость (4);

○ эксперимент

(максимальное значение при фокусировке излучения  $CO_2$ -установки «Хебр-1А» мощностью  $Q_n = 10^3$  Вт при  $\varphi = 0$  равна  $q = 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>)

Изменение пространственных характеристик распределения энергии излучения определялось калориметрическим способом и методом радиационной термометрии.

Расчетные значения интенсивности излучения удовлетворительно совпадают с экспериментальными значениями (погрешность составляет  $\delta_q \leq \pm(3...5)\%$ ).

При увеличении диаметра фокусируемого пучка  $D_n$  происходит перераспределение энергии к периферии светового отрезка. Максимальная величина интенсивности излучения в фокальной плоскости снижается (рис. 4).

Повысить интенсивность излучения при уменьшении размеров фокального пятна позволяет применение оптических систем из двух или более фокусирующих элементов. Для проведения операций закалки и обработки деталей с покрытиями целесообразно увеличить интенсивность излучения до значений  $q=(6...12) \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> и уменьшить размеры светового пятна в  $K=2,4...3,5$  раза. Фокусатор излучения формирует световое пятно и перераспределяет в нем энергию, а второй оптический элемент (вогнутое зеркало, фокусатор излучения в световое пятно минимальных размеров) выполняет задачу увеличения  $q$  до необходимого для проведения конкретной технологической операции значения.

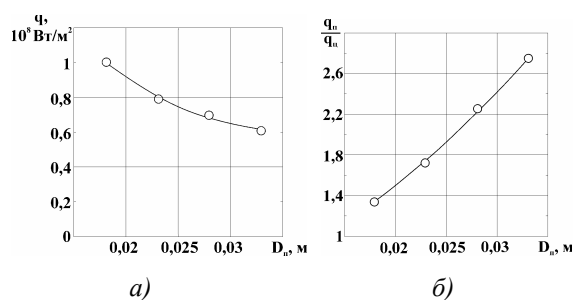


Рис. 4. Изменение максимальной интенсивности излучения  $q$  на периферии светового отрезка (а) и отношение ее к интенсивности в центре светового пятна (б) при увеличении диаметра фокусируемого пучка  $D_n$

### Заключение

Проведены теоретические и экспериментальные исследования оптических систем управления передачей высоких энергий. Формирование лазерных пучков осуществляется отражающими элементами компьютерной оптики, которые имеют значительные преимущества перед мировыми аналогами.

Определена область применений фокусаторов излучения в технологических операциях. Предложен метод изменения интенсивности излучения и параметров энергетического воздействия на основе применения динамических фокусаторов излучения (подвижных элементов компьютерной оптики) в соответствии с требованиями технологии термообработки.

Проведен вывод аналитических зависимостей формы рабочих поверхностей фокусаторов излучения по технологическому назначению, для конкретных деталей и видов лазерной обработки. Проведены расчеты и экспериментальные исследования по определению изменения пространственных характеристик динамическими отражающими оптическими элементами.

### Литература

1. Барвинок В.А., Мордасов В.И., Мурзин С.П. К вопросу формирования температурных полей при лазерной поверхностной обработке // Изв. Академии наук. Металлы, 1995. №3. С. 147-152.
2. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Соифера. Физматлит. М., 2000. – 688 с.
3. M.A. Golub, I.N. Sisakian, V.A. Soifer Infra-red radiation focusators // Optics and lasers in engineering, 1991. Vol. 15, N 5. P. 297-309.
4. Device for laser treatment of an object: Pat. USA 5, 103, 073. 7.04.1992. Int. cl.<sup>5</sup> 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. Устройство для локального отжига листовых заготовок: А.С. 1706219 СССР, МКИ<sup>5</sup> С 21 D 1/09 / И.Н. Сисакян, В.П. Шорин, В.А. Соифер, В.И. Мордасов, С.П. Мурзин 15.09.1991.

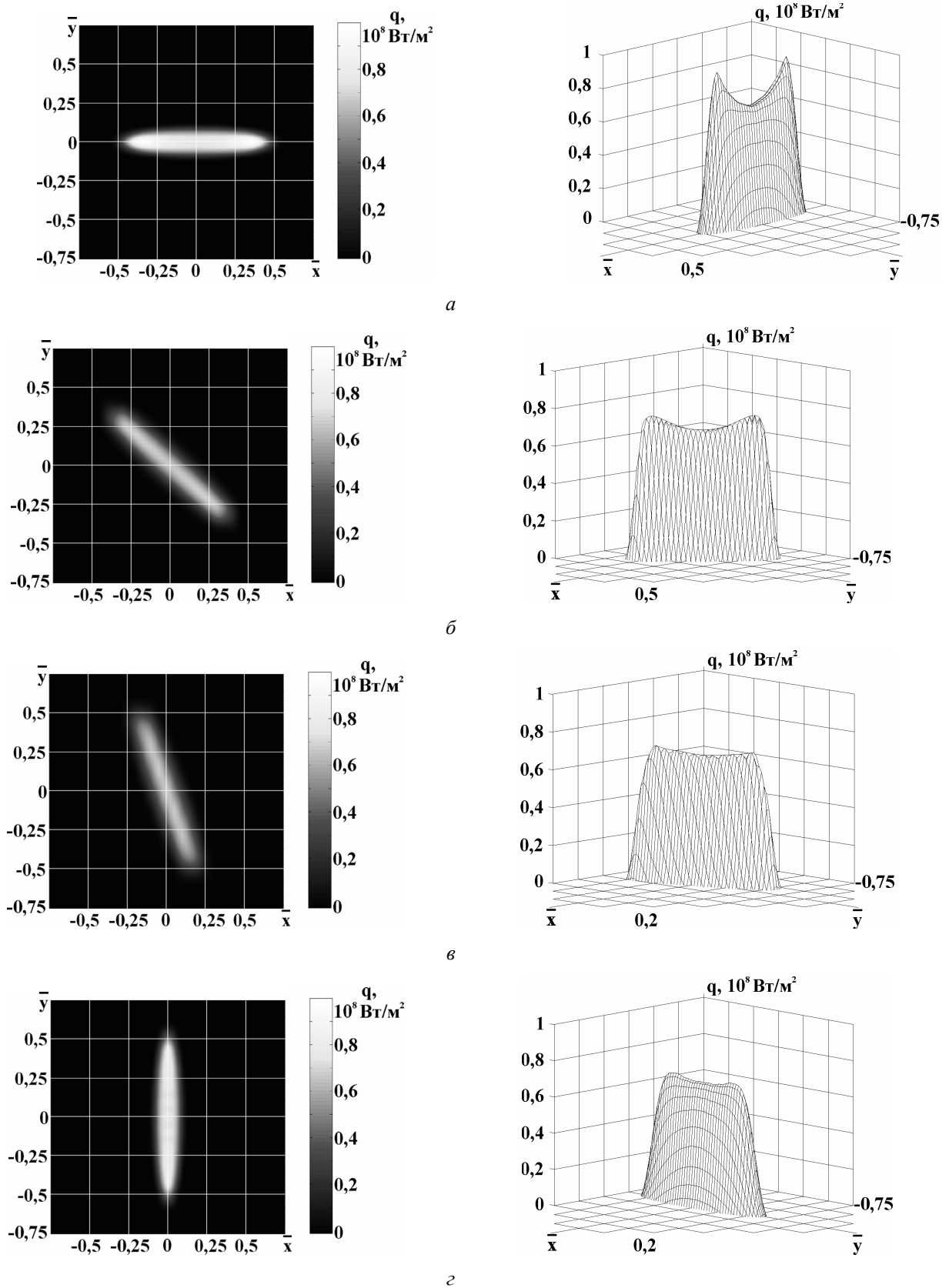


Рис. 3. Профили интенсивности излучения  $q$  в фокальной плоскости оптического элемента при различных углах его поворота  $\varphi=0^\circ$  (а);  $\varphi=30^\circ$  (б);  $\varphi=60^\circ$  (в);  $\varphi=90^\circ$  (г). Полная мощность излучения  $Q_n=10^3 \text{ Вт}$