

## ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНЫХ ПОТОКОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ФОКУСАТОРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

С.П. Мурзин<sup>1</sup>, Е.Л. Осетров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара, Россия

### Аннотация

Проведены экспериментальные исследования температурных полей в конструкционной стали 40ХНМА при воздействии лазерных потоков, сформированных фокусаторами излучения. Для определения температуры в зоне лазерного воздействия использовался инфракрасный термометр «Кельвин». Воздействие на объекты полосовых движущихся энергетических источников предоставляет возможность обеспечить выравнивание значений максимальных температур в поперечных сечениях зоны термического влияния, а увеличение плотности мощности лазерного излучения по краям полосы компенсирует повышенный теплоотвод с периферийных участков.

### Введение

Применение дифракционных оптических элементов – фокусаторов излучения [1, 2] при лазерной обработке материалов предоставляет возможность создать требуемый комплекс свойств конструкционных материалов в зоне термического влияния. В этом случае форма лазерного пятна и распределение плотности мощности излучения рассматриваются в качестве основных параметров режима обработки, выбор параметров лазерного источника и оптической системы проводится в соответствии с результатами решения обратной задачи теплопроводности. В работах [3, 4] 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.

Целью данной работы являются экспериментальные исследования температурных полей в конструкционном материале – хромоникельмолибденовой стали 40ХНМА при воздействии лазерных потоков, сформированных фокусаторами излучения.

### Применение инфракрасного термометра «Кельвин» в составе системы бесконтактной диагностики температур

При проведении исследований для формирования излучения СО<sub>2</sub>-технологической установки ЛК-1300 «Хебр-1А» мощностью  $Q=10^3$  Вт применялся отражающий дифракционный оптический элемент [5]:

$$Z(U, V) = \text{mod}_{m\lambda/(2\cos\theta)} \left( \frac{1}{\cos\theta} \left( \frac{U^2 \cos^2\theta + V^2}{4f} - \frac{L \int_0^{U \cos\theta} dU \int_0^{\sqrt{R^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{r^2}\right) dV}{\pi f (\vartheta)^*} \right) \right), \quad (1)$$

где  $Z(U, V)$  – высота рельефа в точке  $(U, V)$  оптического элемента;  $U, V$  – координаты точки отражающего оптического элемента в системе координат с осью  $OU$ , направленной противоположно проекции падающего луча и имеющей начало в центре расположенной в области  $G: U^2 \cos^2\theta + V^2 = R^2$  отражающей поверхности;  $R$  – максимальный радиус фокусируемого пучка;  $L$  – длина фокального отрезка;  $f$  – фокусное расстояние оптического элемента;  $\theta$  – угол между оптической осью излучения и нормалью к плоскости оптического элемента;  $\text{mod}(\bar{h})_{m\lambda/(2\cos\theta)}$  – функция, равная наименьшему положительному остатку от деления  $\bar{h}$  на  $m\lambda/(2\cos\theta)$ ;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $m$  – целое число;  $r$  – параметр фокусируемого пучка Гауссовского распределения плотности излучения, в котором интенсивность на расстоянии  $r$  от центра уменьшается в  $e$  раз по сравнению с интенсивностью в центре пучка;  $(\vartheta)^*$  – значение двойного интеграла вероятности в области  $G$  для фокусируемого пучка гауссовского распределения плотности излучения:

$$(\vartheta)^* = \frac{4}{\pi} \iint_G \exp\left[-\frac{(U^2 + V^2)}{r^2}\right] dU dV. \quad (2)$$

Фокусатор имел следующие параметры:  $f=1$  м;  $L_0=12 \cdot 10^{-3}$  м;  $R=25 \cdot 10^{-3}$  м;  $r=0,7R$ ;  $\theta=45^\circ$ .

Для определения температуры в зоне лазерного воздействия в диапазоне значений  $T=(600 \dots 1600)$  К использовался инфракрасный термометр «Кельвин», имеющий предел допустимой абсолютной погрешности  $\Delta$  в диапазоне температуры окружающей среды  $(293 \pm 5)$  К:  $\Delta = (1 + 0,01|T_T + 273|)$  К, где  $T_T$  – показания прибора ( $^\circ\text{C}$ ). Для дополнительной калибровки прибора установлена зависимость между регистрируемым потоком теплового излучения и глубиной заделки центральной области зоны термического влияния.

На рис. 1а представлены расчетные зависимости глубины закалки технологического объекта из стали 40ХНМА с поглощающим покрытием МЦС-510 на основе метилцеллюлозы и силиката натрия при различной скорости движения полосовых энергетических источников:

$$q(x, y) = q_0(-2,4568 \cdot 10^{-7} \bar{x}^{-10} + 2,5128 \cdot 10^{-5} \bar{x}^{-8} - 7,7806 \cdot 10^{-4} \bar{x}^{-6} + 6,8237 \cdot 10^{-3} \bar{x}^{-4} - 1,7760 \cdot 10^{-2} \bar{x}^{-2} + 1,0142) \cdot (-1,0086 \bar{y}^{-6} + 2,7886 \bar{y}^{-4} - 2,7350 \bar{y}^{-2} + 0,9967) \text{ [Вт/м}^2\text{]} \quad (3)$$

при  $q_0 = 8,8422 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ;  
 $x \in [-5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}]$ ;  $y \in [-10^{-3} \text{ м}; 10^{-3} \text{ м}]$ .

$$q(x, y) = q_0(1,1513 \cdot 10^{-7} \bar{x}^{-10} - 1,0036 \cdot 10^{-5} \bar{x}^{-8} + 2,4962 \cdot 10^{-4} \bar{x}^{-6} - 2,0921 \cdot 10^{-3} \bar{x}^{-4} + 8,2705 \cdot 10^{-3} \bar{x}^{-2} + 0,9969) \times (-1,3516 \bar{y}^{-6} + 3,3895 \bar{y}^{-4} - 3,0153 \bar{y}^{-2} + 0,9966) \text{ [Вт/м}^2\text{]} \quad (4)$$

при  $q_0 = 7,9698 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ;  
 $x \in [-6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}]$ ;  $y \in [-10^{-3} \text{ м}; 10^{-3} \text{ м}]$ ,  
 где  $q_0$  – плотность мощности в центре энергетического источника;  $x, y$  – пространственные координаты;  $\bar{x} = x/10^{-3} \text{ м}$ ,  $\bar{y} = y/10^{-3} \text{ м}$  – безразмерные координаты. Формулы (3) и (4) получены в результате аппроксимации расчетного распределения плотности мощности в фокальной плоскости полиномами десятой степени [4].

Зависимость (3) описывает распределение плотности мощности в фокальной плоскости оптического элемента (1) при значении параметров фокусируемого пучка  $R_\phi = r_\phi = 18 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и мощности излучения  $Q = 950 \text{ Вт}$ , а зависимость (4) – при  $R_\phi = r_\phi = 22 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

При определении глубины закалки  $h_z$  рассматривалась нелинейная задача теплопроводности при нагреве технологического объекта полосовым поверхностным энергетическим источником. Расчет проводится для технологического объекта, который перемещался с постоянной линейной скоростью  $v$  в положительном направлении оси  $Oy$  в системе координат  $(x, y, z)$ , помещенной в центр энергетического источника мощностью  $Q$ . Принималось допущение: энергетический источник с заданными геометрией и пространственным распределением мощности является поверхностным и занимает область  $\phi$  на поверхности исследуемого объекта. На остальной части поверхности задаются нелинейные условия теплообмена с окружающей средой.

После воздействия на образец лазерного излучения изготавливались микрошлифы поперечного сечения зоны термического влияния и проводились измерения глубины закаленного слоя. Характерные диаграммы регистрируемого сигнала для образца из стали 40ХНМА с поглощающим покрытием МЦС-510, а также результаты измерений глубины закаленных слоев образцов приведены на рис. 1б. На рис. 1 обозначено:  $n_{ед}$  – относительные единицы показаний прибора;  $h_z$  – глубина закалки.

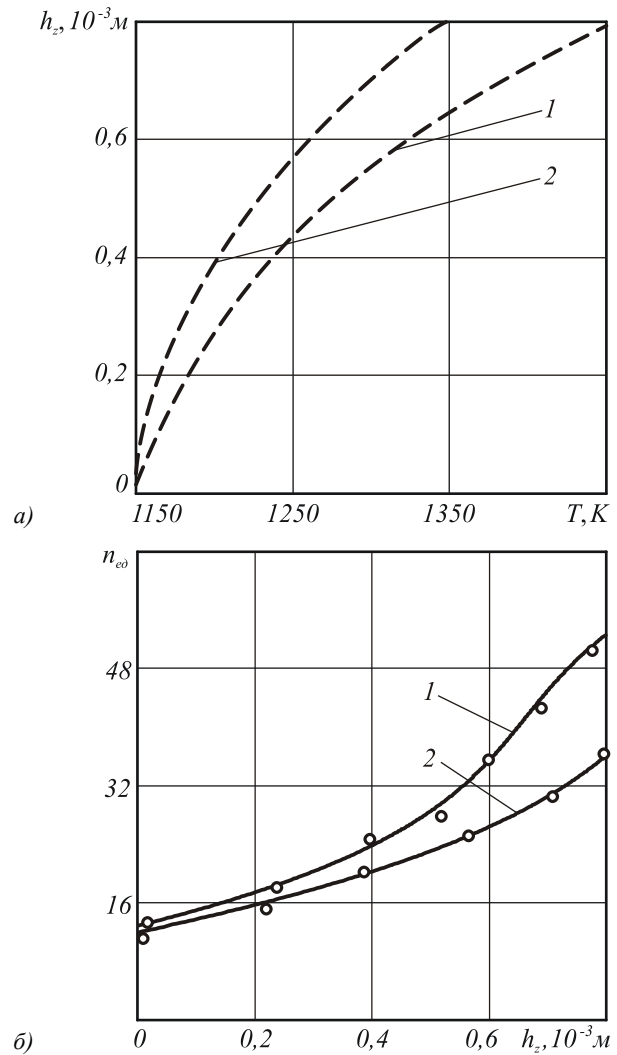


Рис. 1. Расчетные зависимости глубины закалки  $h_z$  технологического объекта из стали 40ХНМА с поглощающим покрытием от температуры поверхности  $T$  при воздействии поверхностных энергетических источников (3), (4) (а); результаты измерения глубины зоны закалки  $h_z$  образцов из стали 40ХНМА с поглощающим покрытием МЦС-510 после проведения лазерного воздействия и интенсивности сигналов инфракрасного термометра  $n_{ед}$ , полученные на этих образцах (б). Скорость движения энергетических источников  $v, 10^{-3} \text{ м/с}$ : кривая 1 – 1,3; кривая 2 – 0,7

Представленные на рис. 1 результаты исследований предоставляют возможность прокалибровать

прибор и при проведении последующих измерений определять температуру поверхности в зоне обработки. Основным недостатком при определении температуры в зоне лазерного воздействия бесконтактным методом является зависимость показаний прибора от взаимного расположения пиродатчика и визируемой области, поскольку выходной сигнал пропорционален регистрируемому тепловому потоку. Это вызывает необходимость точной юстировки, калибровки показаний перед началом, а также периодически в ходе проведения измерений.

#### Результаты экспериментальных исследований

В результате расчета и эксперимента определены: изотермы температурного поля и распределение температуры  $T$  по ширине зоны термического влияния на поверхности деталей из хромоникельмолибденовой стали 40ХНМА, имеющие место при движении полосовых энергетических источников мощностью  $Q=0,95 \cdot 10^3$  Вт со скоростью  $v=1,1 \cdot 10^{-2}$  м/с, представленные на рис. 2, 3.

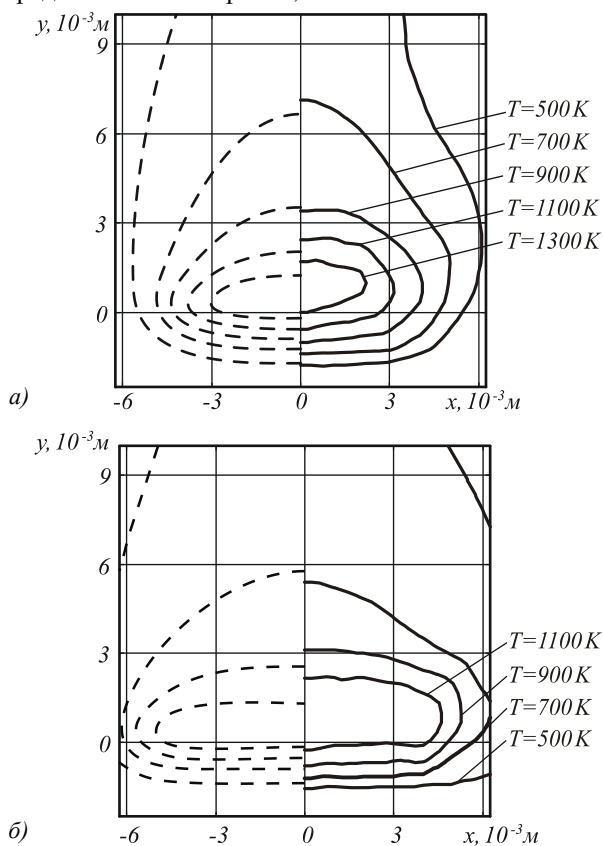


Рис. 2. Изотермы температурного поля на поверхности детали из стали 40ХНМА при проведении лазерного термоупрочнения. Скорость движения полосовых энергетических источников с различным распределением мощности  $v=1,1 \cdot 10^{-2}$  м/с. Мощность излучения  $CO_2$ -лазерной установки  $Q=950$  Вт. пунктирная линия – результаты расчета, сплошная – эксперимент

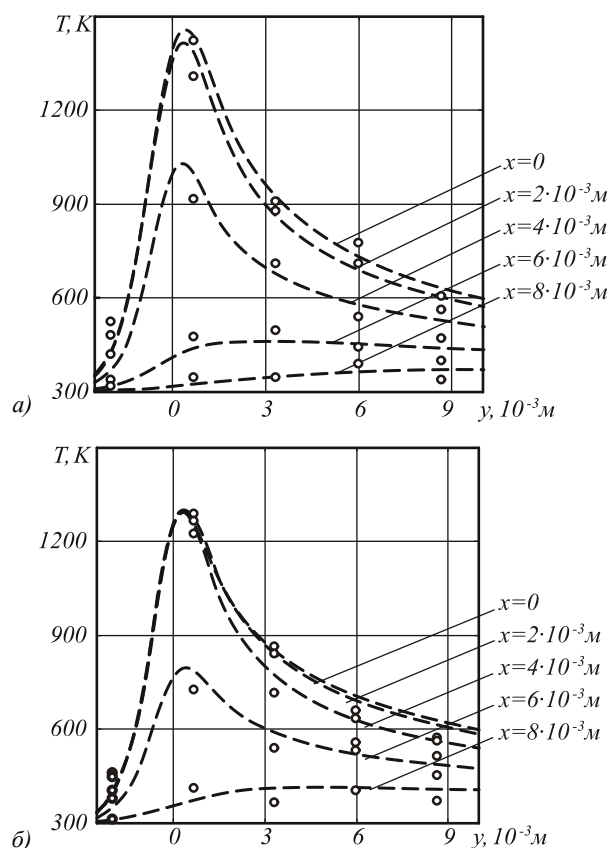


Рис. 3. Распределение температуры  $T$  по ширине зоны термического влияния на поверхности стали 40ХНМА при проведении лазерного термоупрочнения полосовыми энергетическими источниками с различным распределением мощности. Скорость движения энергетических источников  $v=1,1 \cdot 10^{-2}$  м/с. Мощность излучения  $CO_2$ -лазерной установки  $Q=950$  Вт. пунктирная линия – результаты расчета, точки – эксперимент

Применялась схема нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный отрезок, установленный перпендикулярно траектории движения заготовки. Численное интегрирование дифференциального уравнения теплопроводности проводилось с учетом зависимостей от температуры теплофизических характеристик обрабатываемых материалов (теплопроводности, объемной теплоемкости, а также полной поверхностной теплоотдачи) и эффективного коэффициента поверхностного поглощения лазерного излучения, которые задавались табулированными значениями с шагом по температуре.

Дополнительное перераспределение мощности излучения к краям лазерного пятна достигалось путем повышения доли энергии, формируемой периферийными зонами фокусатора, увеличением радиуса фокусируемого луча  $R_\phi$ .

Скорости нагрева и охлаждения материала на поверхности деталей из хромоникельмолибденовой стали 40ХНМА, имеющие место при движении полосовых энергетических источников мощностью

$Q=0,95 \cdot 10^3$  Вт со скоростью  $v=1,1 \cdot 10^{-2}$  м/с, приведены на рис. 4.

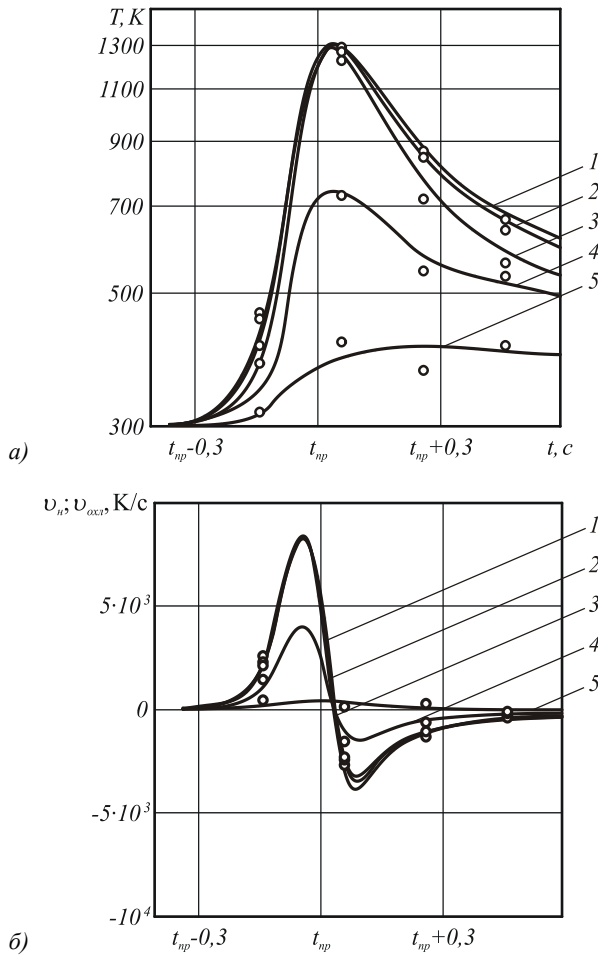


Рис. 4. Термические циклы (а), а также скорости нагрева  $v_n$  и охлаждения  $v_{охл}$  (б) точек на поверхности технологического объекта из стали 40ХНМА.  $x, 10^{-3}$  м: кривая 1 – 0; кривая 2 – 2; кривая 3 – 4; кривая 4 – 6; кривая 5 – 8.  $t_{np}$  – момент прохождения центральной части лазерного пятна над расчетным сечением

При воздействии излучения, имеющего параметры фокусируемого пучка  $R_\phi = r_\phi = 18 \cdot 10^{-3}$  м, и мощность, равную  $Q=950$  Вт, на движущийся со скоростью  $v=1,1 \cdot 10^{-2}$  м/с технологический объект из стали 40ХНМА, величина максимальной температуры на поверхности в центре зоны термического влияния равна  $\max [T(x=0, y, z)|_{z=h_0}]_y = 1450$  К. Ширина изотермы  $T=1100$  К составляет  $b_{T=1100 \text{ К}} = 6,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Изменение параметров фокусируемого пучка излучения до значений  $R_\phi = r_\phi = 22 \cdot 10^{-3}$  м приводит к уменьшению в 1,12 раза величины максимальной температуры в центре зоны термического влияния, которая составляет  $\max [T(x=0, y, z)|_{z=h_0}]_y = 1300$  К.

Ширина изотермы  $T=1100$  К увеличивается в 1,4 раза и равна  $b_{T=1100 \text{ К}} = 9,2 \cdot 10^{-3}$  м. Результаты экспериментальных исследований температурных полей в обрабатываемом материале при воздействии движущихся распределенных поверхностных источников энергии удовлетворительно (погрешность  $\delta_T \leq 10 \dots 15\%$ ) коррелирует с результатами расчетов. Скорость охлаждения в диапазоне значений температур от  $T=1100$  К до  $T=940$  К составляет  $v_{охл} \approx 10^3 \dots 2 \cdot 10^3$  К/с.

### Заключение

Приведенные результаты экспериментальных исследований температурных полей в обрабатываемом материале – хромоникельмолибденовой стали 40ХНМА при воздействии движущихся распределенных поверхностных источников энергии удовлетворительно (погрешность  $\delta_T \leq 10 \dots 15\%$ ) коррелирует с результатами расчетов. 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 периферийных участков. Дополнительное перераспределение мощности излучения к краям лазерного пятна достигается путем повышения доли энергии, формируемой периферийными зонами фокусатора, например, увеличением радиуса фокусируемого луча или использованием кольцевого распределения плотности потока. 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.

### Литература

1. Optical phase element for focusing monochromatic radiation: Patent GB 2185126. 24.05.89. Int. cl.5 G 02 B 5/10. // Prokhorov A.M., Sisakian I.N., Golub M.A., Soifer V.A., Karpeev S.V., Goncharky A.V.
2. Golub M.A., Sisakian I.N., Soifer V.A. Infra-red radiation focusators // Optics and lasers in engineering, 1991. - Vol. 15. - N 5. - P. 297-309.
3. Мурзин С.П. Повышение эффективности лазерной обработки материалов при использовании элементов компьютерной оптики // Перспективные материалы. 2003. - №2. - С. 74-78.
4. Мурзин С.П., Ключков С.Ю., Артющина В.И. Формирование энергетического воздействия при лазерной обработке материалов // Вестник СГАУ, 2006. - В. 43. - С. 160-166.
5. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Соифера. - М.: Физматлит, 2000. - 688 с.

---

## STUDIES OF TEMPERATURE FIELDS IN STRUCTURAL STEEL BY LASER BEAM ACTION FORMED BY FOCUSATORS\*

S.P. Murzin<sup>1</sup>, E.L. Osetrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University (SSAU), Samara, Russia

### *Abstract*

Experimental studies of temperature fields were conducted in structural steel 40HNMA by laser beam action formed by focusators. The Kelvin infra-red thermometer was used to determine temperature in the zone of laser action. The action of the rectangular-shaped moving heat sources provides an opportunity to adjust the maximum temperature values in cross sections of a heat affected zone, whereas increasing of laser power density on edges of rectangle compensates a increasing heat removal from peripheral areas.

*Citation:* Murzin SP, Osetrov EL. Studies of temperature fields in structural steel by laser beam action formed by focusators. *Computer Optics* 2007; 31(3): 59-62.

### *References:*

- [1] Optical phase element for focusing monochromatic radiation: Patent GB 2185126. 24.05.89. Int. cl.5 G 02 B 5/10. // Prokhorov A.M., Sisakian I.N., Golub M.A., Soifer V.A., Karpeev S.V., Goncharky A.V.
  - [2] Golub M.A., Sisakian I.N., Soifer V.A. Infra-red radiation focusators // *Optics and lasers in engineering*, 1991. - Vol. 15. - N 5. - P. 297-309.
  - [3] Murzin SP. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics [In Russian]. *Journal of Advanced Materials* 2003; 2: 74-78.
  - [4] Murzin SP, Klochkov SYu, Artyushina VI. Heat action forming at laser treatment of materials [In Russian]. *Vestnik SSAU (Herald of the Samara State Aerospace University)* 2006; 43: 160-166.
  - [5] Volkov AV, Golovashkin DL, Doshkolovich LL, Kazanskiy NL, Kotlyar VV, Pavelyev VS, Skidanov RV, Soifer VA (ed.), Solovjev VS, Uspleneyev GV, Kharitonov SI, Khonina SN. *Methods of Computer Optics* [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher 2000; 688 p.
-