

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПРИМЕНЕНИЮ ФОКУСАТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

С.П. Мурзин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

Успешная реализация технологических процессов лазерной обработки возможна только при условии формирования определенного пространственного профиля интенсивности в заданной области на поверхности детали. Это достигается при использовании соответствующих оптических систем – фокусаторов излучения. Разработан технологический метод повышения эксплуатационных характеристик деталей с регулируемым пространственным распределением мощности излучения. Отличительными особенностями метода являются то, что форма лазерного пятна и распределение плотности мощности излучения рассматриваются в качестве основных параметров режима обработки, выбор параметров лазерного источника и разработка технологических оптических систем проводится в соответствии с результатами решения обратной задачи теплопроводности. Для применения фокусаторов в технологических процессах лазерной обработки деталей определена допустимая погрешность юстировки оптического элемента, а также требуемая точность задания параметров фокусируемого излучения и угла поворота фокусатора.

Введение

Использование лазерных технологий, целесообразность применения которых и преимущества определяются возможностью бесконтактного, строго дозированного интенсивного подвода энергии на поверхность изделия, является прогрессивным направлением в технологии машиностроения. Успешная реализация технологических процессов лазерной обработки возможна только при условии формирования определенного пространственного профиля интенсивности в заданной области на поверхности детали. Это достигается при использовании соответствующих оптических систем – фокусаторов излучения [1–3], позволяющих осуществить необходимое температурное воздействие. Для более эффективного применения фокусаторов излучения в технологических операциях лазерной обработки материалов целесообразно провести анализ структурно-функциональной схемы формирования эксплуатационных характеристик деталей, а также определить требования к юстировке оптического элемента и точности задания параметров формируемого излучения. Отклонения распределения плотности мощности и, что в данном случае наиболее значимо, температуры технологических объектов не должны превышать допустимых.

Технологический метод повышения эксплуатационных характеристик деталей лазерной обработкой с регулируемым пространственным распределением мощности излучения

Начальным этапом анализа технологического процесса как объекта управления является составление структурно-функциональной схемы [4].

Структурно-функциональная схема формирования эксплуатационных характеристик деталей при лазерной обработке непрерывным излучением

без оплавления поверхности (например, при термоупрочнении и отжиге) представлена на рис. 1. Входными параметрами таких технологических процессов являются: скорость обработки, мощность излучения, определяемая параметрами лазерного источника, а также форма лазерного пятна и относительное распределение плотности мощности. Для процессов лазерной обработки основным фактором, влияющим на формирование эксплуатационных характеристик деталей, является температура в зоне обработки, которая зависит от времени воздействия, удельного энергозатрата, формы детали, теплофизических свойств и начальной температуры обрабатываемого материала. Выходными параметрами, т.е. параметрами, обеспечивающими выполнение конкретной задачи, сформулированной в техническом задании или заданной чертежом, являются глубина обработки, форма зоны обработки, свойства обработанного материала (например, его твердость, прочность, пластичность и т.д.), а также шероховатость поверхности. При разработке технологических процессов лазерной обработки решают следующий комплекс взаимосвязанных задач: проводят анализ чертежа детали; определяют режимы обработки и взаимосвязь параметров с характеристиками материала после обработки; обосновывают схему обработки и базирования детали; проводят выбор основного технологического оборудования и средств автоматизации; выбирают дополнительную оснастку, приборы и приспособления; при необходимости проектируют специальные контрольные приспособления.

Обычно при выборе режимов обработки расчет пространственного распределения мощности лазерного излучения для формирования требуемого энергетического воздействия на технологические объекты не проводится.

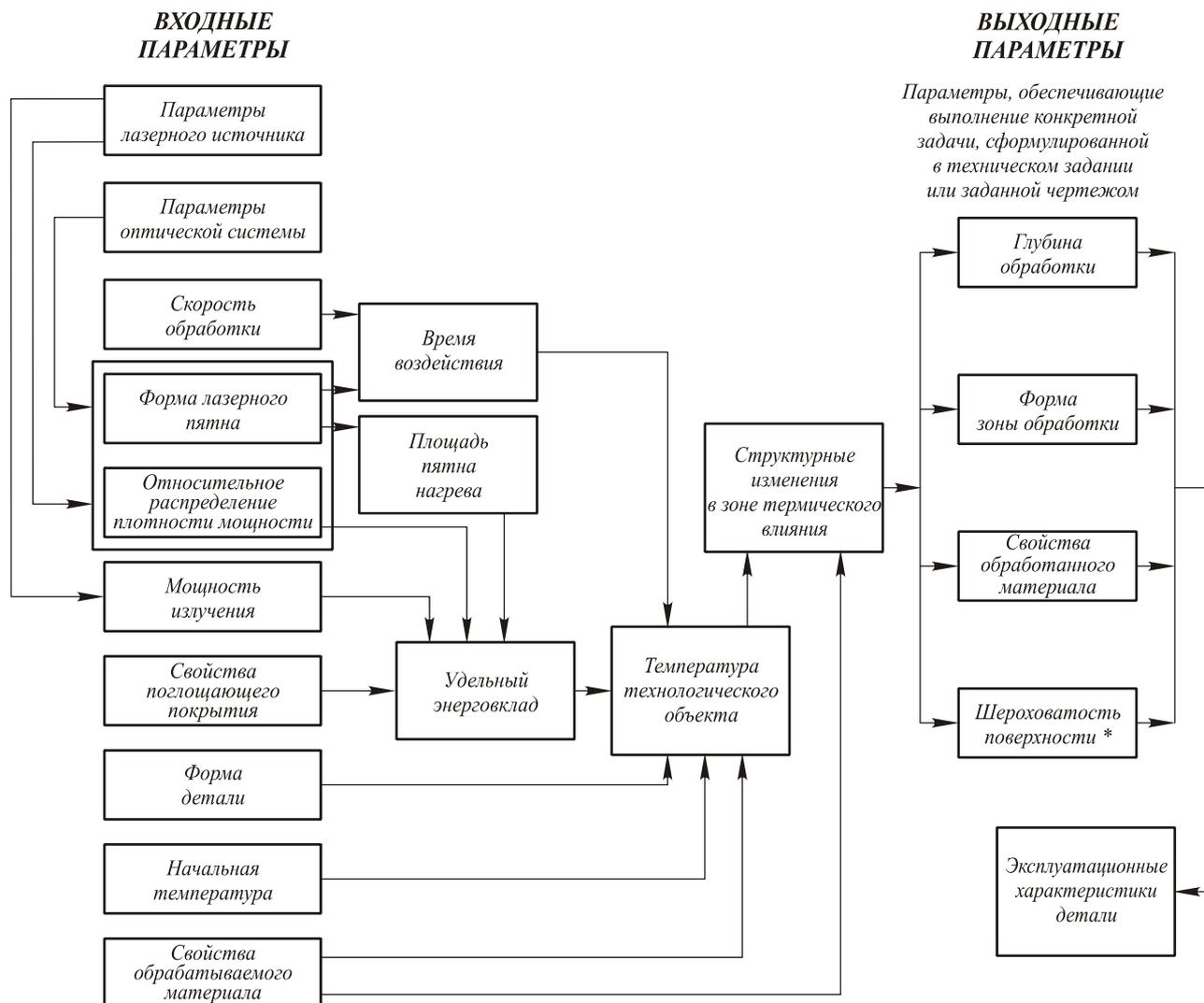


Рис. 1. Структурно-функциональная схема формирования эксплуатационных характеристик деталей при лазерной обработке непрерывным излучением

* При обработке без оплавления поверхности ее шероховатость практически не изменяется по сравнению с исходной

Рассматривают процесс нагрева полубесконечного тела или тонкой пластины энергетическим источником с равномерным или гауссовским круговым (иногда, однородным полосовым) распределением плотности мощности. Далее, строят расчетные номограммы для определения режимов обработки: мощности Q , скорости v относительного перемещения детали и лазерного пятна, радиуса пятна нагрева – при обработке непрерывным излучением; энергии E_n и длительности импульса τ_n , а также радиуса пятна нагрева – при импульсном воздействии. Причем при импульсной обработке чаще всего рассматривают стадию нагрева, используя известные аналитические решения дифференциального уравнения теплопроводности для одномерных моделей в линейной постановке [5, 6 и др.]. Не учитываются

температурные зависимости теплофизических характеристик и поглощательной способности облучаемого материала.

Разработанный технологический метод повышения эксплуатационных характеристик деталей с регулируемым пространственным распределением мощности излучения заключается в следующей последовательности:

- на основе анализа чертежа детали определяется требуемый температурный цикл в зоне термического влияния;
- определяется целесообразность применения и выбираются поглощающие покрытия;
- проводится расчет основных параметров режима обработки решением обратной задачи теплопроводности;

- осуществляется выбор оборудования и средств автоматизации, проводится расчет технологической оптической системы;

- выбирается дополнительная оснастка, приборы и приспособления;

- проводится отработка технологии на конкретных деталях с оценкой соответствия выходных параметров технологического процесса заданным;

- после проведения комплекса исследований эксплуатационных характеристик, в том случае, если они соответствуют требуемым, оформляется технологическая документация.

Отличительными особенностями предлагаемого подхода от традиционного являются то, что форма лазерного пятна и распределение плотности мощности излучения рассматриваются в качестве основных параметров режима обработки, выбор параметров лазерного источника и разработка технологических оптических систем проводится в соответствии с результатами решения обратной задачи теплопроводности.

Определение допустимой погрешности юстировки оптического элемента, требуемой точности задания параметров фокусируемого излучения и угла поворота фокусатора

Для применения фокусаторов излучения в технологических операциях лазерной обработки материалов целесообразно определить требования к юстировке оптического элемента и точности задания параметров формируемого излучения.

В работе [7] определены следующие характеристики погрешности юстировки фокусатора и параметров фокусируемого излучения:

- величины сдвига центра фокусируемого (падающего) пучка относительно центра оптического элемента в плоскости, перпендикулярной оптической оси: ΔU , ΔV , где U , V – координаты соответственно продольного и поперечного сечения оптического элемента.

- изменение ширины (апертуры) пучка при $\Delta R_\phi = \Delta r_\phi : \Delta R_\phi$, где R_ϕ – максимальный радиус фокусируемого пучка; r_ϕ – параметр фокусируемого пучка гауссовского распределения плотности мощности излучения, в котором интенсивность на расстоянии r от центра уменьшается в e раз по сравнению с интенсивностью в центре пучка;

- изменение параметра распределения интенсивности фокусируемого пучка при $R_\phi = const : \Delta r_\phi$.

При использовании динамических фокусаторов также необходимо определить допустимую величину изменения угла поворота ϕ оптического элемента: $\Delta \phi$.

Отклонение распределения плотности мощности характеризуют средняя ε_{qcp} и максимальная ε_{qmax} погрешности, которые определяются выражениями [7]:

$$\varepsilon_{qcp} = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{|q(\xi) - \tilde{q}(\xi)|}{q_{cp} L} d\xi; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{qmax} = \max \frac{|q(\xi) - \tilde{q}(\xi)|}{q_{cp}} \text{ при } \xi \in [-L/2; L/2], (2)$$

где $\tilde{q}(\xi)$ – распределение интенсивности излучения вдоль оси $O\xi$ в фокальной плоскости оптического элемента при изменении параметров юстировки, параметров формируемого излучения и угла поворота фокусатора;

$$q_{cp} = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{q(\xi)}{L} d\xi.$$

Принимаем максимальную температуру вдоль линии перемещения энергетического источника $\max[T(x, y, z)]_{z=h_0} = T(x)$. Тогда выражение для определения величин ε_{Tcp} и ε_{Tmax} , характеризующих отклонение температурного поля в технологическом объекте, можно представить в виде уравнений:

$$\varepsilon_{Tcp} = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{|T(x) - \tilde{T}(x)|}{T_{cp} L} dx; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{Tmax} = \max \frac{|\tilde{T}(x) - T(x)|}{T_{cp}}, \text{ при } x \in [-L/2; L/2], (4)$$

где $\tilde{T}(x)$ – максимальные значения температур по ширине зоны термического влияния, достигаемые на заданной глубине технологического объекта при изменении параметров юстировки, параметров формируемого излучения и угла поворота фокусатора;

$T_{cp} = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{T(x)}{L} dx$ – средняя величина максимальных значений температур по ширине зоны термического влияния, достигаемых на заданной глубине технологического объекта.

При проведении теоретических исследований используется модель фокусатора, преобразующего пучок с гауссовским (нормально-круговым) распределением интенсивности в параллельный проекции оси OU на фокальную плоскость полосовой источник с заданным распределением плотности мощности, имеющего следующие значения параметров: длина фокального отрезка $L_0 = 12 \cdot 10^{-3}$ м, фокусное расстояние оптического элемента $f = 1$ м, $R = 25 \cdot 10^{-3}$ м, $r = 17,5 \cdot 10^{-3}$ м. Значение параметров фокусируемого пучка: $R_\phi = r_\phi = 22 \cdot 10^{-3}$ м.

На рис. 2 представлено распределение интенсивности $\tilde{q}(\xi)$ вдоль полосового энергетического источника при сдвиге фокусируемого пучка вдоль проекции оси OU на плоскость OU_1 , перпендикулярную его оптической оси. На том краю полосового источника, к которому сдвигается проекция центра пучка, интенсивность излучения растет, а на другом краю – снижается.

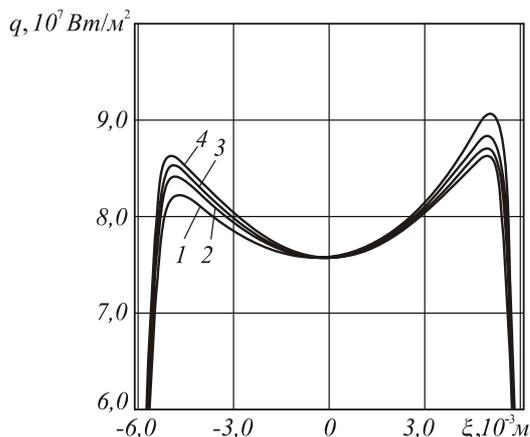


Рис. 2. Распределение интенсивности вдоль полосового энергетического источника при сдвиге фокусируемого пучка вдоль проекции оси $OУ$ на плоскость, перпендикулярную его оптической оси: $\Delta U_1, 10^{-3} \text{ м}$: 1 – 0; 2 – 0,15; 3 – 0,25; 4 – 0,5. $L_0 = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $f = 1 \text{ м}$, $R = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $r = 17,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Мощность излучения $Q = 10^3 \text{ Вт}$; $R_\phi = r_\phi = 22 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\phi = 0$

Так как фокусируемый пучок сдвигается в направлении тех слоев фокусатора, которые рассчитаны для работы в условиях экспоненциально малой интенсивности излучения, то возрастает q_{max} . Результаты расчета максимальных значений температур по ширине зоны термического влияния, достигаемых на глубине $h_\delta = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ технологического объекта из стали 40ХНМА в ходе термических циклов нагрева энергетическими источниками, движущимися со скоростью $v = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ и формируемыми при $\Delta U_1 = (0,15; 0,25; 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, представлены на рис. 3.

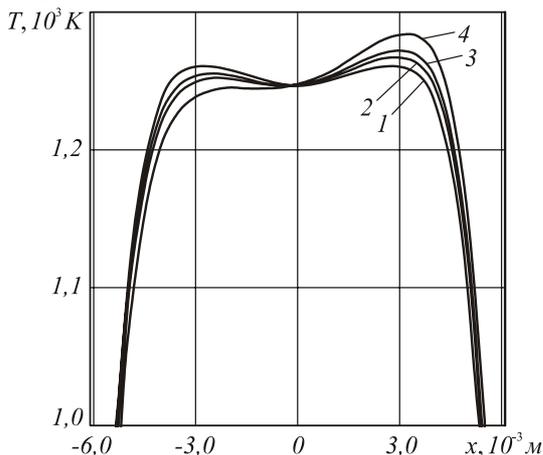


Рис. 3. Результаты расчета максимальных значений температур по ширине зоны термического влияния, достигаемых на глубине $h_\delta = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ технологического объекта из стали при нагреве энергетическими источниками, движущимися со скоростью $v = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$: $\Delta U_1, 10^{-3} \text{ м}$: 1 – 0; 2 – 0,15; 3 – 0,25; 4 – 0,5. $Q = 950 \text{ Вт}$; $R_\phi = r_\phi = 22 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\phi = 0$

При назначении режимов обработки целесообразно определить допустимые значения относительных величин отклонения скорости движения энергетического источника $\Delta v/v$ и его мощности $\Delta Q/Q$.

При скорости движения энергетического источника по поверхности технологического объекта из стали 40ХНМА равной $v = 1,3 \text{ м/с}$ на глубине $h_\delta = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$: $\varepsilon_{T_{\text{ср}}} = 1\%$ при $\Delta v/v = 2,5\%$ (рис. 4). При уменьшении скорости до $v = 0,7 \text{ м/с}$ величина относительного отклонения $\Delta v/v$ влияет на значение $\varepsilon_{T_{\text{ср}}}$ в меньшей степени: $\varepsilon_{T_{\text{ср}}} = 1\%$ при $\Delta v/v = 4,2\%$.

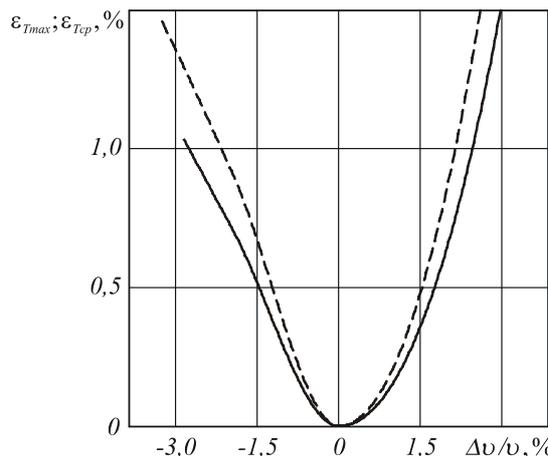


Рис. 4. Зависимости $\varepsilon_{T_{\text{ср}}}$ и $\varepsilon_{T_{\text{max}}}$ от $\Delta v/v$ на глубине $h_\delta = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ технологического объекта из стали 40ХНМА при движении со скоростью $v = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ энергетического источника, формируемого фокусатором, имеющим параметры: $L_0 = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $f = 1 \text{ м}$, $R = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $r = 17,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Значение параметров фокусируемого пучка: $R_\phi = r_\phi = 22 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Для титановых сплавов вследствие их низкой теплопроводности величина относительного отклонения $\Delta v/v$ в большей степени влияет на значение $\varepsilon_{T_{\text{ср}}}$.

В результате проведенных исследований установлено, что для применения динамического фокусатора в технологических процессах лазерной обработки деталей допустимая погрешность юстировки оптического элемента составляет $\Delta U_1 = \Delta V = 0,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, точность параметров фокусируемого излучения не должна быть ниже: $\Delta r_\phi/r_\phi = 3,1\%$; $\Delta R_\phi/R_\phi = 2\%$, а допустимая величина погрешности угла поворота ϕ динамического фокусатора равна $\Delta \phi = 2,3^\circ$.

Для листовых технологических объектов при аналогичных значениях ΔU_1 , $\Delta r_\phi/r_\phi$, $\Delta R_\phi/R_\phi$ и $\Delta \phi$ величины $\varepsilon_{T_{\text{ср}}}$ и $\varepsilon_{T_{\text{max}}}$, характеризующие отклонение температурного поля в технологическом объекте, меньше чем для объемных.

При температурах технологических объектов $T \approx 300$ К изменение величины мощности излучения $\Delta Q/Q$ приводит практически к линейному увеличению $\varepsilon_{T_{cp}}$ и $\varepsilon_{T_{max}}$. При увеличении температуры вследствие уменьшения коэффициента теплопроводности материалов влияние $\Delta Q/Q$ на $\varepsilon_{T_{cp}}$ и $\varepsilon_{T_{max}}$ снижается и составляет: $\varepsilon_{T_{cp}}; \varepsilon_{T_{max}} \leq (0,7 \dots 0,9) \Delta Q/Q$

Влияние изменения параметров юстировки, параметров формируемого излучения и угла поворота фокусатора на величину отклонения температуры от расчетной в исследуемых диапазонах скорости движения и мощности энергетических источников меньше, чем на отклонение плотности мощности.

Отклонения скорости движения энергетического источника для технологических объектов из конструкционной хромоникельмолибденовой улучшаемой стали 40ХНМА при $v \leq 1,3 \cdot 10^{-2}$ м/с, $Q \approx 950$ Вт не должно превышать $\Delta v/v = 2,5\%$. Отклонение мощности лазерного излучения от расчетной не должно превышать $\Delta Q/Q = 1,2\%$.

Заключение

Отличительными особенностями разработанного технологического метода повышения эксплуатационных характеристик деталей лазерной обработкой с регулируемым пространственным распределением мощности излучения являются то, что форма лазерного пятна и распределение плотности мощности излучения рассматриваются в качестве основных параметров режима обработки, выбор параметров лазерного источника и разработка технологических оптических систем проводится в соответствии с результатами решения обратной задачи теплопроводности.

Определено, что для применения фокусаторов в технологических процессах лазерной обработки деталей допустимая погрешность юстировки оптиче-

ского элемента составляет не более $\Delta U_l = \Delta V = 0,18 \cdot 10^{-3}$ м, точность параметров фокусируемого излучения не должна быть ниже: $\Delta r_\phi / r_\phi = 3,1\%$; $\Delta R_\phi / R_\phi = 2\%$, а допустимая величина погрешности угла поворота ϕ динамического фокусатора равна $\Delta \phi = 2,3^\circ$.

Отклонение скорости движения энергетического источника для технологических объектов из конструкционной хромоникельмолибденовой улучшаемой стали 40ХНМА при $v \leq 1,3 \cdot 10^{-2}$ м/с, $Q \approx 950$ Вт не должно превышать $\Delta v/v = 2,5\%$. Отклонение мощности лазерного излучения от расчетной не должно превышать $\Delta Q/Q = 1,2\%$.

Литература

1. Методы компьютерной оптики // Под ред. В.А. Соифера. М.: Физматлит, 2000. - 688 с.
2. 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.
3. Казанский Н.Л., Мордасов В.И., Мурзин С.П. Формирование энергетических потоков при проведении лазерной и комбинированной обработки материалов // Компьютерная оптика, Самара, ИСОИ РАН, 2003. Вып. 25. С.120-125.
4. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий // М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
5. Гуреев Д.М., Ямщиков С.В. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов: Учеб. пособие. Самара: Изд-во «Самарский университет», 2001. - 392 с.
6. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. М.: Машиностроение, 1985. - 496 с.
7. Данилов В.А., Дубов М.В., Исследование влияния искажений интенсивности освещающего пучка на работу фокусаторов // Компьютерная оптика: Физические основы / МЦНТИ, Институт общей физики АН СССР, Институт проблем передачи информации АН СССР. М., 1987. Вып. 1. С. 52-67.

Development of a technological method for increasing the operational characteristics of parts by laser treatment and determination of requirements for the application of beam focusators

S.P. Murzin¹

¹*Samara State Aerospace University (SSAU)*

Abstract

Successful implementation of technological processes of laser treatment is possible only if a certain spatial intensity profile is formed in a given area on the surface of the part. This is achieved by using special optical systems - beam focusators. A technological method was developed to improve the performance characteristics of parts with the adjustable spatial distribution of beam power. Distinctive features of the method areas follows: the shape of the laser spot and the distribution of the beam power density are considered as the main parameters of the treatment mode, the choice of parameters of the lasers ource and the development of technological optical systems is performed in accordance with the results of solving the inverse heat conduction problem. The permissible error of adjustment of the optical element and the required accuracy of setting the parameters of the focusable beam and the angle of rotation of the focusator are determined for use of focusators in technological processes of laser treatment of parts.

Keywords: method, laser treatment, part, beam, focusator.

Citation: Murzin SP. Development of a Technological Method for Increasing the Operational Characteristics of Parts by Laser Treatment and Determination of Requirements for the Application of Beam Focusators. *Computer Optics* 2006; 30: 44-48.

References:

- [1] Soifer VA, ed. *Methods for computer design of diffractive optical elements*. New York: John Willey & Sons Inc; 2002.
- [2] Murzin SP. Increasing the efficiency of laser treatment of materials using elements of computer optics. *J Adv Mater* 2003; 10(2): 181-185.
- [3] Kazanskiy NL, Mordasov VI, Murzin SP. Formation of energy flows during the laser and combined processing of materials [In Russian]. *Computer Optics* 2003; 25: 120-125.
- [4] Barvinok VA. Stressed state control and properties of plasma-sprayed coatings [In Russian]. Moscow: "Mashinostroenie" Publisher; 1990.
- [5] Gureev DM, Jamshchikov SV. *Fundamentals of physics of lasers and laser material processing* [In Russian]. Samara: Publishing House of Samara State Technical University; 2001.
- [6] Rykalin NN, Uglov AA, Zuev IV, Kokora AN. *Laser and electron beam processing of materials* [In Russian]. Moscow: "Mashinostroenie" Publisher; 1985.
- [7] Danilov VA, Dubov MV. Effects of distortions in incident-beam intensity on focusator operation. *Computer Optics: Physical Principles* 1987; 1(1): 39-49.