

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.

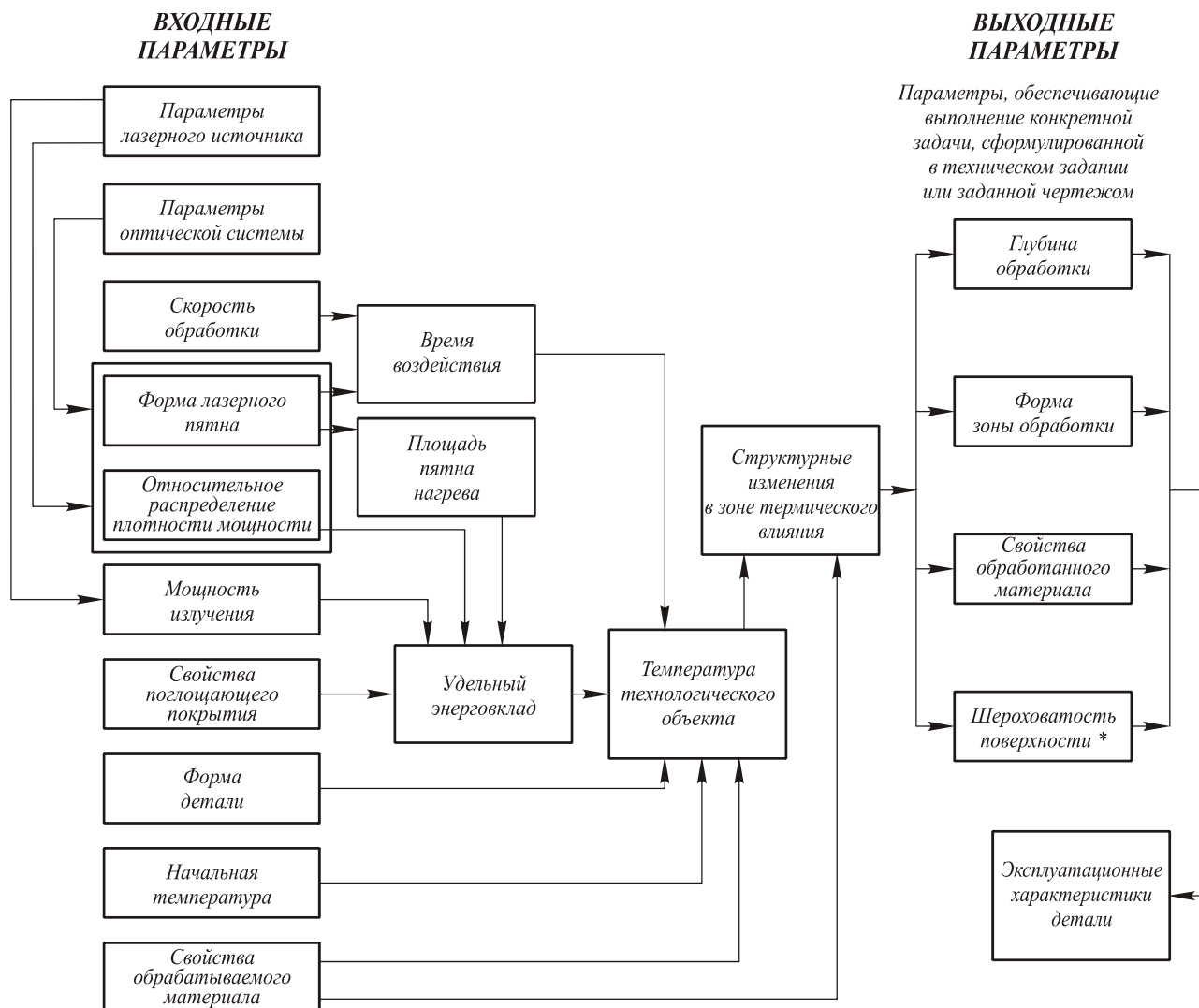


Рис. 1. Структурно-функциональная схема формирования эксплуатационных характеристик деталей при лазерной обработке непрерывным излучением

* 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.

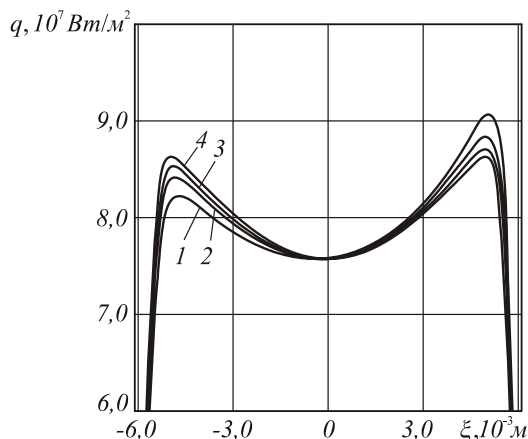


Рис. 2. Распределение интенсивности вдоль полосового энергетического источника при сдвиге фокусируемого пучка вдоль проекции оси OU на плоскость, перпендикулярную его оптической оси: $\Delta U_1, 10^{-3} \text{ м}$: 1 – 0; 2 – 0,15; 3 – 0,25; 4 – 0,5. $L_0 = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $f = 1 \text{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

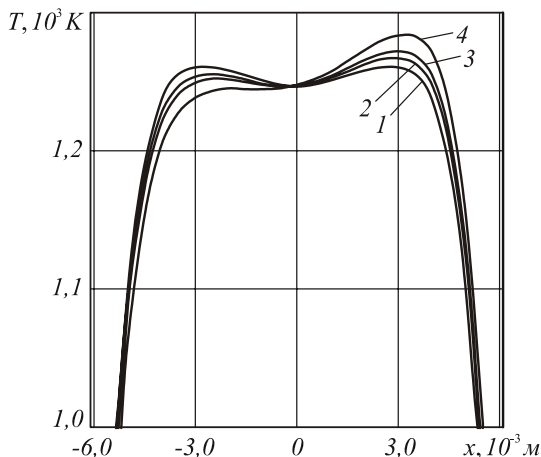


Рис. 3. Результаты расчета максимальных значений температур по ширине зоны термического влияния, достигаемых на глубине $h_\delta = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ технологического объекта из стали при нагреве энергетическими источниками, движущимися со скоростью $v = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$: $\Delta U_1, 10^{-3} \text{ м}$: 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 $\Delta v/v = 4,2\%$.

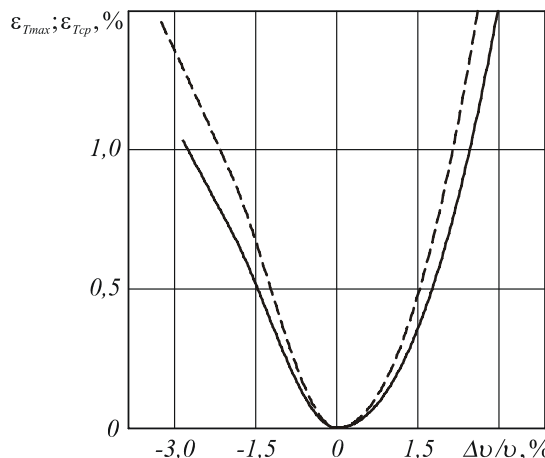


Рис. 4. Зависимости $\varepsilon_{T_{\text{ср}}}$ и $\varepsilon_{T_{\text{max}}}$ от $\Delta v/v$ на глубине $h_\delta = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ технологического объекта из стали 40ХНМА при движении со скоростью $v = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ энергетического источника, формируемого фокусатором,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