



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВНЕОСЕВЫХ ПУЧКОВ, СФОКУСИРОВАННЫХ ЗЕРКАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ

В. В. РОМАН, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Предложен способ формирования пространственных характеристик лазерного пучка, основанный на математической модели процесса фокусирования излучения сферическим зеркалом и методике оценки влияния пространственных характеристик лазерного пучка на тепловое состояние облучаемого тела. С его помощью достигается оптимальное пространственное распределение теплового источника на поверхности материала и, как следствие, повышается эффективность лазерной обработки и расширяются ее технологические возможности.

Ключевые слова: лазерная обработка, зеркальные системы, внеосевые пучки, мощность пучка, эффективность

Известно, что при каждом виде лазерной обработки пучок имеет свои оптимальные размеры, форму сечения и распределение мощности излучения [1–3]. Принимая во внимание существующую тенденцию использования лазерных центров, которые могут выполнять все операции лазерной обработки на базе одного излучателя [4], возникает необходимость использования универсальной системы для управления пространственными характеристиками пучка. При этом предпочтительнее системы с минимальным количеством оптических элементов [5]. Однако в настоящее время не существует дешевых и удобных в эксплуатации устройств, которые были бы способны в широком диапазоне управлять формой сечения пучка и распределением мощности его излучения [6].

Для фокусирования мощных лазерных пучков широко используют сферические зеркала. На рис. 1 показано фокусирование лазерного пучка

1 диаметром D , мощностью W и расходимостью Q , падающего на сферическое зеркало 2 с радиусом кривизны R под углом α . При фокусировании сферическим зеркалом внеосевого лазерного пучка возникает два фокуса — меридиональный F_1 и сагиттальный F_2 , в которых излучение формируется в линиях MN и HG (рис. 1 и 2), лежащих в двух взаимно перпендикулярных плоскостях соответственно сагиттальной F_2EG и меридиональной F_1AB . Это приводит к искажениям формы сечения пучка и распределения интенсивности по нему. При лазерной обработке эти искажения стремятся уменьшить. В настоящей работе предлагается, наоборот, их увеличить для формирования пространственных характеристик лазерного пучка с целью повышения его эффективности и расширения технологических возможностей обработки.

Определение пространственных характеристик лазерного излучения, сфокусированного сферическим зеркалом, и оценка их влияния на тепловое состояние облучаемого материала.

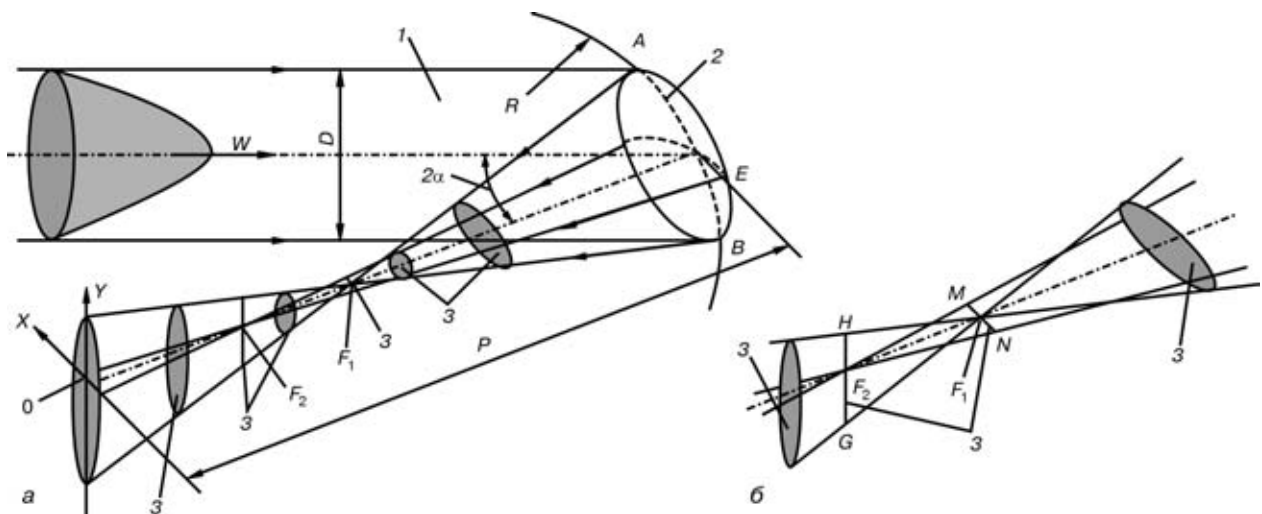


Рис. 1. Схема фокусирования луча сферическим зеркалом: *a* — общий вид; *б* — положение меридионального и сагиттального фокусов; *1* — исходный пучок; *2* — сферическое зеркало; *3* — форма сечения сфокусированного луча (остальные обозначения см. в тексте)

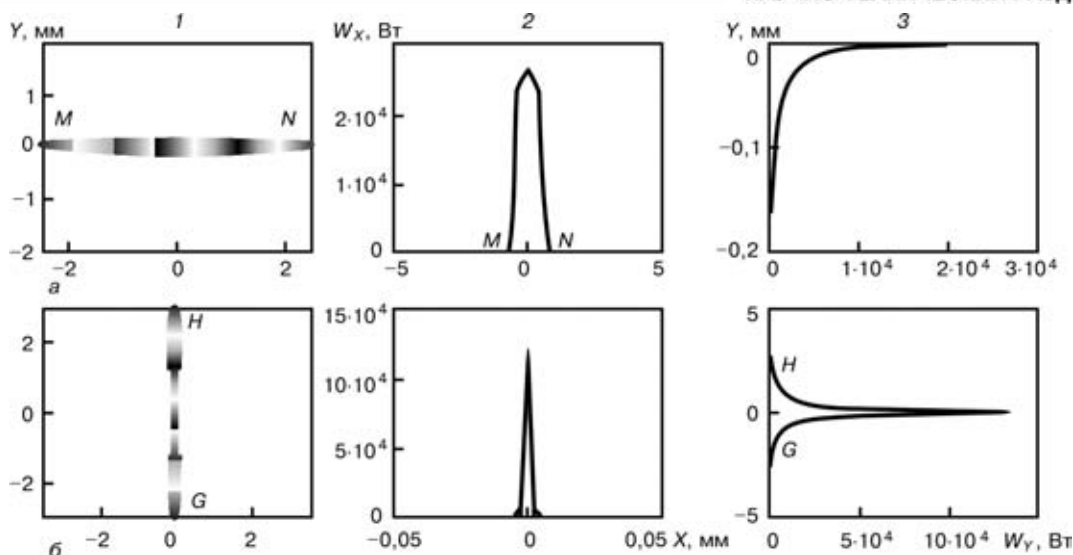


Рис. 2. Пространственные структуры лазерного излучения, сфокусированного сферическим зеркалом в меридиональном (а) и сагиттальном (б) фокусах при $D = 42$ мм; $R = 1600$ мм; $W = 1100$ Вт; $\alpha = 20^\circ$, $\theta = 0$ мрад: а – $P = 751,5$; б – $851,0$ мм; 1 – сечение пучка в фокусах; 2, 3 – распределение мощности соответственно вдоль осей Y и X

Для создания математической модели процесса фокусирования лазерного излучения сферическим зеркалом определены факторы, характеризующие пространственную структуру сформированного пучка (см. рис. 1). При этом отобраны именно те, которые необходимо учитывать при создании математической модели. К ним относятся пространственные характеристики исходного пучка (θ , D , W), радиус кривизны R зеркала, угол падения α на него пучка излучения и расстояние P от сферического зеркала до детали.

Основываясь на принципах геометрической оптики и схеме «лучевого пакета», для определения искажений формы сечения и распределения мощности сфокусированного пучка создана методика [7], в соответствии с которой расчет пространственной структуры выполняется в следующей последовательности.

Исходный лазерный пучок представляется в виде пакета лучей; определяется направление распространения каждого из лучей пакета после их отражения от сферического зеркала; задается площадь фокусирования; находятся точки пересечения лучей с плоскостью фокусирования (их совокупность определяет форму сечения сфокусированного пучка); рассчитывается мощность, сконцентрированная в каждом элементе пакета; определяется, в какие элементы плоскости фокусирования попадает каждый из лучей пакета и рассчитывается мощность в любой ее точке.

Результаты экспериментов, проведенных с гауссовым пучком при $W = 3$ Вт, $\theta = 0,75$ мрад, $\alpha = 20^\circ$ (рис. 3, 4), соответствуют расчетной модели с точностью 15...20 %. Как видно из рис. 3,

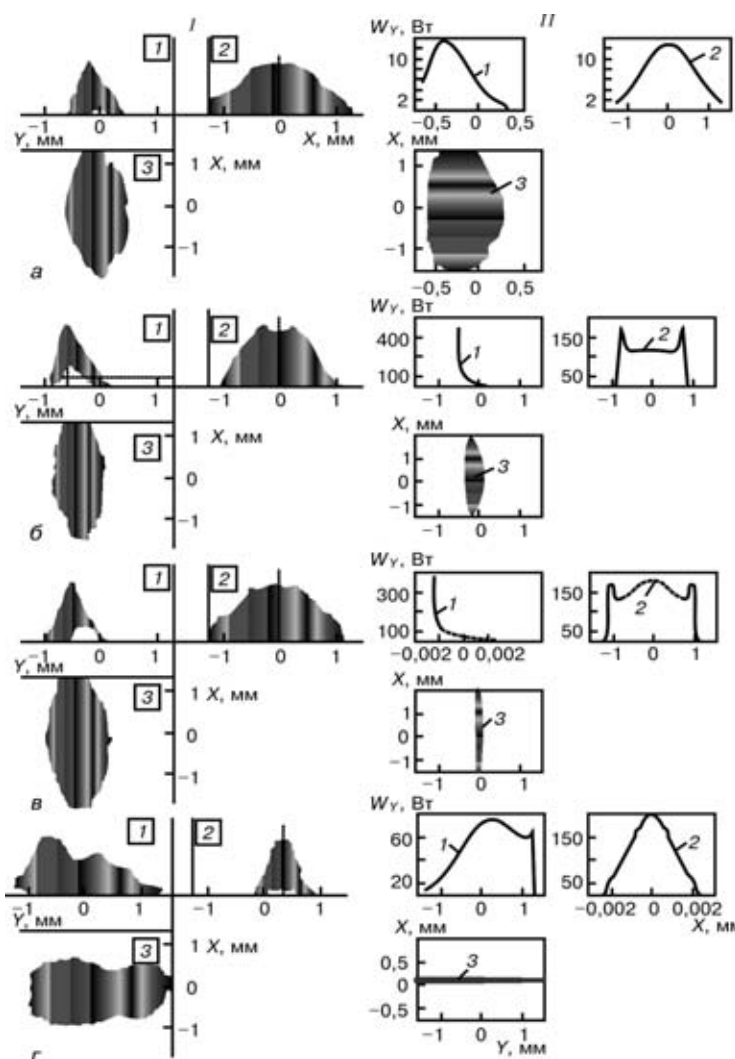


Рис. 3. Пространственные структуры лазерного излучения с гауссовым распределением мощности, сфокусированного сферическим зеркалом, которые получены с помощью эксперимента (I) и расчетов (II) при $D = 42$ мм; $R = 1600$ мм; $W = 1100$ Вт; $\alpha = 20^\circ$; $\theta = 0,75$ мрад: а – $P = 743$; б – 750 ; в – 754 ; г – 850 мм; 1 – сечение пучка на поверхности обработки; 2, 3 – распределение мощности соответственно вдоль осей Y и X

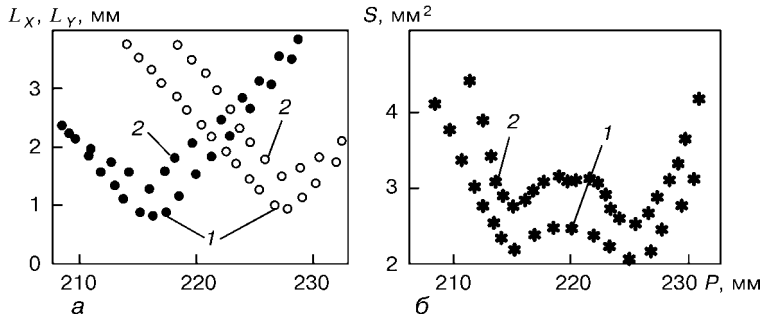


Рис. 4. Зависимость размеров сечения пучка L_x, L_y (а) и площади S (б) от расстояния P между сферическим зеркалом и плоскостью фокусирования, полученная с помощью расчетов (1) и эксперимента (2) при $D = 15$ мм; $R = 450$ мм; $W = 3$ Вт; $\alpha = 20^\circ$; $\theta = 0,75$ мрад: ●, ○ — размеры пучка соответственно вдоль оси Y, X ; * — площадь сечения пучка

4, размеры сечения луча, полученные с помощью математической модели, несколько меньше экспериментальных. Это можно объяснить тем, что лазерное излучение при расчетах принималось ограниченным эффективным диаметром гауссового пучка.

С помощью полученной модели проведено исследование процесса фокусирования лазерного излучения сферическим зеркалом. Это позволило определить закономерности искажений пространственной структуры излучения и показало возможности их изменения в широком диапазоне (см. рис. 2, 3).

Для оптимального использования лазерного пучка с различными пространственными структурами целесообразно определить их влияние на тепловое состояние облучаемого материала. С этой целью, основываясь на методе конечных разностей, разработана методика [8], применимая для тела, форму которого можно описать математическим путем. Эта методика позволяет рассчитать температурные поля, возникающие вследствие воздействия пучка с любыми пространственно-временными характеристиками при условии температурной зависимости свойств материала облученного тела и проникновения излучения в его глубину.

Описанные выше методики доказали возможность управления в широком диапазоне тепловым

состоянием детали благодаря использованию аберраций сферических зеркал и показали, что изменение направления движения луча по поверхности детали позволяет плавно изменять скорость охлаждения тела на его поверхности от 500 до $3 \cdot 10^4$ К/с.

Фокусирующая система для формирования пространственных характеристик излучения.

Для реализации приведенных рекомендаций разработана фокусирующая система на базе сферического зеркала [9], а также методика подбора ее оптических параметров и размеров сечения первичного пучка в зависимости от характеристик излучения,

которое необходимо получить на поверхности детали. В этой системе сферическое зеркало выполняет одновременно две функции: традиционную — фокусирует излучение в пятно с заданной плотностью мощности; нетрадиционную — формирует пространственную структуру пучка (рис. 5). Система работает следующим образом. Лазерный пучок 1, проходя через устройство для изменения размеров его сечения 2 (например, телескопическая система, диафрагма), попадает на плоское зеркало 3, которое может вращаться вокруг своей оси, параллельной оси OX , и двигаться вдоль направления оси OZ . Отразившись от плоского зеркала, пучок попадает на сферическое зеркало 4, которое вращается вокруг касательной к центру отражающей поверхности оси, параллельной OX . Движение зеркал дает возможность изменять угол падения луча α на сферическое зеркало. Зеркало 4 направляет лазерный пучок на обрабатываемую поверхность 5. Устройство размещено на подвижной платформе, которая может перемещаться вдоль оси OZ , что дает возможность изменять расстояние P от сферического зеркала до плоскости фокусирования 5. Изменение радиуса кривизны R зеркала 4 достигалось путем его замены.

Эффективность разработанной оптической системы проверена при лазерном упрочнении, легировании и наплавке. При этом для сравнения использовались лучи с равномерным распределением ее максимума относительно центра (деталь расположена возле меридионального фокуса сферического зеркала (см. рис. 3, б)).

Применение пучка с максимумом на переднем фронте и пологим задним фронтом (при плотности мощности излучения $W_p = 1,9 \cdot 10^4$ Вт/см², скорости перемещения пучка $v = 33$ мм/с; $\alpha = 20^\circ$; $R = 1600$ мм; $D = 41$ мм; $P = 745$ мм; $\theta = 5$ мрад) после обработки позволило получить более однородный слой и избежать образования в нем трещин при упрочнении матриц и пуансонов штампов, выполненных из стали У10 (рис. 6, а, б), а также в случае легирования лопатки газовой турбины (из стали ЖС6К) порошком ХТН (12Х18Н10Т, TiB, CrB) параметры пучка при этом составляли $W_p = 2,3 \cdot 10^5$ Вт/см²; $v = 20$ мм/с; $\alpha = 15^\circ$; $R = 1600$ мм; $D = 41$ мм; $P = 770$ мм; $\theta = 5$ мрад.

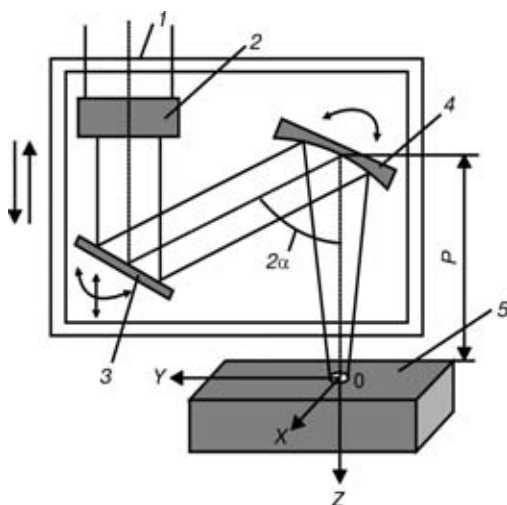


Рис. 5. Схема устройства для фокусирования лазерного излучения в пятно с заданными характеристиками (обозначения см. в тексте)

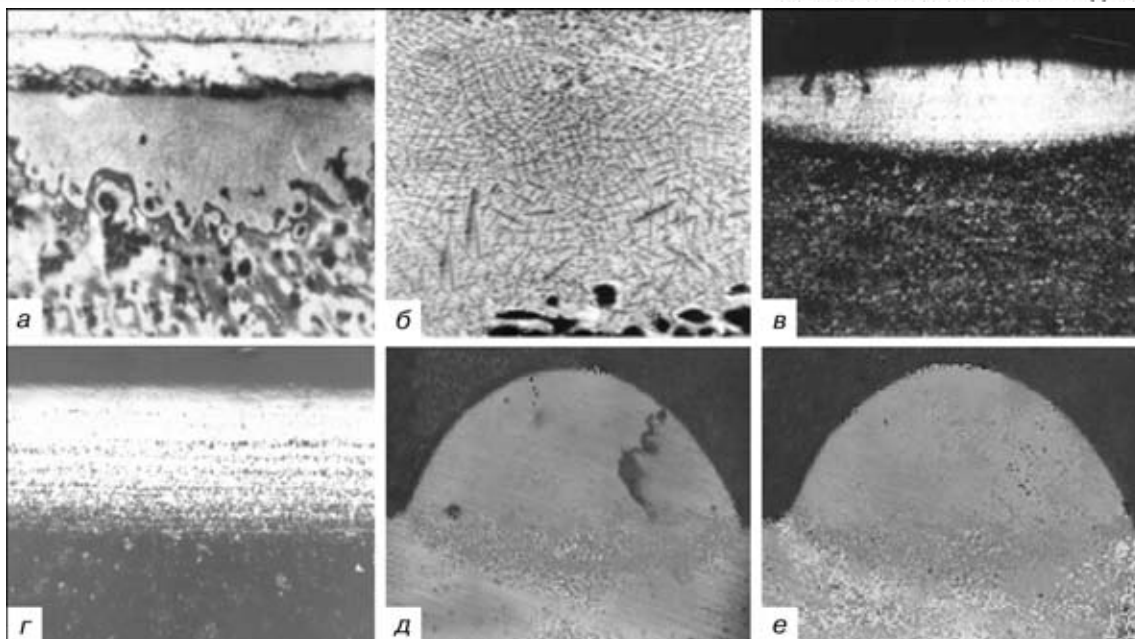


Рис. 6. Микроструктура упрочненных слоев в стали У10 (а, б) (X160), чугуна ВЧ50 (в, г) (X 160) и макроструктура наплавленных валков на сталь 45 (д, е) (X32): а, в, д — пучок с равномерным распределением мощности; б, г, е — профилированный пучок

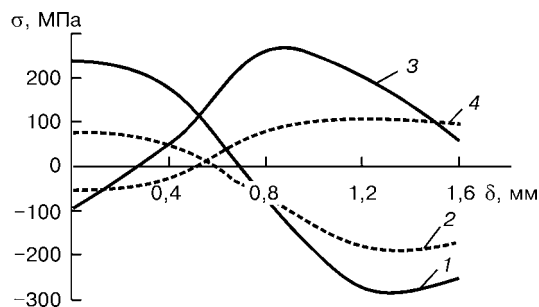


Рис. 7. Остаточные напряжения в валках, полученных при наплавке порошками ПГ-СР4 (1, 2) и ХТН (3, 4): 1, 3 — непрофилированные пучки; 2, 4 — профилированные

В случае поверхностного упрочнения зубчатых колес масляного насоса, изготовленных из чугуна ВЧ50 (при $W_p = 6 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$; $v = 8,5 \text{ мм/с}$; $\alpha = 25^\circ$; $R = 1600 \text{ мм}$; $D = 41 \text{ мм}$; $P = 722 \text{ мм}$; $\theta = 5 \text{ мрад}$), использование аналогичной схемы обработки позволило получить однородный упрочненный слой на большей глубине (рис. 6, в, г). В переходной области наблюдалось не столь резкое изменение твердости по сравнению с обработкой пучком с равномерным распределением мощности.

Использование пучка с неравномерным распределением мощности (при $\alpha = 20^\circ$; $R = 1600 \text{ мм}$; $D = 42 \text{ мм}$; $P = 745 \text{ мм}$; $\theta = 5 \text{ мрад}$) позволяет также избежать образования трещин, в 1,4 раза уменьшить сжимающие и в 2,2 раза растягивающие напряжения в наплавленных на стальную основу (сталь 45) валках самофлюсующихся сплавов (ХТН и ПГ-СР4) (рис. 6, д, е и 7). Напряжения измеряли в образцах размером $80 \times 754 \text{ мм}$ методом послойного стравливания [6].

Исходя из изложенного выше можно сделать ряд заключений. Оптимальные пространственные характеристики пучка для лазерного упрочнения могут быть получены при большом угле падения излучения на сферическое зеркало ($\alpha > 20^\circ$) и размещении поверхности детали возле меридио-

нального фокуса (см. рис. 3, б). Это дает возможность проводить обработку широкой полосы и получать равномерный упрочненный слой. Направление движения пучка следует выбирать таким образом, чтобы на материал действовала сначала его часть, имеющая минимальную интенсивность, а потом — максимальную, что позволяет увеличивать поглощательную способность поверхности за счет нагрева и окисления, а следовательно, более эффективно использовать энергию излучения.

При обработке материалов, первичная структура которых содержит углерод в компактной форме (например, в виде сфероидального графита), использование аналогичного распределения мощности также является целесообразным. Однако при противоположной схеме обработки необходимо, чтобы сначала на материал действовала часть сечения пучка с максимальной мощностью, а потом — с минимальной. За счет этого снижается скорость охлаждения детали и увеличивается время выдержки материала при фиксированной температуре, что приводит к более полному протеканию диффузионных процессов (более полному распределению углерода), и, как следствие, способствует образованию однородного упрочненного слоя на большей глубине и менее резкому изменению твердости в переходной области. При наплавке существование значительного градиента температур по глубине в зоне термического воздействия пучка может вызвать образование трещин в наплавленных валках и материале основы. Для уменьшения вероятности их появления целесообразно использовать схему обработки и пространственные характеристики пучка, аналогичные случаю, указанному выше, но при большей плотности мощности. Вследствие уменьшения скорости охлаждения кристаллизация верхних зон происходит тогда, когда нижние слои еще находятся в пластическом состоянии. Благодаря этому возникает возможность протекания релаксационных процессов.



Разделение хрупких материалов методом лазерного термораскалывания целесообразно проводить при размещении детали в сагиттальном фокусе (при $\alpha = 10^\circ$; $R = 1600$ мм; $D = 41$ мм; $P = 812$ мм; $\theta = 5$ мрад), где сечение излучения имеет вытянутую форму с максимумом мощности в центре. В этом случае при движении луча вдоль оси OY в конфигурации термонапряжений преобладает составляющая, перпендикулярная направлению раскола.

При сварке встык пластин из разнородных материалов для того, чтобы максимум температур находился в зоне контакта тел, необходимо смещать максимум мощности лазерного пучка на более теплопроводный материал [3], т. е. использовать луч, который формируется сферическим зеркалом возле меридионального (см. рис. 2, а) или сагиттального (см. рис. 3, з) фокусов (при $\alpha = 25^\circ$; $R = 1600$ мм; $D = 41$ мм; $P = 726$ или $P = 875$ мм; $\theta = 5$ мрад). Направление движения пучка должно быть параллельным оси OX .

Аналогичные пространственные характеристики излучения на поверхности материала целесообразно использовать при упрочнении деталей с ограниченными условиями теплоотвода (клина), что позволяет создать в детали почти равномерное распределение температуры.

1. *Снижение трещинообразования при оплавлении покрытий из самодиффундирующих сплавов лазерным лучом* // В. Н. Чачин, М. А. Кардополова, Н. В. Спиридонов и др. // Физика и химия обраб. материалов. — 1991. — № 1. — С. 125–131.
2. *Звелмо О. Принципы лазеров.* — М.: Мир, 1990. — 558 с.
3. *Рыкалин Н. Н., Углов А. А.* Температурное поле разнородных материалов при сварке встык поверхностным источником // Физика и химия обраб. материалов. — 1969. — № 5. — С. 13–23.
4. *Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н.* Лазерная техника и технология: В 7 т. — М.: Высш. шк., 1988. — Т. 5. Лазерная сварка металлов. — 207 с.
5. *Fast and compact adaptive mirror* / M. Huonker, G. Waibel, A. Giesen, H. Hugel // Lasers in material processing. SPIE. — 1997. — Vol. 3097. — P. 310–319.
6. *Коваленко В. С., Головки Л. Ф., Черненко В. С.* Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. — Киев: Техника, 1990. — 192 с.
7. *Головки Л. Ф., Роман В. В., Кансо Зияд.* Нетрадиційне використання сферичних дзеркал при лазерній обробці // Наук. вісті Нац. техн. ун-ту України «КП». — 1999. — № 2. — С. 85–90.
8. *Головки Л. Ф., Роман В. В., Дувейко Джавад.* Вплив просторово-часового розподілу лазерного променя на тепловий стан тіла, що опромінюється // Там же. — 2002. — № 1. — С. 80–86.
9. *Пат. 42237А Україна, МПК В 23 К 26/06.* Пристрій для фокусування лазерного випромінювання у пляму з заданими характеристиками / Л. Ф. Головки, В. В. Роман (Україна) НТУУ. — Опубл. 15.10.2001; Бюл. «Промислова власність 2001», № 3.

Method of formation of space characteristics of a laser beam, based on a mathematical model of process of focusing radiation by a spherical mirror and procedure of evaluating the effect of space characteristics of a laser beam on heat state of the body radiated, has been suggested. Using this method the optimum space distribution of heat source over the material surface is attained and, as a consequence, the efficiency of a laser treatment is increased and its technological capabilities are widened.

Поступила в редакцию 05.03.2002

Приглашаем принять участие во Всероссийской с международным участием конференции

**«Сварка на рубеже веков»,
посвященной 100-летию со дня рождения Г. А. Николаева
20–21 января 2003 г., Москва**

Организаторы конференции:

*Министерство образования РФ, Министерство промышленности, науки технологий РФ,
Российская академия наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ИЭС им. Е. О. Патона*

Тематика конференции:

- сварные конструкции
- оборудование и технология сварки
- диагностика и контроль качества сварных изделий
- подготовка и аттестация персонала

Оргкомитет конференции:

*президент — Б. Е. Патон, академик, президент НАН Украины;
председатель — И. Б. Федоров, ректор МГТУ им. Н. Э. Баумана;
ответственный секретарь — А. В. Коновалов*

*Адрес: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, МГТУ им. Н. Э. Баумана.
Тел./факс: (095) 261 4257, тел.: (095) 263 6802, (095) 263 6742
E-mail: avk@bmstu.ru*