

УДК 535. 317

Дифракционные фокусаторы луча для технологических  $\text{CO}_2$  — лазеров / В.А. Данилов, П.Е. Дубовский, И.Б. Ковш, М.В. Политов, И.Н. Сасикян // Научное приборостроение. — 1993. — Т.3. — №1: Дифракционная плоская оптика и обработка изображений. — С.64—71.

Сообщается об экспериментальных результатах тепловой лазерной обработки с помощью фокусаторов. Фокусаторы позволяют преобразовать лазерный луч таким образом, чтобы получалось заданное распределение интенсивностей вдоль фокальной линии. Фокусирование осуществляется путем создания сложной поверхности, форма которой зависит от фокальной линии и распределения интенсивности вдоль этой линии, а также от параметров падающего луча (фазы и интенсивности).

Обработка лучами, формируемыми фокусаторами, значительно улучшает рабочие характеристики обработанных лазером деталей, повышает производительность и снижает стоимость материалов. Библиография. 5 назв. Иллюстраций. 4.

---

В. А. Данилов

(ЦКБ уникального приборостроения РАН, Москва)

П. Е. Дубовский, И. Б. Ковш

(Институт машиноведения РАН, Москва)

М. В. Политов, И. Н. Сисакян

(ЦКБ уникального приборостроения РАН, Москва)

### ДИФРАКЦИОННЫЕ ФОКУСАТОРЫ ЛУЧА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРОВ

*Experimental results are reported for laser-induced heat treatment with focusators. Focusators allow one to transform a laser beam so as to produce a specified intensity distribution along the focal curve. The focusing is realised by creating a complex surface whose shape depends on the focal curve and the intensity distribution along this curve, as well as on parameters of the incident beam (phase and intensity). Processing with focusator-shaped beams considerably improved the operating characteristics of laser treated details, improved the productivity and cut down the cost of materials.*

Лазерные методы обработки материалов являются перспективным направлением технологии машиностроения и все более широко внедряются в промышленное производство. В большинстве случаев рабочая зона при лазерной обработке имеет форму круга. Такая форма рабочей зоны из-за многообразия технологических приемов обработки (сварка, резка, термообработка и т.д.) и форм обрабатываемых деталей далеко не всегда является оптимальной. Например, термообработку плоских деталей большой площади желательнее производить лучом с поперечным сечением в виде узкой полоски ("полосковый луч"). Такая обработка позволяет повысить однородность упрочненного слоя за счет устранения стыков отдельных "дорожек упрочнения", неизбежно возникающих при обработке лучом поверхностей большой площади. Для обработки поверхностей цилиндрической формы удобно использовать кольцевой луч, а для скоростной пайки — многоточечный луч, что позволяет существенно упростить систему позиционирования обрабатываемой детали и сократить время, затрачиваемое на пайку.

Перечень подобных примеров можно продолжить, однако и сказанное достаточно ясно свидетельствует, что варьирование геометрии рабочей зоны в соответствии с технологической задачей и формой обрабатываемой детали может повысить качество и производительность лазерной обработки. Не меньшее значение имеет и управление распределением интенсивности лазерного излучения в рабочей зоне, которое, как и варьирование геометрии последней, существенно расширило бы технологические возможности лазерной обработки.

Для некоторых простых случаев задача управления геометрией рабочей зоны может быть решена с помощью элементов классической оптики — линз и зеркал. Например, цилиндрическая линза фокусирует лазерное излучение в отрезок прямой линии, но распределение интенсивности вдоль этого отрезка

зависит от распределения интенсивности падающего на линзу излучения и является неуправляемым. Кроме того, ограниченная лучевая стойкость и невысокие механические характеристики существенно ограничивают применение проходной оптики для ЛТУ с  $\text{CO}_2$ -лазерами, особенно при мощностях более 1 кВт.

Плоское пятно любой формы может быть реализовано при использовании сканаторов, обеспечивающих штриховку обрабатываемой поверхности быстро перемещающимся сфокусированным лучом. Такой подход требует создания сложных оптико-механических систем с быстро колеблющимися (обычно 300–1000 Гц) охлаждаемыми зеркалами, причем, чем мощнее лазерный луч и, соответственно, больше размеры колеблющихся зеркал и больше необходимая интенсивность их охлаждения, тем труднее реализовать большие частоты колебаний зеркал. Поэтому для промышленного применения использование неподвижных оптических элементов представляется более простым и перспективным.

Задача фокусировки лазерного излучения в заданную область пространства с заданным распределением интенсивности излучения может быть решена с помощью разработанных оптических элементов, использующих дифракцию на структурированной поверхности, — фокусаторов лазерного излучения. Исследования работы фокусаторов, преобразующих пучки маломощных лазеров, показали их способность решить поставленную задачу. Однако при создании фокусаторов для технологических  $\text{CO}_2$ -лазеров необходимо было учесть специфику работы этих лазеров. В первую очередь, необходима проверка возможности получения заданной геометрии рабочей зоны, термостабильности фокусатора при длительной работе, строгости требований к точности установки фокусатора относительно лазерного излучения, а также возможности управления распределением интенсивности излучения в фокальном пятне.

Ниже приводятся результаты испытаний фокусаторов для мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров и обсуждаются перспективы применения фокусаторов в ЛТУ.

Процесс изготовления фокусатора состоит из следующих этапов:

- 1) выбор математической модели и получение исходных уравнений для расчета формы поверхности;
- 2) расчет на ЭВМ формы поверхности;
- 3) изготовление на прецизионном фотопостроителе, управляемом ЭВМ, амплитудной маски, в которой плотность почернения соответствует высоте рельефа (или комплекта фотошаблонов);
- 4) изготовление поверхностного рельефа из неметаллического материала (например, методом вымывного рельефа на желатине или фотолитографическими методами) и его реплики;
- 5) электролитическое наращивание гальванокopий или матриц для штамповки элементов. Последние два этапа могут быть заменены непосредственным травлением медного зеркала.

Алгоритмы расчета поверхностей фокусаторов для различных форм фокального пятна приведены в [1–4].

Метод вымывного рельефа обеспечивает точность, достаточную для создания фокусаторов излучения  $\text{CO}_2$ -лазеров ( $\lambda = 10,6$  мкм). Опытные образцы таких фокусаторов выполнены в виде плоской металлической пластины, на поверхность которой нанесен геометрический рельеф. Пластина с рельефом устанавливается в металлический корпус, внутри которого имеется полость для протока воды, охлаждающей фокусатор.

Фокусатор характеризуется следующими параметрами:

- размерами апертуры фокусатора (или поперечными размерами пучка излучения, для работы с которым рассчитан фокусатор);
- распределением интенсивности освещающего пучка;
- углом падения излучения на фокусатор ( $\alpha$ );
- фокусным расстоянием ( $f$ );
- геометрическими размерами области фокусировки;
- распределением интенсивности в пятне фокусировки.

Эти параметры являются исходными при расчете формы поверхности фокусатора.

Технология изготовления фокусатора определяет:

— энергетическую эффективность (отношение доли мощности, направляемой в область фокусировки, к полной мощности излучения, падающего на фокусатор);

— радиационную стойкость (среднее по поверхности фокусатора значение плотности мощности излучения, падающего на фокусатор, при котором обеспечиваются заданные размеры и распределение интенсивности в области фокусировки).

Все исследованные образцы фокусаторов были рассчитаны для работы с

лазерным пучком диаметром 40 мм (по уровню 0,01) при  $\alpha = 45^\circ$ , что позволяло одновременно с фокусировкой излучения осуществить его поворот на  $90^\circ$ . Использовались фокусаторы, рассчитанные на формирование полосчатого луча с размерами фокального пятна  $20 \times 0,6$  и  $30 \times 0,8$  мм с равномерным распределением интенсивности по длине полоски, такого же луча с увеличенной на концах полоски интенсивностью и фокусаторы, формирующие кольцевой луч диаметром 40 мм при ширине кольца 1 мм. Расчетные значения фокусных расстояний  $f$  составляют 250—600 мм.

Параметры фокусаторов предварительно определялись путем визуализации ИК-излучения при относительно небольшой мощности (50—100 Вт), а затем проводились их испытания при высоких мощностях ( $\geq 3$  кВт). Форма и размеры фокального пятна, а также распределение интенсивности в нем определялись в этом случае по отпечаткам лазерного луча на оргстекле и практически не отличались от соответствующих параметров, измеренных при малой мощности (при одинаковой расхождении пучков).

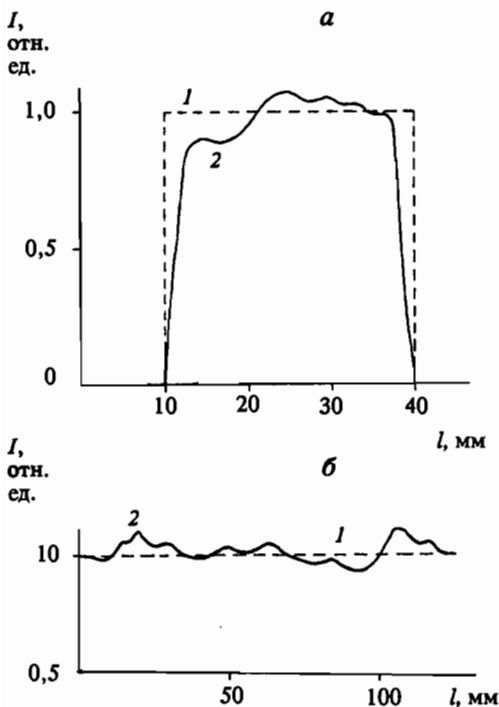


Рис. 1. Распределение интенсивности излучения по длине полоски в полосковом луче (а) и по длине окружности в кольцевом луче (б), сформированных фокусатором из одномодового излучения.

1 — расчет, 2 — эксперимент.

Как при большой, так и при малой мощности длина полоски и диаметр кольца совпадали с расчетными значениями, а ширина полоски и толщина кольца не превышали расчетные величины на 10—20%, что было вызвано погрешностями технологии изготовления фокусаторов и искажениями гауссова профиля лазерного пучка, падающего на фокусатор. Распределение интенсивности в фокальном пятне при профиле лазерного пучка, близком к гауссову, также было близко к расчетному (рис. 1). В случае многомодового пучка увеличивается ширина фокальной линии при неизменной ее длине (диаметре — для кольца) и изменяется фокусное расстояние фокусатора. Степень этих изменений зависит в основном от расходимости лазерного излучения и может достигать двух раз для ширины фокальной линии и 30% для фокусного расстояния. Распределение интенсивности в фокальном пятне остается достаточно близким к расчетному (рис. 2) и пригодным, например, для поверхностной термообработки, поскольку вариации интенсивности по длине полоски, обусловленные наличием в исходном лазерном пучке "горячих" зон, относительно невелики ( $\leq 20\%$ ).

С помощью визуализатора ИК-излучения было проведено сравнение качества фокусировки, обеспечиваемое цилиндрической линзой и плоским фокусатором, при одинаковом качестве лазерного излучения (многомодовый режим). На фотографиях фокальных пятен, сформированных фокусатором (рис. 3, а) и цилиндрической линзой (рис. 3, б), видно, что фокусатор обеспечивает существенно более высокое качество фокусировки. Фокальная область, формируемая фокусатором, по форме ближе к прямоугольнику и имеет значительно более равномерное распределение интенсивности по длине. Ширина фокальной линии, сформированной цилиндрической линзой, сильно неравномерна по всей длине линии, столь же неравномерно и распределение интенсивности излучения вдоль линии.

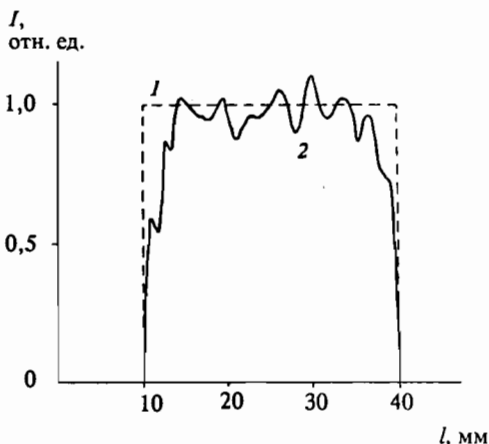


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения по длине полоски в полосковом луче, сформированном фокусатором из многомодового излучения.

1 — расчет для гауссова пучка, 2 — эксперимент.



Рис. 3. Фокальные пятна, сформированные фокусатором (а) и цилиндрической линзой (б).

Помимо изучения влияния модового состава лазерного излучения на пространственные характеристики пучков, формируемых фокусаторами, было исследовано влияние на эти характеристики погрешностей установки фокусатора относительно оси падающего на него пучка излучения, а также влияние диаметра этого пучка на качество фокусировки. Теоретически влияние таких искажений, как отличие ширины пучка от расчетной и смещение центра пучка относительно центра фокусатора, для случая фокусировки одномодового пучка малой мощности рассмотрено в [5].

Неправильная установка фокусатора приводит к искажениям формы, размеров, а также распределения интенсивности излучения по длине полоски. Наименьшие искажения формы фокального пятна при небольших отклонениях в распределении интенсивности наблюдаются при отклонении угла установки фокусатора в плоскости падения на него лазерного излучения (расчетное значение угла  $45^\circ$ ). Установлено, что для этого угла вполне допустима погрешность  $\pm 5^\circ$  и лишь при отклонениях более  $10^\circ$  появляются заметные различия в распределении интенсивности по длине полоски. Положение большой оси фокусатора в плоскости падения излучения на фокусатор также должно выдерживаться с погрешностью не более  $5^\circ$ , в противном случае возникают искажения распределения интенсивности и увеличивается длина фокального пятна (полоски). С большей точностью ( $\sim 0,5^\circ$ ) должна выдерживаться перпендикулярность плоскости фокусатора к плоскости падения, так как уже при отклонении от перпендикулярности в  $2-3^\circ$  наблюдаются сильные искажения формы и распределения интенсивности в фокальном пятне.

Смещение центра фокусатора относительно центра пучка лазерного излучения не должно превышать  $\pm 1$  мм, при большем смещении возникают искажения распределения интенсивности и существенно изменяются размеры фокального пятна, причем более сильные искажения наблюдаются при смещении вдоль малой оси фокусатора. Отметим, что влияние смещения центра пучка на распределение интенсивности сфокусированного излучения вдоль фокальной линии зависит от таких характеристик фокусатора, как расчетные распределения интенсивности на фокусаторе и вдоль фокальной линии, и требует специального исследования. Это влияние можно уменьшить, разбив фокусатор на несколько частей так, чтобы каждая из этих частей сфокусировала излучение на весь отрезок (см. [5]). Допустимые отклонения расстояния ( $l$ ) между фокусатором и обрабатываемой поверхностью от фокусного расстояния ( $f$ ) фокусатора не должны превышать  $5-10$  мм — в зависимости от абсолютной величины фокусного расстояния и расходимости пучка лазерного излучения, падающего на фокусатор. Искажения формы фокального пятна, возникающие при увеличении и уменьшении расходимости лазерного излучения, падающего на фокусатор, аналогичны искажениям, возникающим при нарушении равенства  $l = f$ . Эти искажения могут быть скомпенсированы соответствующим изменением расстояния (при этом возможно некоторое изменение ширины полоски).

Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать требования к качеству лазерного излучения и точности юстировки фокусаторов:

— лазерное излучение, падающее на фокусатор, должно быть одномодовым либо существенно многомодовым с близким к равномерному (отклонения — не более  $\pm 30\%$ ) распределением интенсивности по сечению пучка;

— линейное смещение центра фокусатора от центра падающего на него пучка лазерного излучения — не более 1 мм (1% от диаметра корпуса фокусатора);

— угол падения излучения на фокусатор  $45 \pm 5^\circ$ ;

— угол между осью падающего на фокусатор излучения и малой осью фокусатора  $90 \pm 0,5^\circ$ ;

— расстояние от фокусатора до точки оптимального фокуса необходимо уточнять для конкретного экземпляра лазера, с которым работает фокусатор, и поддерживать это расстояние с точностью  $\pm 5$  мм ( $\sim 1\%$  от номинального значения фокусного расстояния фокусатора).

Энергетическая эффективность фокусировки, измеренная методом калиброванных диафрагм, составила для разных экземпляров фокусаторов 60—75%. Эта величина, конечно, меньше, чем у линзы или зеркала, но вполне сопоставима с КПД составных оптических систем, используемых обычно в ЛТУ. Частично потери энергии, вносимые фокусатором, обусловлены наличием у него пространственно разделенных фокусов высокого порядка. Форма фокального пятна и относительное распределение интенсивности в нем в этих фокусах идентичны форме и распределению в основном фокусе, что дает возможность контролировать качество фокусировки непосредственно в процессе лазерной обработки.

Для оценки радиационной стойкости и термостабильности фокусатор выдерживался под мощным излучением ( $\geq 5$  кВт) в течение 10 мин при отключенном охлаждении. При этом изменений формы и размеров области фокусировки в пределах точности измерений не отмечалось, хотя фокусатор нагревался до температуры более  $100^\circ\text{C}$ . Это свидетельствует о том, что по термостабильности и радиационной стойкости фокусаторы не уступают стандартным металлическим зеркалам (допустимая плотность мощности  $500$  Вт/см<sup>2</sup>). По сравнению с зеркалом фокусатор гораздо менее чувствителен к загрязнению поверхности и к ее локальным повреждениям, что является большим достоинством в случае применения в промышленных условиях.

Технологические возможности разработанных фокусаторов были опробованы на примере лазерной закалки стали 45 излучением  $\text{CO}_2$ -лазера. Круглые массивные образцы диаметром 50 мм вращались под лазерным лучом с окружной скоростью до 1 м/мин. Сравнение эффективности обработки пучком круглого сечения диаметром 5 мм (сформированного линзой) и полосковым пучком прямоугольного сечения  $30 \times 1$  мм, имеющем ту же самую площадь, показало, что полосковый луч обеспечивает гораздо большую однородность термообработки, чем пучок круглого сечения при сканировании по той же самой площади (рис. 4).

Применение дифракционных фокусаторов открывает новое направление в оптике мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров. С их помощью оказывается возможным согласовать геометрию рабочей зоны лазерного воздействия с формой обрабатываемой детали и тем самым оптимизировать процесс лазерной обработки. Фокусаторы позволяют сформировать не только плоские, но и пространственные фокальные пятна с заданным распределением интенсивности, что невозможно реализовать, используя элементы классической оптики. Дополнительные возможности для совершенствования лазерных технологий дает новый параметр управления процессами лазерной обработки — управление распределением интенсивности в рабочей зоне, которое также не может быть реализовано в сколько-нибудь широких пределах без использования дифракционных фокусаторов.

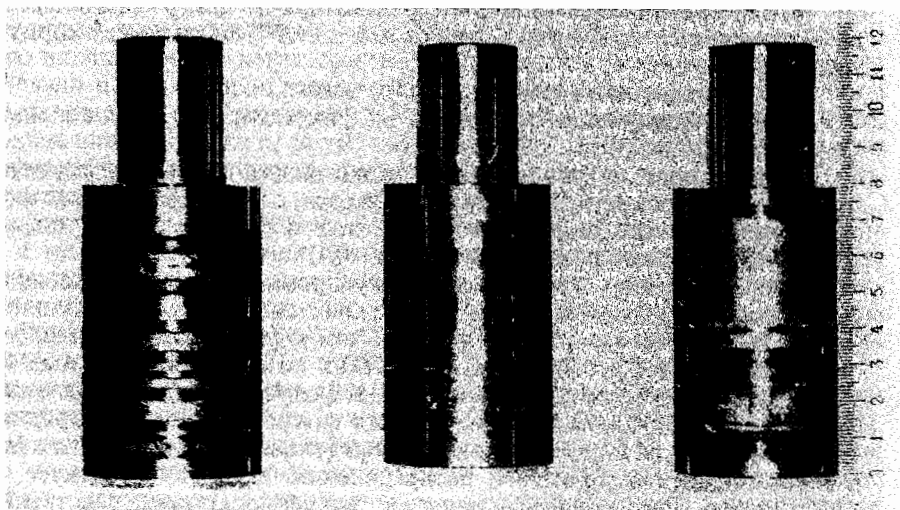


Рис. 4. Образцы из стали 45, подвергнутые лазерной закалке.  
Слева — образец, обработанный круглым лучом, справа — образец, обработанный  
полосковым лучом.

Представляется, что современная заводская ЛТУ должна быть снабжена набором сменных фокусаторов, аналогично набору рабочих инструментов — сверл, резцов и т. п. — на металлообрабатывающих станках. При этом оптическая система ЛТУ сильно упрощается, поскольку в одном оптическом элементе могут быть объединены сразу несколько функций — поворотного зеркала, фокусирующего объектива и гомогенизатора распределения интенсивности в лазерном пучке, т. е. фокусатор способен заменить большую часть или даже всю оптическую систему ЛТУ. Стоимость фокусаторов при серийном производстве должна быть ниже стоимости обычных металлических зеркал, поскольку основные затраты приходится на изготовление матрицы, используя которую можно изготовить большое количество реплик фокусаторов.

В заключение отметим, что опыт, накопленный при изготовлении фокусаторов лазерного излучения с  $\lambda = 10,6$  мкм, и анализ точности, необходимой для изготовления поверхностного рельефа, дают основания полагать, что использование современных фотолитографических методов позволит в ближайшее время перейти к созданию фокусаторов на  $\lambda = 5$  мкм и даже  $\lambda = 1,06$  мкм для фокусировки мощного излучения соответственно СО- и Nd:YAG-лазеров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов В. А., Попов В. В., Прохоров А. М. и др. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. С. 810—815.
2. Данилов В. А., Попов В. В., Прохоров А. М. и др. Оптические элементы, фокусирующие когерентное излучение в произвольную фокальную кривую: Препринт ФИАН. 1983. N. 69.



3. Гончарский А. В., Данилов В. А., Попов В. В. и др. // Докл. АН СССР. 1983. Т. 273, N 3. С. 605—609.

4. Гончарский А. В., Данилов В. А., Попов В. В. и др. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11, N 1. С. 166—168.

5. Данилов В. А., Дубов М. В. // Компьютерная оптика. М., 1987. Вып. 1. С. 52—67.

*Статья поступила 25.01.93*