

УДК 535.87; 681.7

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ПОМОЩЬЮ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЗЕРКАЛ

© 2005 г. А. Г. Сафронов*, канд. физ.-мат. наук; Б. Тобке**, П. Хелмс**

* ОАО "Композит", г. Королев Московской обл.

** Nti Lasertechnik + Metallbau GmbH & Co. KG, Rendsburg, Germany

* E-mail: sag.mac@g23.relcom.ru; SafronovAG@mpei.ru

Исследованы зависимости основных характеристик сфокусированного пучка в лазерном комплексе (диаметр d_0 и положение ΔS перетяжки, интенсивность излучения I , длина каустики l_c) от управляющего напряжения U на деформируемом зеркале. Установлено, что применение деформируемых зеркал при лазерной резке толстолистовых металлических материалов обеспечивает улучшение ее качества практически по всем параметрам. В частности, при резке нержавеющей стали толщиной 8,5 мм со скоростью 460 мм/мин шероховатость поверхности разреза была уменьшена в 1,5 раза, глубина высококачественной резки была повышена на треть.

Коды OCIS: 140.0140.

Поступила в редакцию 12.01.2005.

1. Введение. Оптимальные условия фокусировки лазерного пучка

К настоящему времени среди лазерных технологий наиболее широкое распространение в промышленности получила лазерная резка материалов, в том числе черных и цветных металлов. Ее режимы и качество детально исследованы для тонколистовых металлических материалов (толщиной до 6 мм) при использовании лазеров мощностью до 3 кВт [1]. В частности, найдены оптимальные условия фокусировки пучка на обрабатываемую деталь. При использовании линзовых фокусирующих головок с фокусным расстоянием 100–125 мм оптимальное положение перетяжки пучка находится на передней поверхности заготовки. При этом расфокусировка на ± 1 мм мало влияет на характеристики лазерной резки [1].

Для качественной резки толстолистовых металлических материалов (толщиной 8–30 мм), в том числе легированных сталей, используются технологические лазеры более высокой мощности (5–20 кВт) в сочетании с зеркальными фокусирующими головками с фокусными расстояниями до 500 мм [2]. Увеличение фокусного расстояния в данном случае связано с необходимостью иметь более длинную каустическую сфокусированного лазерного пучка по сравнению с резкой тонких листов. Действительно, длина каустики l_c определяется как расстояние вдоль оси пучка между его сечениями, диаметр которых в $\sqrt{2}$ раз больше диаметра пучка в перетяжке. Согласно [3]

$$l_c = \frac{kd_0^2}{4}, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны излучения, d_0 – диаметр перетяжки сфокусированного пучка по уровню мощности $1/e^2$. При больших расстояниях z между лазером и фокусирующей головкой с фокусным расстоянием F

$$z \gg L/2, \quad (2)$$

$$z \gg F > \frac{D}{2\sqrt{2}}, \quad (3)$$

$$d_0 = \frac{4\lambda}{\pi D} F, \quad (4)$$

где L – длина эквивалентного конфокального резонатора лазера, D – диаметр пучка непосредственно перед фокусирующим элементом (линзой или зеркалом) по уровню мощности $1/e^2$. Следовательно, из (1) и (4) имеем:

$$l_c = \frac{8\lambda}{\pi D^2} F^2. \quad (5)$$

При лазерной резке толстолистовых материалов оптимальные условия фокусировки пучка совпадают с таковыми при тонколистовой резке. Для примера в табл. 1 приведены оптимальные параметры резки нержавеющей стали 1.4301 CO₂-лазером, где положительные значения положения фокуса соответствуют его заглублению в обрабатываемый материал, от-

Таблица 1. Оптимальные параметры резки нержавеющей стали 1.4301 CO₂-лазером мощностью 6 кВт в присутствии азота

| Толщина материала, мм | Фокусное расстояние, мм | Положение фокуса, мм | Скорость резания, м/мин |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| 1 | 170 | 1 | 14–17 |
| 2 | 170 | 1 | 10–12 |
| 3 | 170 | 1 | 7,2–7,8 |
| 4 | 170 | 0 | 4,8–5,4 |
| 5 | 270 | 0 | 3,6–4 |
| 6 | 270 | 0 | 2,8–3 |
| 8 | 270 | 0 | 2–2,3 |
| 10 | 270 | 0 | 1,3–1,5 |
| 12 | 270 | 0 | 1,1–1,3 |
| 15 | 270 | -1 | 0,7–0,8 |
| 20 | 270 | -1 | 0,3–0,4 |
| 30 | 270 | -1 | |

рицательные значения – уровню над поверхностью материала. Таким образом, на практике для конкретного лазерного комплекса с конкретной фокусирующей системой известно оптимальное положение перетяжки сфокусированного пучка, обеспечивающее оптимальное качество обработки конкретного материала. Тем не менее, зачастую это качество оказывается настолько неудовлетворительным, что требуется последующая механическая обработка заготовок. Это особенно актуально для лазерной обработки толстолистовых металлических материалов.

В настоящей работе для повышения качества лазерной резки предлагается использовать деформируемые зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности [4]. Кроме того, в работе приводятся результаты экспериментов по лазерному перфорированию (прошивке отверстий) с применением таких зеркал.

Подобные деформируемые зеркала довольно успешно используются в современной лазерной технике. В частности:

– для стабилизации диаметра перетяжки сфокусированного пучка (ширины реза/шва) при лазерной резке и сварке в обрабатывающих комплексах с “летающей” оптикой и крупногабаритными рабочими столами [5, 6];

– для управления положением фокуса пучка, в том числе для его перемещения в соответствии с профилем обрабатываемой заготовки при 2- и 3-мерной лазерной резке и сварке деталей сложной конфигурации, в частности, содержащих фигурные профили и скругленные углы [6, 7];

– для низкочастотных осцилляций фокуса пучка вдоль оптической оси с целью повышения качества обработки и увеличения толщины разрезаемой за-

готовки (лазерное распиливание) [8], а также для создания стеганых швов при лазерной сварке [6];

– для внутрирезонаторного управления мощностью выходного излучения лазеров и для создания импульсно-периодических режимов генерации в непрерывных лазерах [9].

Однако детальные исследования качества лазерной резки и перфорирования толстолистовых металлических материалов с применением деформируемых зеркал не проводились.

2. Технологический лазерный комплекс с деформируемым зеркалом

В экспериментах использовался обрабатывающий комплекс на базе CO₂-лазера “TRIAGON 6000” с порталной системой “Robotix” [10]. Основные характеристики комплекса представлены в табл. 2. Система транспортировки оптического излучения выполнена по комбинированной схеме. По продольной координате *x* комплекс передвигается как единое целое, включая лазер. Для транспортировки излучения по поперечной координате *y* и по вертикали *z* использована схема с “летающей” оптикой. Все штатные зеркала системы транспортировки медные и размещены на охлаждаемых водой подложках.

Во время экспериментов в оптический тракт комплекса (рис. 1) вместо одного из поворотных зеркал

Таблица 2. Характеристики лазерного технологического комплекса

| | |
|---|--------------------------------------|
| Длина волны излучения, мкм | 10,6 |
| Режим излучения лазера | Многомодовый |
| Режимы генерации лазера | Непрерывный, импульсно-периодический |
| Максимальная мощность излучения в непрерывном режиме, Вт | 6000 |
| Диапазон регулирования выходной мощности лазера, Вт | 600–6000 |
| Относительная нестабильность мощности излучения, %, не хуже | ±1,5 |
| Максимальный диаметр выходного пучка лазера, мм | 38 |
| Частота повторения импульсов в импульсно-периодическом режиме, кГц | 0–2,5 |
| Размеры зоны лазерной обработки, м | 16,9×3,0 |
| Диапазон перемещения фокусирующей головки, м | |
| по оси <i>x</i> | 23,0 |
| по оси <i>y</i> | 3,2 |
| Диапазон перемещения фокусирующей головки по вертикали (ось <i>z</i>), м | 0,6 |
| Рабочий газ | O ₂ , N ₂ |
| Максимальное давление рабочего газа, бар | 25 |

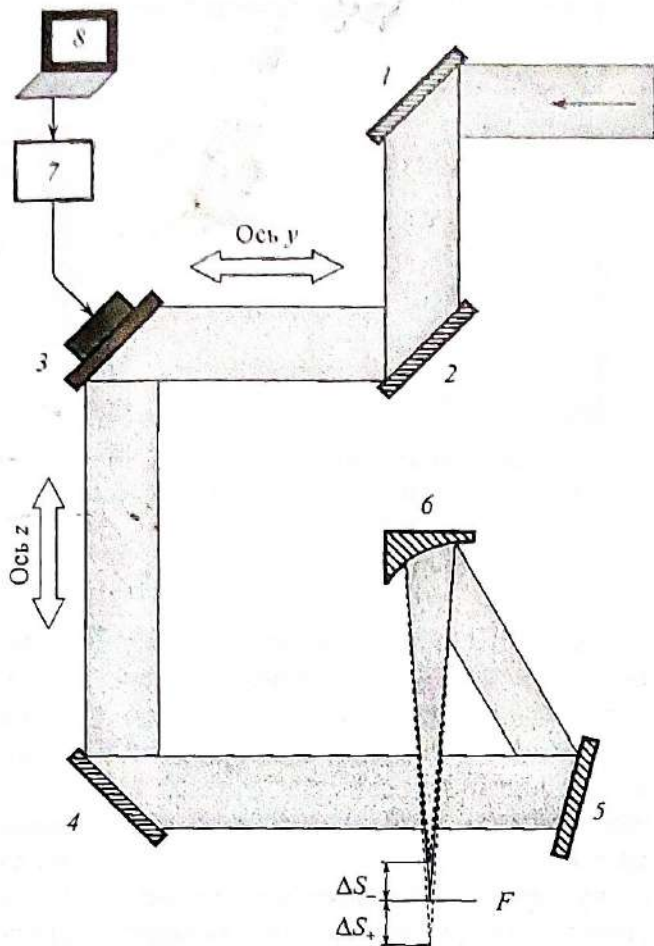


Рис. 1. Оптическая схема лазерного комплекса. 1, 2, 4, 5 – плоские поворотные зеркала (1 – круглое, диаметр 76 мм, отражающее покрытие $\lambda/4$; 2 – круглое, диаметр 70 мм; 4, 5 – эллиптические, большая ось 77 и 60 мм соответственно); 3 – деформируемое зеркало; 6 – фокусирующее зеркало (внеосевой парабоид, $F = 275$ мм); 7 – электронный блок управления; 8 – управляющий компьютер. ΔS_- , ΔS_+ – смещение фокуса (перетяжки) пучка при управлении деформируемым зеркалом. Фигурными стрелками показано изменение расстояний между зеркалами.

устанавливалось охлаждаемое деформируемое зеркало 3 с плоской исходной формой отражающей поверхности и чувствительностью 45 мкм/кВ в диапазоне ± 100 В. Управляющее напряжение U данного зеркала изменялось от -200 В до $+300$ В. При отрицательном напряжении форма зеркала вогнутая, при положительном – выпуклая. Остальные характеристики соответствуют приведенным в работе [4]. Угол падения пучка на зеркало составлял 45° . Для охлаждения деформируемого зеркала использовалась штатная система охлаждения лазерного комплекса.

2.1. Юстировка оптической системы

Технологический комплекс с деформируемым зеркалом юстировался по форме пятна лазерного пучка на поворотном зеркале 4 при мощности выходного излучения лазера 1,5 кВт. Отпечатки пятен (рис. 2 и

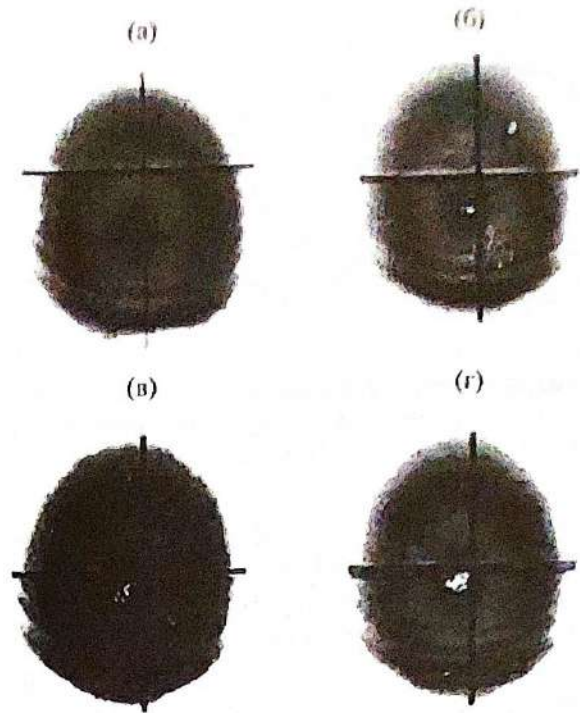


Рис. 2. Последовательное (а → г) изменение формы пятна лазерного пучка при юстировке деформируемого зеркала в оптической системе. Управляющее напряжение $U = 0$ В.

3) получены на термочувствительной бумаге при одиночном кратковременном воздействии на нее лазерного пучка. Темное перекрестие на всех отпечатках показывает положение оптической оси пучка при оптимальной юстировке. Рис. 2 соответствует максимальному удалению обрабатывающей головки комплекса от лазера (наибольшему расстоянию между зеркалами 2 и 3 на рис. 1). В этом случае размеры отпечатка, полученного при наилучшей юстировке (рис. 2г), составляли 27×33 мм (погрешность измерений $\pm 0,5$ мм). Видно, что при юстировке деформируемого зеркала не удалось добиться симметричного пучка, поскольку его центр не совпадает с темным перекрестием. Кроме того, нижний край пучка (по рис. 2) “зарезан”. Невозможность оптимальной юстировки объясняется существенно меньшим световым диаметром деформируемого зеркала по сравнению со штатным (42 мм вместо 70 мм), а также несовершенством механической оснастки для его крепления.

При минимальном удалении обрабатывающей головки от лазера форма пятна лазерного пучка на зеркале 4 становится более симметричной (см. рис. 3). “Зарезание” пучка в этом случае уменьшается, а размеры отпечатков составляют: 24×31 мм при $U = 0$ В, менее 23×28 мм при $U = -200$ В и 26×35 мм при $U = +300$ В.

Окончательная юстировка оптической системы была выполнена по фокальному пятну лазерного пучка (см. рис. 4). Отпечатки получены при одиночных кратковременных воздействиях лазерного пучка

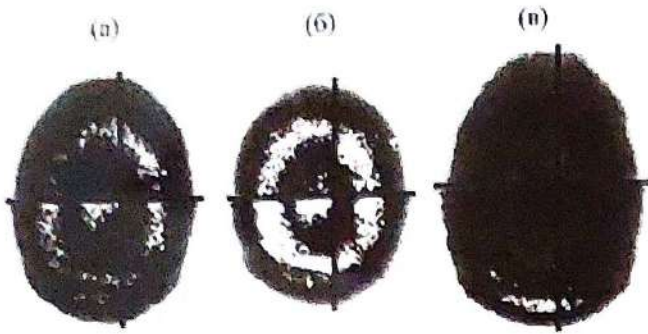


Рис. 3. Изменение формы пятна лазерного пучка при управлении деформируемым зеркалом. а – $U = 0$ В, б – $U = -200$ В, в – $U = +300$ В.

ка на бумагу. Мощность выходного излучения лазера во время данной юстировки составляла 1,8 кВт, при этом обрабатывающая головка находилась на минимальном удалении от него. При наилучшей фокусировке (см. последний отпечаток на рис. 4) фокальное пятно имело форму овала с размерами 550×650 мкм. Измерения выполнены оптическим микрометром МОВ-1-16^х, входящим в состав оптической скамьи ОСК-2ЦЛ. Погрешность измерений составила ± 50 мкм.

2.2. Управление лазерным пучком

Форма отражающей поверхности деформируемого зеркала Z при подаче на него управляющего напряжения U изменяется, что приводит к смещению фокуса (перетяжки) пучка вдоль оптической оси на расстояние ΔS_+ при $U > 0$ или на расстояние ΔS_- при $U < 0$ (рис. 1). Точнее, при сферических деформациях управляемого зеркала, расположенного под углом к лазерному пучку, в оптической системе возникает астигматизм, так что смещения меридионального и сагиттального фокусов будут различными. В дальнейшем под смещением фокуса ΔS при управлении будем понимать расстояние вдоль оптической оси от исходной фокальной плоскости (при $U = 0$ В) до плоскости, равноудаленной от меридионального и сагиттального фокусов (при $U \neq 0$ В) [11]. Зная номинальное фокусное расстояние лазерной головки, угол наклона деформируемого зеркала и его параметры, нетрудно построить зависимость $\Delta S(U)$, показанную на рис. 5. Видно, что при изменении управляющего напряжения U от -200 до 300 В $\Delta S_{\max} = 18,7$ мм, при этом $\Delta S_+ = 11,5$ мм при $U = 300$ В и $\Delta S_- = -7,2$ мм при $U = -200$ В. Относительный диапазон перемещений фокуса пучка $\Delta S_{\max}/F$ составляет 6,8%.

Помимо смещения фокуса при управлении деформируемым зеркалом будут изменяться поперечный размер перетяжки и длина каустики лазерного пучка. Действительно, когда деформируемое зеркало выпуклое ($U > 0$), лазерный пучок становится рас-

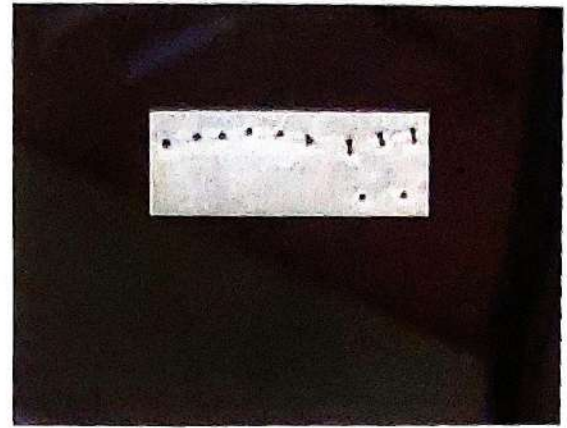


Рис. 4. Последовательное (справа налево и сверху вниз) изменение фокального пятна лазерного пучка при юстировке обрабатывающей головки технологического комплекса с деформируемым зеркалом. Управляющее напряжение $U = 0$ В.

ходящимся. Следовательно, диаметр пучка D непосредственно перед фокусирующим зеркалом увеличивается, причем тем сильнее, чем дальше от него в оптической схеме находится деформируемое зеркало. Это, согласно формулам (4) и (5), приводит к уменьшению диаметра перетяжки d_0 и длины каустики l_c сфокусированного пучка по сравнению со случаем плоского деформируемого зеркала. Вследствие этого возрастает плотность мощности I лазерного излучения в перетяжке. Аналогично при вогнутом деформируемом зеркале ($U < 0$) d_0 и l_c увеличиваются, а I уменьшается. При наличии астигматизма в оптической системе аналогично будут изменяться геометрические и энергетические характеристики сфокусированного пучка как в меридиональной, так и в сагиттальной плоскостях.

Данные выводы полностью соответствуют экспериментальным результатам, полученным ранее в работе [4], где приводятся продольные профили сфокусированного пучка, диаметр и положение его перетяжки

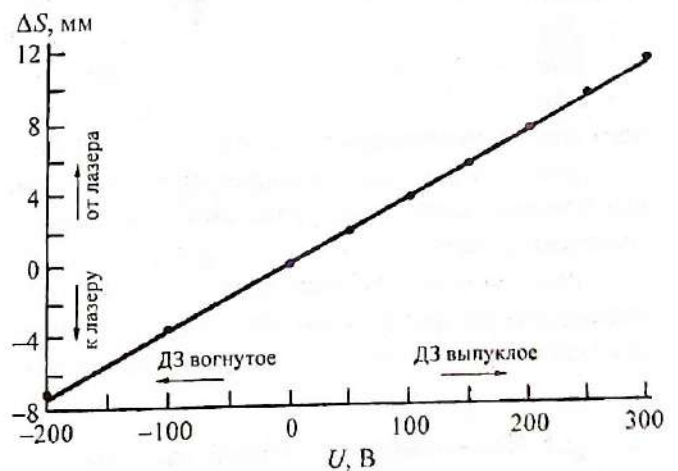


Рис. 5. Зависимость смещения ΔS фокуса (перетяжки) лазерного пучка в обрабатывающем комплексе от управляющего напряжения U на деформируемом зеркале (ДЗ).

ки при различном напряжении на деформируемом зеркале. Учитывая результаты работы [4] и зависимость, приведенную на рис. 5, можно утверждать, что в данном лазерном комплексе с деформируемым зеркалом зависимости $\Delta S(U)$ и $d_0(U)$ являются линейными функциями. В общем случае зависимость $d_0(U)$ нелинейная, особенно при больших расстояниях между деформируемым и фокусирующим зеркалами. Учитывая формулу (1) и последующие замечания, можно считать, что зависимости $I_c(U)$ и $I(U)$ в общем случае также являются нелинейными.

Когда деформируемое зеркало и фокусирующий элемент (линза или зеркало) расположены близко друг к другу в оптической схеме, изменения d_0 , I и I_c при управлении будут пренебрежимо малы. Например, при расстоянии 60 мм относительное изменение d_0 не превышает $\pm 1\%$. Практически в этом случае результат управления деформируемым зеркалом в лазерном комплексе сводится только к смещению фокального пятна вдоль оптической оси. Именно поэтому при управлении размером перетяжки, плотностью мощности и длиной каустики деформируемое зеркало располагают вблизи лазера, в то время как при управлении осевым положением перетяжки его ставят непосредственно перед фокусирующей головкой [4, 12].

Интересно сравнить результаты управления деформируемым зеркалом в лазерном комплексе с управлением положением фокусирующего элемента, например, линзы. Смещение последней вдоль оптической оси приводит к такому же смещению фокального пятна. Вместе с тем никакого изменения поперечного размера перетяжки, плотности мощности в ней и длины каустики сфокусированного пучка происходить не будет. Следовательно, управление положением фокусирующего элемента (линзы или зеркала) в лазерном комплексе полностью эквивалентно управлению деформируемым зеркалом, когда оно находится рядом с фокусирующей головкой. Во всех остальных случаях управление деформируемым зеркалом принципиально отличается от управления положением фокусирующего элемента из-за наличия дополнительных эффектов.

3. Лазерное перфорирование

Все дальнейшие эксперименты по лазерной резке и перфорации отверстий на рассмотренном комплексе были выполнены при мощности выходного излучения лазера 3 кВт. Это было сделано для предотвращения перегрева деформируемого зеркала, так как лазерный пучок частично попадает на его переднюю (не отражающую) поверхность [4]. В качестве обрабатываемого материала во всех испытаниях использовалась высококачественная сталь марки 1.4301/V2A (Германия) толщиной 8,5 мм.

При стандартной операции перфорирования (без деформируемого зеркала) лазер работает в импульсно-периодическом режиме излучения, а перетяжка сфокусированного пучка находится на передней поверхности обрабатываемой заготовки. Как было показано в разделе 1, это соответствует оптимальным условиям фокусировки излучения. Время стандартной операции (прошивки одного отверстия) при обработке указанной стали составляет 8 с.

Экспериментальное перфорирование отверстий с использованием деформируемого зеркала выполнялось при тех же условиях. В исходном состоянии ($U = 0$ В) перетяжка находилась на передней поверхности заготовки. Результаты лазерного перфорирования при различных управляющих напряжениях U сведены в табл. 3. Перфорирование при каждом значении напряжения выполнялось дважды. Время перфорирования засекалось по лампочке на пульте управления лазерным комплексом. При отрицательном напряжении эксперименты не проводились, поскольку сквозные отверстия в данном материале в этом случае не прошиваются. Для большей достоверности результатов были выполнены две серии экспериментов. До и после каждой серии для устранения возможных остаточных деформаций управляемого зеркала на него подавалось импульсно-периодическое напряжение с частотой 50–100 Гц, скважностью 2 и размахом от -200 В до $+300$ В, который постепенно снижался до нуля. В табл. 3 для характеристики одного и того же отверстия использованы следующие условные термины: "входное

Таблица 3. Результаты лазерного перфорирования с использованием деформируемого зеркала

| U , В | Смещение фокуса (перетяжки) ΔS , мм | Диаметр входного отверстия, мм | Диаметр выходного отверстия, мм | Глубина отверстия, h , мм | Время перфорирования t , с | Диаметр зоны теплового влияния, мм |
|---------|---|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 0 | 0 | 0,9 | 0 | 6,0 | | 3,4 |
| 50 | 1,9 | 0,8 | 0 | 7,3 | | 4,55 |
| 100 | 3,7 | 0,7 | 0,8 | Сквозное | 5 | 4,55 |
| 150 | 5,6 | 0,6 | 0,7 | Сквозное | <5 (>4) | 3,4 |
| 200 | 7,6 | 0,7 | 0,5 | Сквозное | 4 | 3,0 |
| 250 | 9,5 | 0,7 | 0 | 4,0 | | 0 |

отверстие" – отверстие на передней поверхности заготовки, "выходное отверстие" – отверстие на ее задней поверхности.

3.1. Время перфорирования

Полученные результаты показывают, что при управлении деформируемым зеркалом в лазерном комплексе оптимизируется технологическое время перфорирования одного отверстия, достигающее 4 с при напряжении 200 В. Это в 2 раза меньше, чем при использовании стандартного плоского зеркала. Данный результат легко объясняется, если принять во внимание изложенное в разделе 2.2. Действительно, увеличение управляющего напряжения приводит к смещению перетяжки сфокусированного пучка от передней поверхности в глубь обрабатываемого материала, вследствие чего происходит значительное отступление от условий оптимальной фокусировки. При этом одновременно уменьшается поперечный размер самой перетяжки и возрастает плотность мощности (интенсивность) излучения в ней, что при прочих равных условиях сокращает время однократного перфорирования по сравнению со стандартной операцией (без деформируемого зеркала). Таким образом, суммарное действие противоположных эффектов приводит к тому, что при определенном напряжении время перфорирования минимизируется. Заметим, что из всех случаев, когда в заготовке прошиваются сквозные отверстия (см. табл. 3), именно при данном напряжении перетяжка сфокусированного пучка имеет наименьший диаметр и интенсивность излучения в ней максимальна. Очевидно, что при изменении обрабатываемого материала или его толщины минимальное время перфорирования будет иным и будет достигаться при другом значении управляющего напряжения. Вместе с тем, общий вывод, по-видимому, будет справедлив для любых материалов: управление деформируемым зеркалом в лазерном комплексе позволяет минимизировать технологическое время перфорации отверстий.

В разделе 2.2 было отмечено, что изменение плотности мощности в перетяжке будет тем сильнее, чем больше расстояние между деформируемым и фокусирующим зеркалами в оптической схеме. Следовательно, для увеличения эффекта (сокращения времени перфорирования) необходимо устанавливать деформируемое зеркало вместо поворотного зеркала 2 (рис. 1). Тем не менее, в наших экспериментах деформируемое зеркало было сознательно установлено на указанное место, чтобы избежать малейшей возможности повреждения оправ оптических элементов расходящимся пучком, так как расстояние между зеркалами 2 и 3 является наибольшим в оптической схеме при любом положении лазерной голов-

ки. Этот шаг был тем более необходим в условиях неоптимальной юстировки оптической системы.

Как следует из табл. 3, при отсутствии напряжения на деформируемом зеркале, когда его отражающая поверхность плоская, сквозное отверстие не образуется. В то же время при использовании стандартного плоского зеркала при том же положении фокального пятна сквозное отверстие перфорруется за 8 с. Это кажущееся противоречие объясняется неудовлетворительной юстировкой деформируемого зеркала в оптической схеме комплекса, приводящей к "зарезанию" лазерного пучка.

Таким образом, уменьшение времени перфорирования при управлении деформируемым зеркалом получено, вообще говоря, при существенно неоптимальной юстировке оптической системы. Вероятно, при устранении этого недостатка минимальное время перфорирования снизится еще больше либо будет достигнуто при меньшем значении управляющего напряжения.

Из двух вышеназванных причин, влияющих на время перфорирования, одна (смещение перетяжки) вызывает отрицательный эффект, так как нарушаются оптимальные условия фокусировки, причем существенно. Следовательно, исключение этого отрицательного эффекта при сохранении положительного позволит восстановить оптимальную фокусировку, что, вероятно, приведет к дальнейшему сокращению времени перфорирования. Таким образом, необходимо вернуть перетяжку сфокусированного пучка на переднюю поверхность заготовки, не изменяя при этом минимального поперечного размера самой перетяжки. Очевидно, это можно сделать путем соответствующего смещения фокусирующей оптики. Кроме того, как следует из раздела 2.2, это же легко добиться с помощью дополнительного деформируемого зеркала, которое следует расположить по возможности ближе к фокусирующей лазерной головке, например, вместо поворотного зеркала 5 (рис. 1). Управляя этим вторым деформируемым зеркалом в противофазе с первым ($U_2 = -U_1$), можно изменять поперечный размер перетяжки пучка, удерживая ее при этом на передней поверхности обрабатываемой заготовки.

3.2. Геометрия перфораций

Как следует из табл. 3, наименьшие диаметры входного и выходного отверстий, во-первых, различны, а во-вторых, достигаются при различных управляющих напряжениях на деформируемом зеркале. При этом минимальный диаметр выходного отверстия отчетливо меньше, чем при стандартном способе перфорирования. Этот результат является прямым следствием уменьшения поперечного размера

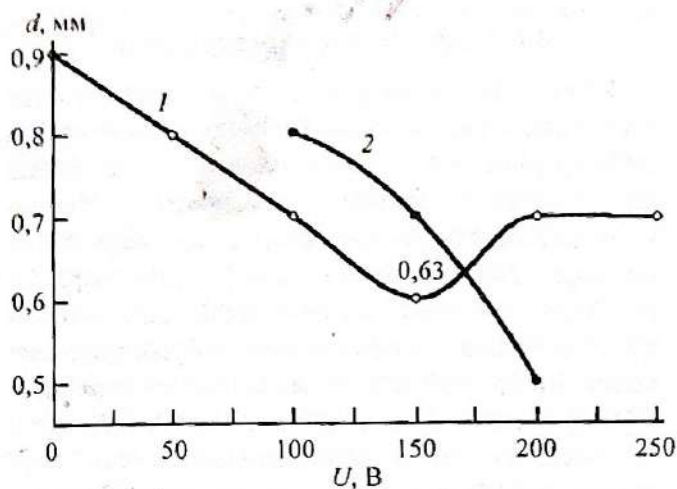


Рис. 6. Зависимость изменения диаметра d входного (кривая 1) и выходного (кривая 2) отверстий при лазерном перфорировании нержавеющей стали толщиной 8,5 мм от управляющего напряжения U .

перетяжки при ее смещении в глубь обрабатываемой заготовки. Этим же обстоятельством объясняется уменьшение диаметров выходного (при $100 \leq U \leq 200$ В) и входного (при $U \leq 150$ В) отверстий при увеличении управляющего напряжения (см. рис. 6). На графиках четко видно, что диаметр выходного отверстия уменьшается сильнее, чем входного, как и должно быть, поскольку перетяжка пучка удаляется от передней поверхности заготовки и приближается к задней, одновременно сужаясь.

Из всех случаев, когда в материале прошивается сквозное отверстие, минимальный диаметр выходного отверстия достигается при управляющем напряжении, при котором перетяжка сфокусированного пучка имеет наименьший размер и находится ближе всего к задней поверхности заготовки (см. табл. 3). Аналогичный эффект по той же самой причине может достигаться и при управлении положением фокусирующего элемента (при условии прошивки сквозного отверстия), хотя и в меньшей степени, поскольку в этом случае размер перетяжки остается постоянным и она только смещается к задней поверхности заготовки. Таким образом, по влиянию на размер выходного отверстия при сквозном лазерном перфорировании управление деформируемым зеркалом и смещение фокусирующей оптики являются качественно эквивалентными процессами с той лишь разницей, что при прочих равных условиях количественный эффект в первом случае больше.

Геометрия отверстия показывает, что при $U = 200$ В оно сужается от передней поверхности заготовки к задней, при $U = 100$ В – наоборот, расширяется (табл. 3). Таким образом, изменяя напряжение на деформируемом зеркале, можно управлять конусностью перфорационных отверстий [13], хотя и в

очень узком диапазоне. Элементарное геометрическое рассмотрение показывает: при максимальной разнице диаметров входного и выходного отверстий 0,2 мм и толщине заготовки 8,5 мм отклонение стенки сквозного отверстия от перпендикулярности не превышает $0,7^\circ$. Из сравнения входных и выходных отверстий при $U = 150$ и 200 В видно, что при некотором напряжении на деформируемом зеркале в диапазоне 150–200 В диаметры этих отверстий сравняются (рис. 6). Графически легко получить, что в данном конкретном случае это происходит при $U = 170$ В. При этом диаметры входного и выходного отверстий составляют 0,63 мм, так что конусность сквозного отверстия равна нулю и его можно считать строго цилиндрическим, естественно, без учета других допусков на его профиль [13].

При напряжении $U < 100$ В и $U > 200$ В сквозные отверстия в данном материале не прошиваются (табл. 3). Вместе с тем управление деформируемым зеркалом в этих случаях приводит к изменению глубины образующихся отверстий. По-видимому, такие несквозные отверстия могут быть получены и при отрицательных напряжениях. Сравнение результатов экспериментов показывает, что для двух различных диапазонов, $U < 100$ В и $U > 200$ В, зависимости глубины отверстий h от их диаметра d будут отличаться друг от друга, во всяком случае количественно. Сравнивая управление деформируемым зеркалом со смещением фокусирующей оптики, можно отметить, что по влиянию на глубину отверстий эти два варианта эквивалентны. Отличие между ними будет только при обработке таких толстолистовых материалов или при таких режимах излучения лазера, когда сквозные отверстия не прошиваются вообще. В этом случае деформируемое зеркало позволяет управлять глубиной отверстий в большем диапазоне.

Из табл. 3 видно, что для сквозных отверстий зона “теплового влияния” (зона налета у выходного отверстия) уменьшается с возрастанием напряжения, поскольку при $U = 200$ В и выходное отверстие на задней поверхности заготовки, и лазерный пучок в этой плоскости имеют наименьшие размеры.

Таким образом, в отношении геометрии перфораций в данном лазерном комплексе с деформируемым зеркалом получены:

- а) управление конусностью перфорационных отверстий (от 1:85 – расширение, до 1:43 – сужение) с достижением цилиндрической формы;
- б) уменьшение диаметра перфорационных отверстий: входного – от 0,7 до 0,6 мм, выходного – от 0,8 до 0,5 мм;
- в) уменьшение диаметра зоны “теплового влияния” пучка от 4,55 до 3,0 мм;
- г) управление глубиной несквозных отверстий.

Эти результаты позволяют проводить контурную лазерную резку с меньшей шириной разреза и более узким полем допуска, т. е. с лучшим чистовым качеством.

4. Лазерная резка

Все эксперименты по резке выполнялись с использованием вспомогательного газа (азота), давление которого все время оставалось неизменным и составляло 14 бар. При данной операции лазер работает в непрерывном режиме излучения. Скорость резания в экспериментах была ниже обычной (ср. с табл. 1) и составляла 340–460 мм/мин. Это объясняется пониженной мощностью выходного излучения лазера, 3 кВт вместо 6 кВт. В остальном резка выполнялась при тех же условиях, что и лазерное перфорирование. Результаты экспериментов сведены в табл. 4, образцы показаны на рис. 7.

Таблица 4. Результаты лазерной резки с использованием деформируемого зеркала

| № эксперимента | U , В | Смещение фокуса (перетяжки) ΔS , мм | Положение разделительной линии h_s , мм | Шероховатость поверхности разреза в нижней зоне R_z , мкм | Скорость резания V , мм/мин |
|----------------|---------|---|---|---|-------------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 4,5 (рис. 7а) | 29,9 | 460 |
| 2 | 200 | 7,6 | 6,0 (рис. 7б) | 30,5 | 340 |
| 3 | -200 | -7,2 | 2,0 (рис. 7в) | 43,3 | 460 |
| 4 | -200 | -7,2 | 2,0 | 43,3 | 460 |
| | 200 | 7,6 | 6,0 | 19,3 | 460 |

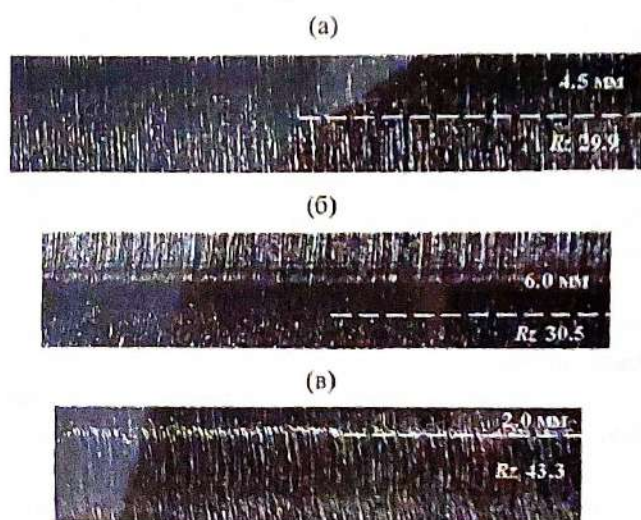


Рис. 7. Образцы лазерной резки с использованием деформируемого зеркала (режимы обработки см. в табл. 4). Пунктирной линией показана граница высококачественной резки.

4.1. Шероховатость поверхности

Полученные результаты показывают, что все экспериментальные образцы имеют однотипную структуру (см. рис. 7), характерную для процесса лазерной резки [1]: по всей поверхности разреза почти перпендикулярно кромкам проходят мелкие риски (бороздки). При этом на поверхности разреза с различной степенью четкости видна разделительная линия, выше которой качество обработки очень высокое и практически не зависит от управляющего напряжения. По крайней мере эта зависимость настолько слабая, что достоверные отличия полученных образцов не наблюдаются. Ниже разделительной линии качество обработки существенно хуже, чем в верхней зоне – это заметно даже визуально. Кроме того, в нижней зоне качество (шероховатость) поверхности сильно зависит от управляющего напряжения. При прочих равных условиях чем выше напряжение, тем меньше шероховатость. В рассматриваемых испытаниях при изменении напряжения от 0 до 200 В качество лазерной резки при скорости обработки $V = 460$ мм/мин было повышено в полтора раза: с $R_z = 29,9$ мкм до $R_z = 19,3$ мкм. Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 8. Поскольку количество экспериментальных точек минимально, на рисунке показаны две возможные аппроксимации численных результатов – линейная и квадратичная. Видно, что оба варианта довольно близки, так что в первом приближении зависимость $R_z(U)$ для нижней зоны резания можно считать линейной, по крайней мере в рассматриваемом диапазоне скоростей обработки.

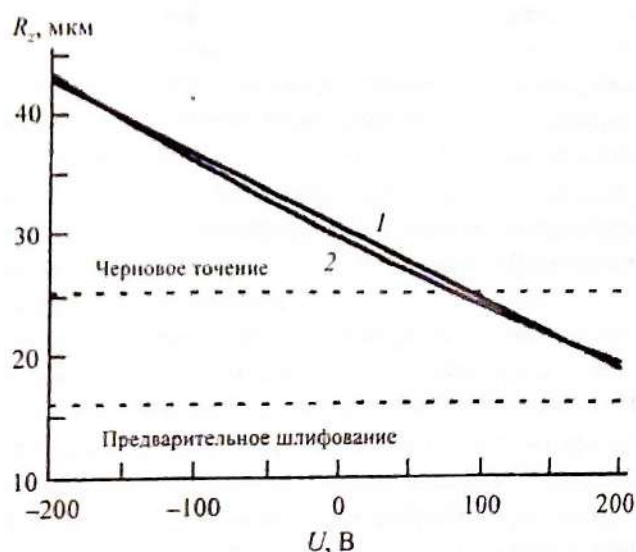


Рис. 8. Зависимость шероховатости поверхности R_z в нижней зоне лазерной резки от управляющего напряжения U . Скорость резания $V = 460$ мм/мин. 1 – линейная аппроксимация экспериментальных данных, 2 – квадратичная аппроксимация.

На рис. 8 пунктиром показана граница, выше которой шероховатость соответствует черновому точению при механической обработке [13]. При лазерной резке со скоростью 460 мм/мин шероховатость поверхности находится именно в этой зоне [1]. Можно видеть, что управление деформируемым зеркалом обеспечивает лучшее значение шероховатости, чем для чернового точения. В принципе полученную зависимость $R_z(U)$ можно экстраполировать до предельного управляющего напряжения $U = 300$ В и тогда из рис. 8 видно, что при любом варианте аппроксимации данное зеркало приводит к улучшению шероховатости до качества предварительного шлифования. Однако достоверно этого утверждать нельзя, так как экспериментальная резка при $U = 300$ В не проводилась по той причине, что при лазерном перфорировании сквозное отверстие в данном материале не прошивается при этом напряжении (см. табл. 3). Вполне вероятно, что при прочих равных условиях шероховатость поверхности при $U > 200$ В будет хуже полученных значений.

Как и при лазерном перфорировании, физической причиной рассмотренных результатов является уменьшение поперечного размера перетяжки пучка с возрастанием управляющего напряжения. Это приводит к увеличению интенсивности излучения как в самой перетяжке, так и в любом другом сечении каустики пучка, что в конечном итоге и обеспечивает улучшение шероховатости при лазерной резке. Причем данный результат опять достигается при значительном отступлении от условий оптимальной фокусировки.

Для рассматриваемых скоростей лазерной резки (340–460 мм/мин) шероховатость обрабатываемой поверхности тем меньше, чем выше скорость [1]. Поскольку в верхней зоне резания качество поверхности и без того высокое, а рассматриваемый интервал довольно узок, то заметного улучшения шероховатости с увеличением скорости обработки здесь не наблюдается. В то же время для нижней зоны отмеченная закономерность справедлива: при прочих равных условиях шероховатость поверхности ниже разделительной линии уменьшается с ростом скорости лазерной обработки (см. табл. 4).

4.2. Глубина высококачественной резки

Положение разделительной линии (рис. 7) определяет глубину h_k высококачественной лазерной резки. Как следует из табл. 4, с увеличением напряжения величина h_k возрастает, т. е. качество резки улучшается. В данных экспериментах при изменении управляющего напряжения от 0 до 200 В величина h_k была повышена от 4,5 до 6,0 мм, т. е. на треть. Погрешность измерения приведенных в табл. 4 зна-

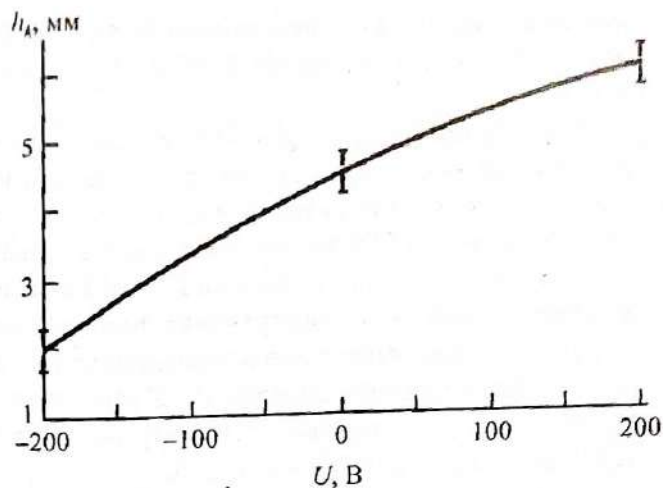


Рис. 9. Зависимость глубины h_k высококачественной лазерной резки от управляющего напряжения U . Скорость резания $V = 340$ – 460 мм/мин. Вертикальными штрихами показана погрешность измерений.

чений h_k составляет $\pm 0,3$ мм. Выполнение более точных измерений не имеет смысла, поскольку в процессе обработки глубина высококачественной резки колеблется в пределах $\pm 0,25$ мм, что хорошо видно на рис. 7. Эта неравномерность может объясняться нестабильностью мощности выходного излучения лазера (см. табл. 2), неоднородностями обрабатываемого материала и другими причинами.

На рис. 9 представлены экспериментальные данные, включая погрешности измерения; полученная зависимость $h_k(U)$ аппроксимирована полиномом 2-й степени. Как можно видеть, при дальнейшем увеличении напряжения возможны два варианта: либо h_k уменьшается (по крайней мере не возрастает), что наиболее вероятно, так как при лазерном перфорировании при больших напряжениях сквозное отверстие в данном материале не прошивается (табл. 3), либо h_k увеличивается. Экстраполяция зависимости $h_k(U)$ показывает, что в этом последнем случае возможное возрастание величины h_k является незначительным и находится в пределах ее колебаний при лазерной резке, т. е. в пределах погрешности измерений (см. рис. 9). Таким образом, можно считать, что при $U = 200$ В величина h_k практически достигает своего максимума, точнее, находится в его окрестности в пределах указанной погрешности.

Как было сказано выше, в рассматриваемом диапазоне (340–460 мм/мин) при возрастании скорости резания V шероховатость поверхности в нижней зоне улучшается. Поэтому, рассматривая зависимость $h_k(V)$, более корректно говорить не о глубине h_k высококачественной резки, а о положении h_k разделительной линии между зонами с различным качеством. Полученные результаты (табл. 4) показывают, что величина h_k в рассматриваемом диапазоне не зависит от скорости обработки. По край-

ней мере о какой-либо зависимости $h_x(U)$ при данной погрешности измерений достоверно говорить нельзя.

В эксперименте № 4 (табл. 4) во время процесса резания при постоянной скорости 460 мм/мин напряжение на зеркале скачком изменялось от -200 до $+200$ В, т. е. отражающая поверхность зеркала из вогнутой становилась выпуклой. При таком изменении управляющего напряжения было установлено его непосредственное влияние на ширину разреза в обрабатываемом материале, которая при вогнутой форме деформируемого зеркала оказалась на 0,35 мм больше, чем при выпуклой.

Кроме того, анализ полученных образцов показал, что при отрицательном управляющем напряжении поверхность разреза имеет слегка выпуклую (бочкообразную [13]) форму, что, естественно, ухудшает перпендикулярность кромок разреза в этом случае по сравнению с лазерной резкой при других напряжениях. Перпендикулярность кромок разреза при $U = 0$ и 200 В близка к идеальной (90°). Различия в неперпендикулярности для этих напряжений если и имеются, то настолько незначительное, что достоверно о нем говорить нельзя. Косвенное подтверждение этого вывода следует также из результатов лазерного перфорирования.

Таким образом, применение деформируемых зеркал обеспечивает повышение качества лазерной резки по ширине разреза, шероховатости поверхности и глубине высококачественной резки. Кроме того, качество резки принято также характеризовать шириной зоны термического влияния пучка и неперпендикулярностью кромок разреза [1]. Уменьшение первой при лазерной резке с использованием деформируемой оптики косвенно подтверждается экспериментами по перфорации отверстий. Что касается неперпендикулярности кромок разреза, то она, как минимум, не ухудшается при оптимальном напряжении на зеркале. К сказанному добавим, что эти результаты могут быть улучшены с учетом замечаний, сделанных в разделах 2 и 3.

5. Заключение

В результате исследований лазерного комплекса со сферически деформируемым зеркалом получена линейная зависимость положения ΔS перетяжки пучка от управляющего напряжения U , а также установлен линейный характер зависимости диаметра $d_0(U)$ при выбранном положении деформируемого зеркала в оптической системе. Зависимости $d_0(U)$, $I(U)$ и $I_c(U)$ в общем случае имеют нелинейный характер, который в значительной степени определяется расстоянием между деформируемым зеркалом и фокусирующим элементом. Возможность управления па-

раметрами d_0 , I и I_c с помощью деформируемых зеркал является принципиальной особенностью последних в сравнении с управлением положением фокусирующего элемента, когда указанные величины остаются постоянными.

Эксперименты по лазерному перфорированию достоверно показали, что управление деформируемым зеркалом (даже при его существенно неоптимальных юстировке и положении в оптической системе) позволяет минимизировать время прошивки отверстий. Тем самым гарантируется повышение производительности лазерных комплексов при этой технологической операции, по крайней мере для толстолистовых материалов. Кроме того, деформируемое зеркало при лазерном перфорировании обеспечивает уменьшение зоны "теплого влияния" лазерного пучка, управление глубиной несквозных отверстий, получение сквозных отверстий цилиндрической формы, управление их конусностью, а также уменьшение их диаметра. Дальнейшее расширение этих возможностей и увеличение производительности лазерных комплексов может быть связано с программным управлением деформируемыми зеркалами непосредственно в течение технологического времени прошивки отверстия.

С учетом результатов по перфорированию в экспериментах по лазерной резке установлено, что применение деформируемых зеркал повышает возможности прецизионной (чистой) лазерной резки в узких размерных допусках, в том числе при предельных скоростях обработки. С другой стороны, возможности деформируемых зеркал, обеспечивающих улучшение качества лазерной резки, могут быть использованы для повышения ее скорости или для увеличения толщины обрабатываемых материалов.

Экстраполируя полученные результаты на другие лазерные технологии (сварка, маркировка, пайка и т. д.), по-видимому, можно ожидать, что применение деформируемых зеркал в соответствующих обрабатывающих комплексах также приведет либо к увеличению производительности последних и расширению их технологических возможностей, либо к повышению качества лазерных операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абильтитов Г.А., Голубев В.С., Гонтарь В.Г. и др. Технологические лазеры. Справочник. Т. 1. Расчет, проектирование и эксплуатация / Под ред. Абильтитова Г.А. М.: Машиностроение, 1991. С. 329–338.
2. Spherical mirrors focus light from CO₂ lasers // Opto & Laser Europe. 1997. № 6. P. 90.
3. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1988. С. 80–88.

4. Выхубенко О.Б., Капустин П.И., Колоколов И.С., Масычев В.И., Сафронов А.Г. Применение деформируемых зеркал в технологических CO₂-лазерах: 1. Зеркало с управляемой кривизной отражающей поверхности // Квант. электрон. 2003. Т. 33. № 6. С. 547–552.
5. Bar K., Freisleben B., Kozlik C., Schmiedl R. Adaptive optics for industrial CO₂ laser systems // Lasers in Engineering. 1995. V. 4. P. 233–242.
6. Hoffmann P., Schuberth S., Geiger M., Kozlik C. Process optimizing adaptive optics for the beam delivery of high power CO₂ lasers // Proc. SPIE. 1993. V. 1834. P. 195–205.
7. Geiger M., Schuberth S. and Hufless J. Process optimizing CO₂ laser beam using adaptive optics // Schweißen und Schneiden'94. DVS – Berichte / Düsseldorf: DVS-Verlag, 1994. P. 132–137.
8. Geiger M., Hufless J., Schuberth S. CO₂-laser beam sawing of thick sheet metal with adaptive optics // Lehrstuhl für Fertigungstechnologie. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. P. 1–13.
9. Вишевич Б.С., Евдокимович Л.Н., Сафронов А.Г., Смирнов С.Н. Применение деформируемых зеркал в технологических CO₂-лазерах: 2. Внутррезонаторное управление мощностью и импульсно-периодическая модуляция выходного излучения // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 4. С. 333–340.
10. Gruber F.J. An unusual company based in Rendsburg, Germany // International Euro Laser. 1996. № 2. P. 56–58.
11. Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д. и др. Вычислительная оптика. Справочник / Под ред. Русинова М.М. Л.: Машиностроение, 1984. С. 66–67.
12. Schmiedl R. Adaptive optics make industrial moves // Photonics Spectra. 1999. № 11. P. 127–130.
13. Веркович Г.А., Головенкин Е.Н., Голубков В.А. и др. Справочник конструктора точного приборостроения / Под ред. Явленского К.Н., Тимофеева Б.П., Чадаевой Е.Е. Л.: Машиностроение, 1989. С. 89–103.