

УДК 621.375.826:621

**СПОСОБЫ И СРЕДСТВА
ДЛЯ НЕ РЕЖИМНОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ОПЕРАЦИЙ ЛАЗЕРНОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ
ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЧАТНЫХ ФОРМ**

© В. П. Котляров, д.т.н., профессор, Н. И. Анякин, к.т.н.,
с.н.с., Фархунд Хамеди, НТУУ «КПИ», Киев, Украина

**Систематизовано та проаналізовано можливості відомих
та нових методів додаткового покращення результатів
обробки отворів, лунок, щілин та пазів лазерним
випромінюванням шляхом модернізації схем обробки
та технологічного обладнання.**

**Possibilities of the known and new methods for additional
improvement of small holes and slots laser machining results
are systemized and analyzed. The technological
operation results are improved by machining schemes
and equipment modernization.**

Введение

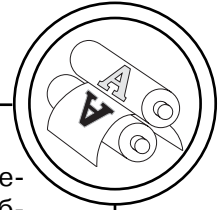
Известные преимущества лазерной размерной обработки (локальность воздействия, отсутствие контакта с инструментом, производительность и широкие размерные возможности) сочетаются с существенными недостатками (низкая точность размеров, сложность формообразования в продольном и поперечном направлениях). Некоторые из них устраняются выбором оптимальных по ряду критериев режимов обработки, однако, при проектировании режимов для сложных технологических задач (многокритериальных) увеличение количества нормированных показателей операции, а значит и функционалов невязок при формировании целевой функции [1], приводит к сокращению числа степеней свободы в условиях ограниченного количества управляемых парамет-

ров (факторов) процесса, и часто — к отсутствию оптимального решения. Повышение управляемости объекта оптимизации за счет расширения факторного пространства усложняет и удорожает процедуру оптимизации без гарантий на ее успешное осуществление.

Постановка задачи

Более эффективным и целенаправленным является применение средств и способов дополнительного совершенствования технологической операции лазерной размерной обработки, которые позволяют комплексно или выборочно влиять на ее показатели [2]. Тогда процесс неудачной режимной оптимизации технологической операции продолжается не формированием новой гипотетической задачи со сложными практическими последствиями, а поиском при-

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



ема (приемов), позволяющего улучшить показатель, уровень которого не был достигнут в результате оптимизационных мер. Систематизация средств совершенствования процесса обработки выполнена в [3], однако развитие лазерной техники, повышение требований к результатам лазерной обработки, а также использование новых способов печати являются убедительным поводом для анализа возможностей и применимости вновь разработанных способов влияния на результаты обработки. Поэтому целью настоящих исследований является критический анализ их эксплуатационных характеристик, экспериментальная (по мере возможностей) оценка реальных результатов улучшения показателей технологической операции по следующим направлениям:

- применение прогрессивных технологических схем обработки;
- оптимизация параметров инструмента — пучка лазерного излучения;
- автоматизация отдельных переходов или операции в целом, включая разработку адаптивных форм ее организации.

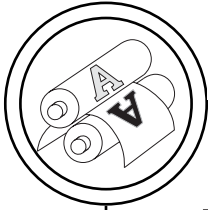
Технологические схемы лазерной размерной обработки

Существующие методы формирования элементов, составляющих основу печатной формы — отверстий, щелей (некруглых отверстий) и пазов (несквозные щели) можно разделить на две принципиально разные группы:

— обработка пучком излучения, имеющим профиль, подобный обрабатываемому элементу, с испарением материала по всему его сечению при неизменном положении заготовки в пучке излучения во время операции; перемещение необходимо в перерывах операции для изменения координат расположения нового элемента;

— обработка пучком излучения простой поперечной формы (в виде круга) с формированием контура элемента программным относительным перемещением пучка излучения и заготовки.

Применимость *первой технологической схемы* ограничивается поперечными размерами элемента заготовки и сложностью его профиля, так как требуемая мощность излучения резко растет с увеличением размеров элемента, особенно для заготовок из материалов с высоким уровнем удельной теплоты испарения (металлы, керамика, естественные и искусственные минералы). Без существенного снижения производительности операции сквозные элементы с простым поперечным профилем (круг или линия) могут обрабатываться в экономном режиме контурного испарения за счет придания инструменту поперечной формы, соответствующей контуру обрабатываемого элемента. Из известных схем преобразования луча наиболее эффективной является двухкомпонентная оптическая система (рис. 1) [4], содержащая линзу 2 — аксикон — и фокусирующий объектив 3. Размер вырезаемого (трепани-



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

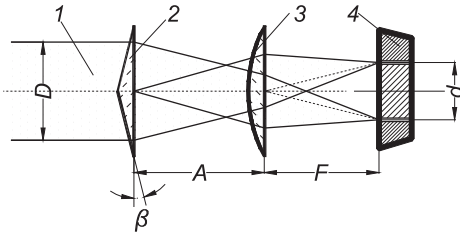


Рис. 1. Схема обработки сквозного отверстия лучом с кольцевым профилем

руемого) отверстия в заготовке 4 может изменяться параметрами аксикона (материалом и углом у основания β) и фокусным расстоянием объектива:

$$d = 2Ftg[(n - 1)\beta],$$

где n — показатель преломления материала аксикона 2.

Дополнительные возможности придают системе вращение эксцентрично смещенного объектива 3, а также изменение расстояния A от последнего до аксикона.

Вторая схема упрощается при вырезке элемента за счет контурного перемещения сфокусированного пучка излучения, особенно для простых профилей (круг, линия). Так, сканер, состоящий из бипризмы (пирамиды) 1, имеющей возможность смещения поперек ее оси симметрии и вращения вокруг оси пучка излучения, и объектива 2 с такими же возможностями (рис. 2), эффективен при вырезке отверстия диаметром d , причем за половину оборота

бипризмы (четверти — для пирамиды) и разными по мощности долями пучка излучения. Смещение и поворот объектива 3 позволяет изменять положение вырезаемого элемента на поверхности заготовки [5]. Изменением расстояния A (как и в предыдущей схем) можно управлять углом падения пучков излучения на заготовку, а значит наклоном стенок у вырезаемого элемента.

Большой гибкостью при реализации *второй технологической схемы* трепанации отверстий круглой формы обладает сканер [6] на эксцентрично расположенном и вращаемом относительно оси луча объективе 1 (рис. 3). Гибкость заключается в возможности плавного изменения величины эксцентриситета $e_{об}$, для чего объектив установлен в эксцентричном отверстии вращающегося корпуса 2, посредством стакана 3, имеющего эксцентричное отверстие для установки объектива 1.

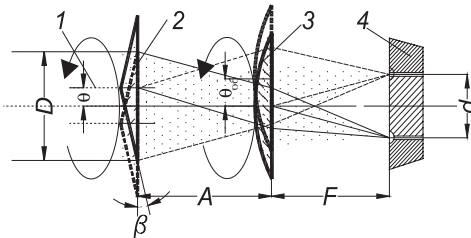
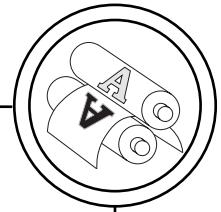


Рис. 2. Схема обработки сквозного отверстия круговым сканированием

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



В такой конструкции стакана при одинаковой величине эксцентриситетов отверстий $e = e_2 = e_3$ относительным поворотом стакана 3 с объективом 1 в корпусе 2 можно изменять положение объектива относительно оси корпуса 2 (оси пучка излучения) в пределах $e_{06} = 0 \div 2e$. Таким образом, при вращении объектива в подшипнике 4 вокруг оси луча 5 возможно формирование отверстия диаметром $d = 2e_{06} = 0 \div 4e$ в заготовке 6.

Для контурной вырезки сквозных отверстий и прорезки пазов в трафаретах и изготовления глухих лунок произвольной продольной формы можно рекомендовать устройство [7], объектив которого 1 (рис. 4) подвешен на двух плоских пружинах 2 и 3 во вращающемся от привода 4 стакане 5, расположенном в корпусе 6. Положение оси объектива относительно оси корпуса 6, а значит, и оси пучка излучения, определяется отверстием 7, изготовленным эксцентрично во втулке 8, которая при помощи стопорной пружины 9 закреплена в стакане 5 с возможностью поворота (вращения) от привода 10.

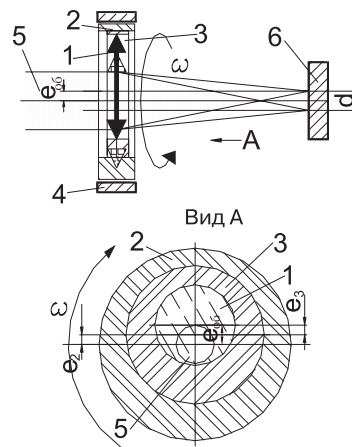


Рис. 3. Схема кругового сканера с плавным изменением радиуса сканирования

жины 9 закреплена в стакане 5 с возможностью поворота (вращения) от привода 10.

Предлагаемое устройство может использоваться в следующих технологических операциях:

- Перфорация сквозных отверстий с оперативным (программируемым) изменением их размеров методом трепанации: сканирование сфокусированного объективом луча осуществ-

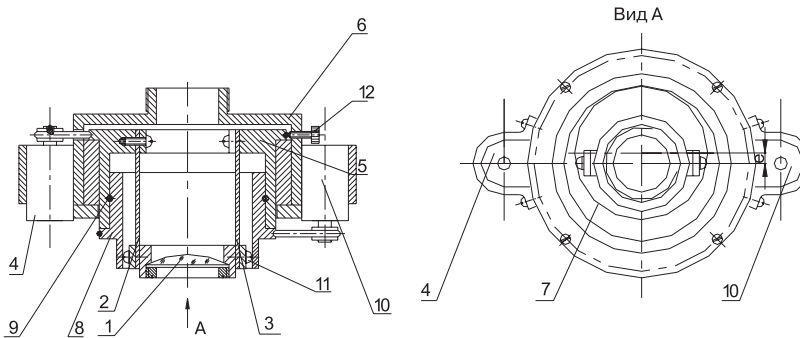


Рис. 4. Устройство для сканирования пучка излучения вдоль окружности, отрезка и спирали



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

ляется при вращении стакана 5 в корпусе устройства 6 от привода 4. Радиус сканирования задается размерным эксцентричным смещением объектива при повороте втулки 8 от привода 10 и воздействии эксцентрично расположенного отверстия 7 на пальцы 11 корпуса объектива. Радиус сканирования изменяется в пределах $r = 0 \div e$.

— Прорезка сквозных прямолинейных щелей или глухих пазов длиной $l = 0 \div 2e$. Сканирование пучка излучения выполняется вдоль отрезка прямой линии за счет возвратно-поступательного перемещения объектива при колебательном вращении втулки 8, причем максимальный размах достигается за половину ее оборота. Поворотом стакана 5 определяется направление обработки щели (паза).

— Формирование глухой лунки с управляемыми размерами и продольной формой, что может найти применение при изготовлении элементов форм для глубокой печати. Обработка лунки происходит при спиральном движении сфокусированного луча за счет одновременной и согласованной работы приводов 4 и 10, то есть в результате кругового сканирования луча с переменным радиусом. При управлении изменением шага спирали можно размерно влиять на профиль лунки, в частности, на ее конусообразность, что позволит управлять объемом краски при неизменном размере входного участка.

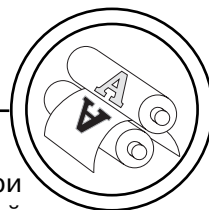
Последний режим сканирования может представлять интерес при изготовлении трафа-

ретов или фотошаблонов: при вырезке их информационных элементов рекомендуется применять в качестве инструмента асимметричный сфокусированный пучок излучения, чтобы придать резу некоторую клиновидность и исключить или уменьшить виньетирование картинки из-за толщины печатной формы или шаблона. Такой инструмент формируется при расчетном эксцентричном смещении объектива 1 в необходимую сторону поворотом втулки 8 и при поддержании нормального положения направления его смещения относительно вектора скорости резки, что обеспечит неизменный угол скоса кромки реза вдоль вырезаемого контура.

Оптимизация параметров пучка излучения как инструмента

Для реализации широко декларируемой гибкости лазерного луча, используемого в качестве обрабатывающего инструмента, недостаточно возможностей, предусмотренных конструкцией современных лазеров, в частности, оперативного изменения режима подачи лучистой энергии (от непрерывного к импульсному), параметрического (взаимно независимого) управления характеристиками пучка излучения: временными, пространственными и энергетическими. Поэтому вполне технологическая задача формирования обрабатывающего инструмента из заготовки — пучка излучения — путем его преобразования, дополняется не менее сложной задачей создания

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



методов и средств его параметрического управления. Таким образом, для придания пучку излучения оптимальных свойств необходимо:

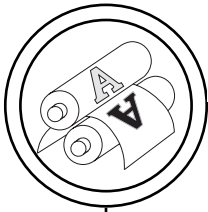
— Разработать средства параметрического управления пучком излучения с возможностью оперативного изменения тех характеристик, которые определяют содержание технологической операции.

— Создать системы эффективного преобразования пучка излучения в инструмент для основных технологических операций.

В настоящее время в лазерной технологии используются разнообразные *режимы подачи лучистой энергии*, которые, в общем, можно свести к трем основным видам: непрерывный, импульсный и гиперимпульсный, причем последний представляет собой комбинацию первых двух. Каждый режим применяется для некоторой группы операций, причем определяющими являются такие параметры процесса облучения: интенсивность в зоне обработки, локальность воздействия (размерная и временная) и достигаемая производительность операции. Необходимо отметить, что возможность оперативного изменения режима подачи энергии может считаться дополнительным качеством лазерного технологического оборудования. В лазерной технике обычно используют один из двух способов изменения режима работы лазера — вариацией режима накачки активной среды от импульсного до непрерывного или модуляцией доб-

ротности его резонатора при непрерывной накачке. Второй путь более оперативный и позволяет в широких пределах варьировать частотные характеристики импульсного режима: частоту подачи импульсов и их временные характеристики (длительность, период и скважность). К сожалению, нет эффективных серийных конструкций модуляторов добротности, в том числе лазерных затворов (внутри резонаторных модуляторов), использующих преломляющие оптические элементы. Наиболее широко применяемые в отечественных и зарубежных лазерах акустооптические затворы (АОЗ) избирательно взаимодействуют с пучком излучения внутри резонатора и позволяют получить 100 % модулированный режим лишь для одночастотного излучения. Известны эффективные схемы модуляторов, работающих с многомодовыми пучками излучения, например, на эффекте Доплера, однако, их конструкции реализованы лишь в опытных образцах из-за сложной технологии изготовления. Более простыми в изготовлении и не менее эффективными являются модуляторы добротности резонатора с периодическим изменением конфигурации резонатора или в результате периодического воздействия на порог генерации активной среды.

Первая конструкция применяется для модуляции добротности резонатора из сферических зеркал, ее работа основана на периодическом прерывании генерации при непрерывном режиме накачки активной сре-



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

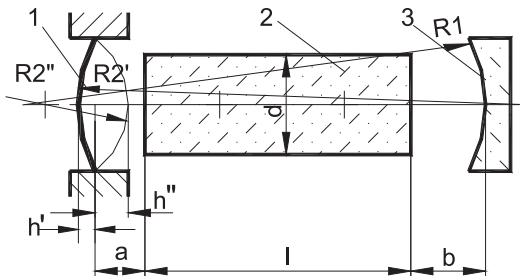


Рис. 5. Схема излучателя с модулятором добротности резонатора в виде изгибаго зеркала

ды в результате нарушения предпосылок для формирования стоячей волны в резонаторе из-за постоянного изменения конфигурации резонатора. Последняя определяется соотношением длины и радиусов кривизны зеркал резонатора и, в свою очередь, определяет форму стоячей волны в нем (каустик излучения в резонаторе). При постоянном изменении радиуса кривизны одного из зеркал форма каустики также изменяется и нарушается вынужденное взаимодействие электромагнитного поля в резонаторе с возбужденными квантовыми системами активной среды (АС). Таким образом, происходит накопление энергии накач-

ки повышением уровня инверсной населенности квантовых систем в АС. В конечных фазах изгибно-колебательного движения зеркала конфигурация резонатора стабилизируется, что вызывает формирование и усиление электромагнитного поля в виде стоячей волны резонатора и выход порции энергии через полупрозрачное зеркало резонатора в виде интенсивных коротких импульсов (пичков) с частотой $f_n = 2f$ (f — частота изгибных деформаций зеркала). Однако, такая последовательность пичков с чередующимися их характеристиками из-за различных конфигураций резонатора в крайних положениях изгибаго зеркала (рис. 5)

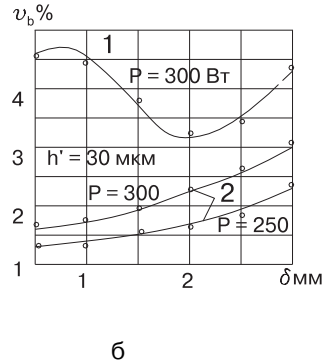
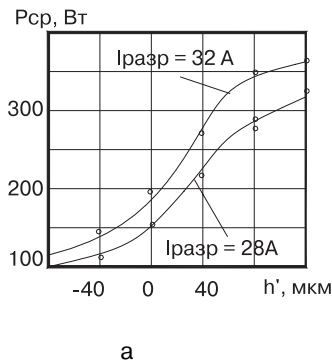
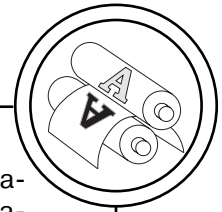


Рис. 6. Эксплуатационные характеристики (а) и результаты использования модулятора на изгибаго зеркале в операции резки (б)

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



не удовлетворяет требованию технолога к стабильности характеристик инструмента. Поэтому в предлагаемой схеме излучателя [8], состоящем из резонатора 1—3 (1 — 100 % зеркало) и активной среды 2 (n — показатель преломления ее матрицы), зеркало 1 изготовлено в виде зеркальной мембраны из упругого материала (например, из закаленной стали 65Г или 60С2), защемленной по периферии и имеющей привод ее изгибных колебаний с заданной частотой f и амплитудой h". В вогнутом состоянии максимальная амплитуда ограничена до величины h' регулируемым упором для выполнения условий (1) формирования устойчивой конфигурации резонатора в состоянии R1—R2' в отличие от второго положения R1—R2", при котором он неустойчив, то есть из-за больших дифракционных потерь в нем невозможно образование стоячей волны и формирование пичка. Тогда частота генерации пичков будет соответствовать частоте колебаний зеркала $f_n = f$.

$$\begin{cases} R1 > L = nl + a + b \\ \infty > R2' > R1 - L \text{ (устойчивая)} \\ |R2''| < R1 - L \text{ (неустойчивая)} \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 6 показаны результаты эксплуатационных испытаний излучателя (а — зависимость средней мощности излучения от амплитуды h') и в операции лазерной резки (б — зависимость коэффициента вариации ширины реза от толщины заготовки δ для непрерывного режима генерации — 1 и при пиковом характере облучения — 2).

Также для 100 % модуляции многомодовых пучков излучения, но в резонаторе из плоских зеркал, может быть использован принцип изменения порога генерации активной среды за счет периодической его расстройки при неизменном уровне накачки. На рис. 7 показана схема такого излучателя, активная среда 1 которого расположена в резонаторе 2—3, причем 100 % зеркало 3 через гибкое звено 7 прикреплено к торцу ультразвуковой головки (УЗГ) 6, ось которой расположена под углом φ к оси резонатора. Таким образом, в естественном положении резонатор 2—3 расстроен и для работы активной среды необходим высокий уровень энергии накачки (высокий порог возбуждения) и при естественном его значении излучение не формируется из высоких по-

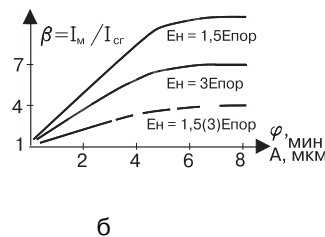
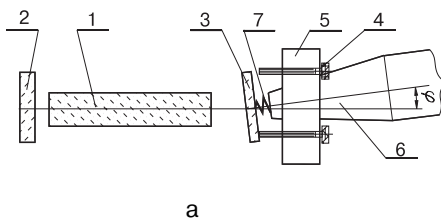


Рис. 7. Излучатель с качающимся 100 % зеркалом резонатора



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

терь в резонаторе. При работе УЗГ с частотой f в одном из крайних положений зеркала 3 оно опирается на регулировочные винты 4 юстировочного узла 5, занимает нормальное положение к оси резонатора, порог генерации излучателя снижается и формируется пичок излучения повышенной интенсивности вследствие накопления энергии накачки за время разъюстировки резонатора. На рис. 7, б показаны сравнительные энергетические показатели излучателя с качающимся зеркалом: относительное увеличение пиковой интенсивности β при модуляции резонатора по сравнению со свободной генерацией излучения зависит от величины угла φ и снижается при превышении порога генерации настроенного резонатора. По сравнению с модуляцией на эффекте Доплера модулятором (штриховая кривая) существенно увеличивается относи-

тельное увеличение пиковой интенсивности.

Схема лазера с параметрическим управлением диаметра пучка излучения d при неизменных уровнях мощности P и расходимости θ показана на рис. 8 [10]. При использовании сменных модовых диафрагм, устанавливаемых внутри резонатора, для сохранения неизменных уровней мощности и расходимости пучка необходима компенсация потери первого параметра увеличением мощности накачки, второго — перестройкой резонатора, что невозможно выполнять оперативно. В разработанной конструкции лазера модовая диафрагма 4 обращена в третье зеркало резонатора 2—3, что позволяет обрезать телом диафрагмы часть пучка выводить через отверстие в ней. Если угол наклона вогнутой конической поверхности диафрагмы φ выбран по зависимости (2), то исходная

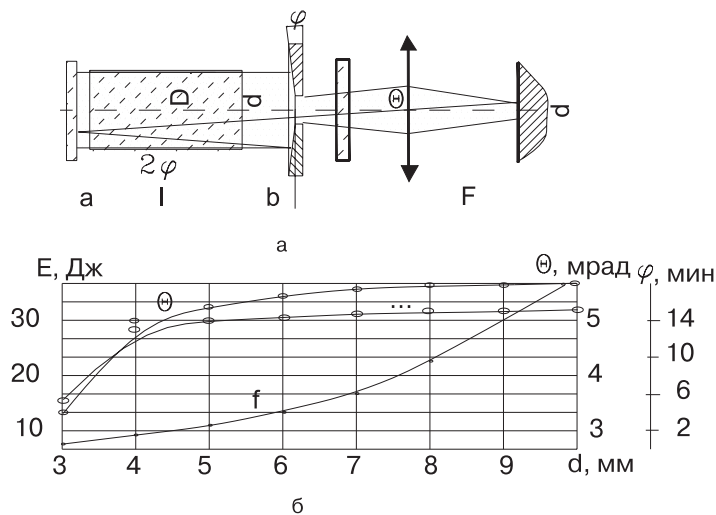
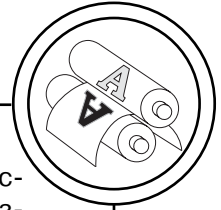


Рис. 8. Лазер с трехзеркальным резонатором

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



расходимость пучка размера D (θ_D) сохранится для пучка нового размера (d).

$$\varphi = \theta_D \left[\frac{4(D-d)}{(a+b+nl)} \right]^{1/2}. \quad (2)$$

На рис. 8, б показаны эксплуатационные характеристики излучателя на стекле с Nd^{+3} ($D = 10$ мм, $l = 240$ мм), в резонаторе которого устанавливались диафрагмы диаметром $3 \div 10$ мм с соответствующими углами φ (их значения также изображены на графике). Можно отметить, что при увеличении размера диафрагмы от $d = 5$ мм до 10, не существенно изменилась расходимость пучка (6 %) и импульсная энергия (5 %).

При формировании инструмента из пучка излучения оптическими средствами необходимо не только придать ему соответствующие размерные и энергетические характеристики, но и предусмотреть возможность их оперативной коррекции для реагирования на меняющиеся условия обработки (изменение размерных, оптических или теплофизических свойств материала заготовки) или для компенсации возможного дрейфа технологического режима. Кроме того, некоторые операции размерной обработки эффективнее выполняются при изменяемых свойствах лазерного инструмента, такие как перфорация глубоких отверстий (лунок) цилиндрической формы, резка щелей или фрезерование пазов переменной ширины и т.д. Такими свойствами приобретает луч, преобразованный объективами

с переменным фокусным расстоянием или рабочим отрезком (трансфокаторы). К сожалению, высокая интенсивность преобразуемого пучка излучения не позволяет применять известные конструкции из-за использования в них нестойких к излучению склеек. Поэтому в лазерной технологии используют специальные однокомпонентные системы, например, с линзой, угловое положение которой относительно оси луча можно изменять (рис. 9) [11]. При наклоне главной плоскости линзы 1 на угол γ ее фокальная плоскость 3 поворачивается на тот же угол и пересекается центральным лучом (и параллельными ему) в точке, лежащей на расстоянии Δl от прежнего положения. Таким образом, изменяется место наибольшей концентрации энергии излучения, смещаясь вдоль оси луча 2, что дает возможность сохранять начальный уровень интенсивности на дне обрабатываемой лунки, глубина которой при обработке растет, при соответствующем изменении угла γ . Влияние искажение профиля такого луча вследствие аберра-

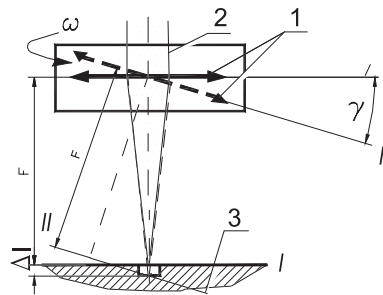
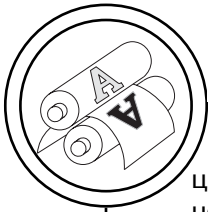


Рис. 9. Схема трансфокатора на наклоняемой линзе



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

ций (кома и астигматизм) можно ослабить вращением линзы вокруг оси луча с угловой скоростью $\omega = 1/\tau$ (τ — длительность облучения).

Для обработки отверстий большей глубины в импульсном режиме можно использовать трансфокатор с жидкой компонентой. В одной из известных конструкций (рис. 10) [12] тонкая сферическая линза 1 является дном стакана 2, заполненного жидкостью 3, имеющей показатель преломления $n_{ж}$ близкий к параметру материала линзы n_c (например, глицерин, кремнийорганические соединения, CCl_4 или др.). При толщине слоя h , существенно меньшей, чем фокусное расстояние линзы, наличие жидкости практически не влияет на фокусное расстояние трансфокатора, то есть $F_{тр} \approx F_l$. Однако, при вращении стакана 2 в опорах 4 от привода 5 плоская поверхность жидкости превращается в параболоид вращения, центральную часть которого можно считать сферой

с радиусом $R_1 = g/\omega^2$ (ω — угловая скорость вращения стакана). Тогда в соответствии с известной зависимостью (3) фокусное расстояние трансфокатора будет определяться скоростью вращения стакана с жидкостью (рис. 10, б), то есть приращение фокусного расстояния может быть согласовано с ростом глубины отверстия Δl после каждого импульса: $F_{тр2} - F_{тр1} = \Delta l$.

$$F_{тр} = \frac{1}{n-1} \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2 + d \frac{n-1}{n}} \quad (3)$$

Очевидным недостатком описанной конструкции является низкая лучевая стойкость жидкой компоненты, поэтому она применяется только при импульсной подаче энергии и в модернизированном виде [13], где предусмотрено энергичное охлаждение жидкости путем постоянного ее обновления в системе гидропривода вращения стакана.

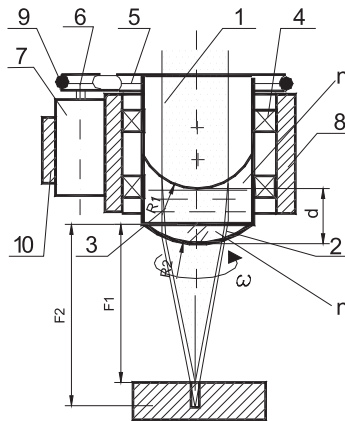
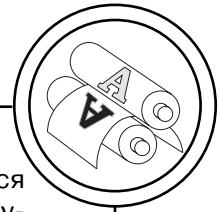


Рис. 10. Трансфокатор с жидкой компонентой

Автоматизация технологических операций лазерной размерной обработки

Целью автоматизации технологической операции является устранения субъекта (оператора) от влияния на результаты обработки. Часто автоматизируются переходы, повторяющиеся монотонно (загрузка и выгрузка заготовок) или определяющие качественные показатели (контроль размерных характеристик) и производительность операции. Желательно отстранить участие оператора в оцен-

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



ке текущих результатов обработки и принятии альтернативных решений по завершению операций. Комплексная автоматизация позволяет достичь высокого уровня организации операции — адаптивную.

На рис. 11, а показана схема установки для обработки точных сквозных отверстий с повышенным требованием к стабильности диаметрального размера, что достигается за счет постоянного контроля текущего его значения и автоматического прекращения операции при достижении заданного уровня [14]. Автоматизация трех переходов операции лазерной обработки отверстия (контроля размера, доработки отверстия до заданного его значения и разгрузки рабочей зоны) достигнута за счет особой конструкции фокусирующего узла. Линза 1 расположена герметично в корпусе 2, у которого на противоположном торце вокруг отверстия для выхода излучения закреплено уплотнение 3 для установки заготовки 4. Последняя

при обработке удерживается разряжением, создаваемым внутри корпуса 2 плоской струей воздуха, продуваемой под давлением p через его полость из плоского сопла 5 в 6. Величина давления и расхода воздуха определяются с учетом веса заготовки и размера обрабатываемого в ней отверстия такими, чтобы создаваемое разряжение удерживало заготовку у торца корпуса до достижения отверстия заданного размера, т.е. расходного сечения, достаточного для подсоса воздуха в полость корпуса и освобождения заготовки. Увеличение давления в корпусе до атмосферного уровня при этом дает сигнал датчику 7 на прекращение подачи импульсов излучения лазером 8. Таким простым устройством удалось повысить точность обрабатываемых отверстий на 2—3 квалитета, однако, используемый метод увеличения диаметра отверстия за счет подачи дополнительных импульсов действенный только для отверстий с глубиной, со-

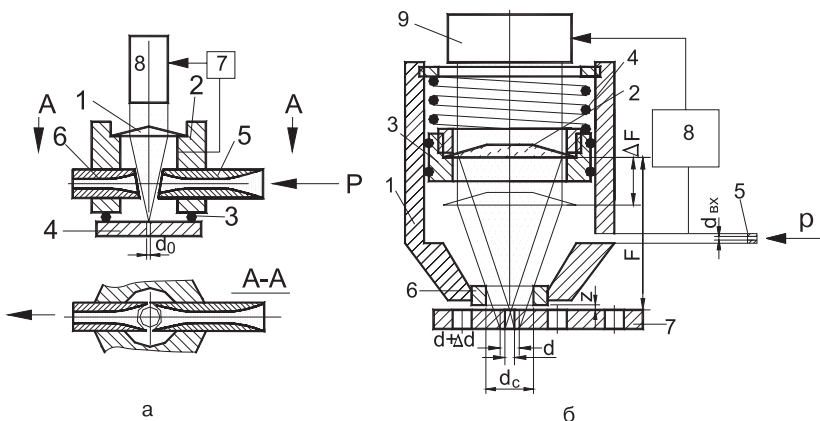
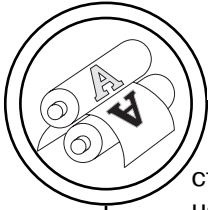


Рис. 11. Устройства для обработки точных сквозных отверстий



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

ставляющей 3—4 диаметра-
ного размера.

Точные отверстия любой глыбины можно обработать на установке, изображенной на рис. 11, б, работающей в адаптивном режиме [15]. Здесь также используется фокусирующий узел особой конструкции: в корпусе 1, представляющем собой односторонний пневмоцилиндр, располагается фокусирующая линза 2 в поршне 3, положение которого определяется усилием пружины 4, действующий на него с одной стороны и давлением воздуха в другой полости цилиндра. Эта полость является измерительной и давление в ней определяется конкуренцией наддува воздуха через входную диафрагму 5 и его расхода через сопло 6, обращенное в сторону заготовки 7. Величина расхода определяется давлением p и площадью истечения, которая до формирования сквозного отверстия составляет $S_1 = \pi d_c z$ (z — расстояние от торца сопла до поверхности заготовки) и увеличивается на величину

$S_2 = \pi d^2/4$ (d — текущий размер обрабатываемого отверстия). Таким образом, положение каустики сфокусированного излучения относительно заготовки зависит от действительного размера отверстия и с его увеличением от действия очередного импульса излучения смещается вглубь заготовки на величину ΔF , что приводит к постепенному приближению размера отверстия к заданному значению. Дискретность прироста диаметра Δd зависит от пневматической характеристики измерительной системы $p_{\text{изм}} = f(p, d, d_{\text{вх}})$ и устанавливается значением величин h и $d_{\text{вх}}$.

Безлюдная организация технологической операции достигается при автоматизации перехода загрузки заготовок. Пример такой ЛТУ, предназначенной для прошивки отверстий в шариках омывателя ветрового стекла, показан на рис. 12 [16]. Заготовки располагаются в бункере 1, откуда по направляющей 2 подается в рабочую зону — ложе на штоке пневмоцилин-

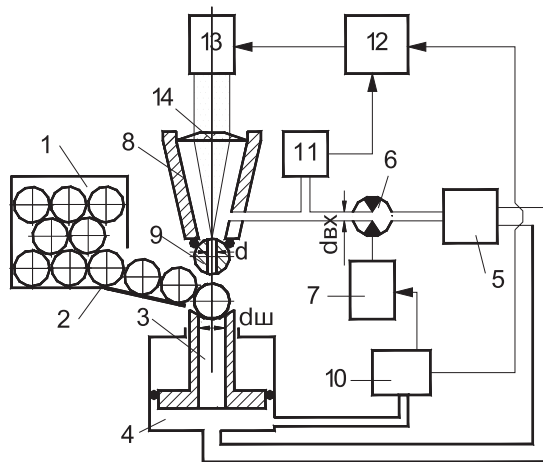
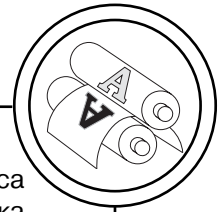


Рис. 12. Автоматическая ЛТУ для обработки отверстия в распылителе омывателя ветрового стекла

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



дра 3, имеющий сквозное отверстие, соединяющее рабочую полостью цилиндра 4 с атмосферой. Воздух в эту полость подается насосом 5 через регулируемый дроссель 6 с приводом 7 из измерительной камеры 8, подобной стакану 2 в конструкции рис. 11, а. Заготовка, перекрывшая отверстие в штоке 3, поднимается им в сторону торца с уплотнением измерительной камеры 8 и при герметизации ею последней, ограничивает подачу воздуха в пневмоцилиндр, что вызывает опускание штока в исходное (нижнее) положение. Датчик избыточного давления 10 фиксирует его отсутствие в пневмоцилиндре 4 и приводом 7 переключает дроссель до проходного размера $d_{вх}$, определяемого по зависимости (4), то есть задает величину разряжения в камере 8 для удержания заготовки до достижения размера обрабатываемого отверстия в ней заданной величины.

$$d_{вх} = d \left(1 - \frac{G_3}{Sp_a}\right)^{-1/2}, \quad (4)$$

где d — диаметр обрабатываемого отверстия, G_3 — вес заготовки, S — ее уплотняемая площадь, p_a — атмосферное давление.

При достижении в измерительной камере выбранного уровня разряжения датчиком 11 запускается источник питания 12 лазера 13 и лазерный луч, сфокусированный линзой 14, начинает обработку отверстия. После окончания обработки заготовка освобождает торец измерительной камеры, открыва-

ется входное отверстие насоса 5 и находящаяся на торце штока очередная заготовка поднимается в рабочую позицию, таким образом, обрабатывается партия заготовок, находящихся в бункере 1.

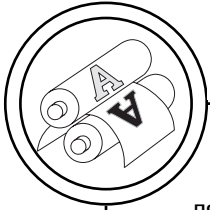
Выводы

Примеры технологической оснастки, приведенные в работе, доказывают гипотетическое свойство гибкости лазерного луча как инструмента. Однако, это свойство придается инструменту при выполнении некоторых предпосылок:

- при достаточной управляемости режимом работы лазера и параметрами пучка излучения, для чего необходима разработка средств периодического воздействия на резонатор, как для изменения режима генерации, так и параметрического воздействия на пучок излучения;

- разработка новых технологических схем обработки должна сопровождаться созданием соответствующих устройств оперативного преобразования и транспортирования пучка, основанных на не материальности и без инерционности излучения;

- для формирования рабочего инструмента необходимо предусматривать возможность многофункционального плавного варьирования такими параметрами инструмента как поперечный и продольный размеры, формой каустики пучка и эффективной системой размерного позиционирования заготовке в последней;



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

— наиболее эффективной является автоматизация контрольных переходов технологической операции при последовательной схеме получения заданного результата (например, размера обрабатываемого элемента), так как таким образом можно повысить качество обработки без сложной процедуры устранения нестабильностей процесса или снижения чувствительности к ним.

1. Котляров В. П., Анякин Н. И. Оптимизация технологических процессов лазерной обработки // Лазерная технология. — Вильнюс: ИФЛ, 1988. — С. 65—68. 2. Котляров В. П. Методы повышения качества лазерной обработки отверстий // Электронная обработка материалов. — 1986. — № 2. — С. 5—13. 3. Справочник по технологии лазерной обработки / В. С. Коваленко, В. П. Котляров, В. П. Дятел и др. — Киев: Техніка. — 1985. — 168 с. 4. Патент Германии № 2821883 В23К 26/00 от 17.07.80 г. 5. А. с. СССР № 1541926 В23К 26/00 Установка для лазерной обработки. — Котляров В. П., Акимов В. Л., Лопота В. А. — 1989. 6. Вейко В. П. Лазерная микрообработка. — СПб: СПбГУ ИТМО. — 2005. — 110 с. 7. А. с. СССР № 1757347 В23К 26/00 Объектив-сканер. — Котляров В. П., Царук В. П., Ивановский А. А. и др. — 1992. 8. Котляров В. П., Коваленко В. С., Анякин Н. И. ОКГ для лазерных технологических установок // Электрохим. и электрофиз. методы обработки материалов, Сб. научн. тр. — Тула: ТПИ, 1985. — С. 31—35. 9. А. с. СССР № 1610707 В23К 26/00 Лазерный излучатель для технологических установок. Котляров В. П., Штома И. И. — 1990. 10. А. с. СССР № 965921 В23К 26/00 Лазер. — Котляров В. П., Романенко В. В. — 1981. 11. А. с. СССР № 792732 В23К 26/00. Устройство для обработки отверстий лучом лазера. — Котляров В. П. — 1979. 12. А. с. СССР № 574895 В23К 26/00 Объектив. — Коваленко В. С., Дятел В. П. — 1979. 13. Пол. реш. по заявке № 4939684/08. Устройство для изменения фокусного расстояния. — Котляров В. П., Постригань С. В., Царук В. П. — 1994. 14. А. с. СССР № 1176531 В23К 26/12 Установка для лазерной обработки. — Котляров В. П., Стоялов В. М. — 1985. 15. А. с. СССР № 1178022 В23К 26/00 Установка для пробивки отверстий лазерным лучом. — Котляров В. П., Коноваленко Ю. В. — 1985. 16. А. с. СССР № 1330877 В23К 26/00. — Устройство для лазерной пробивки отверстий. Котляров В. П., Анякин Н. И. — 1987.

Рецензент — А. І. Жученко, д.т.н.,
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 27.11.08