

УДК 621.23.000:241

В. Ю. Холодный, С. В. Коваленко, Ю. А. Павлюченко, Г. В. Габузян, А. Ф. Саленко*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СТРУЙНО-ЛАЗЕРНОГО ПЕРФОРИРОВАНИЯ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ПРОФИЛИРОВАННЫМ ПОТОКОМ

Показаны результаты исследований лазерно-струйной технологии обработки материалов, как одного из перспективных методов резки различных изделий. Показаны особенности создания профилей насадок (переходного участка) для лучшего формирования лазерно-струйного потока. Создано оптимальное отверстие полости насадка. Используя программное обеспечение Mathcad проведено моделирование распространения светового потока, как в полости насадка, так и в свободной струе. Было проведено математическое моделирование потока жидкости через полости построенных насадок с использованием программы моделирования потоков жидкостей FlowVision. Был проведен ряд исследований на имитационной установке и на лазерно-струйном комплексе ЛСК-400-5. Диаметр струи должен быть больше диаметра луча лазера на величину ее распада.

Ключевые слова: лазерно-струйная обработка, отверстие, высокоэнергетический поток.

Введение

Сотовые композиционные и сэндвич-панели широко используются в авиационной, ракетно-космической технике, в энергетическом машиностроении. Такие панели могут быть не только основой для монтажа силовых элементов и устройств, но и выступать средствами пассивного шумопоглощения. Сэндвич-конструкции, состоящие из нескольких листовых элементов, соединенных между собой перфорированным сотовым наполнителем – гофрабором – имеют высокую прочность, огнестойкость; при внешнем перфорировании улучшается их шумопоглощающие свойства. Как правило, сотовые панели изготавливаются из карбон-полимерных (типа С-41) или карбон-карбоновых композиций, стеклопластика типа СВАМ, Аг-4С; силовые панели авиационной и космической техники производятся из титановых и алюминиевых сплавов. Перфорация может быть внутренней (для выравнивания давления в негерметичных сотовых панелях) и внешней (для обеспечения звукопоглощающего эффекта) [1].

Операции перфорирования являются сложными и нетехнологичными, поскольку предусматривают получение большого количества мелких отверстий, с точным взаимным расположением; требуют сведения к минимуму деструкции и расслоения материала в месте отверстия, а также любых концентраторов напряжений, возникающих в момент получения отверстия.

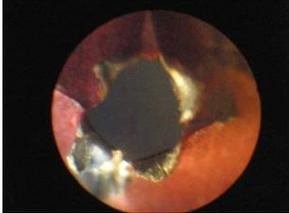
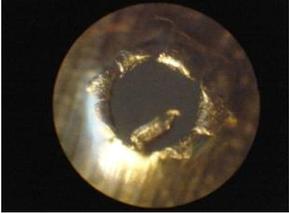
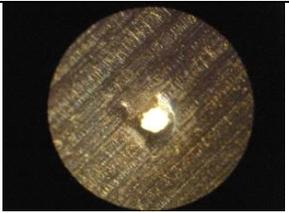
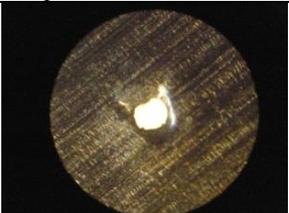
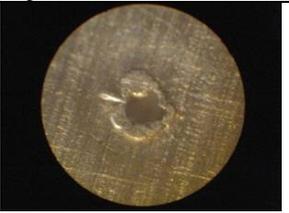
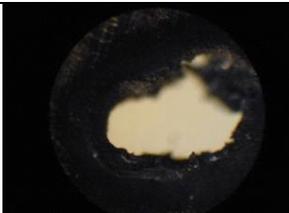
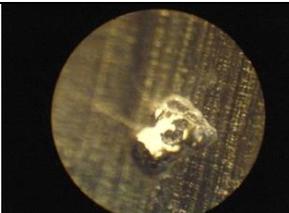
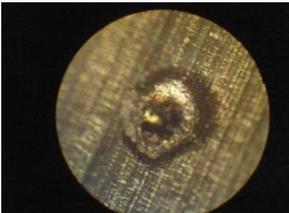
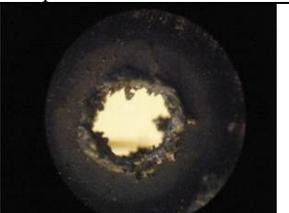
С учетом результатов, полученных в [2] и [3], можно утверждать, что для тонких сотовых наполнителей лазерная перфорация является достаточно продуктивной и эффективной при ус-

ловии, что диаметр отверстия не превышает 0,01–0,05 мм (табл. 1); отверстия большего диаметра (0,05–0,12 мм) традиционно выполняют механическим способом с помощью установленных в гребенку инденторов. При этом механическая перфорация фольги малой толщины жесткими инденторами часто приводит к возникновению повреждений заготовки и образованию концентраторов напряжений в зоне отверстий, представляющих собой разрывы разной формы. Электроискровая прошивка имеет другие недостатки – нестабильность формы отверстия, а в некоторых случаях и полное отсутствие отверстия в целом, что при последующих операциях сборки может привести к возникновению герметизации ячейки соты и ее разрушению во время эксплуатации.

Выполнение отверстий диаметром 0,9–1,2 мм методом копирования в неметаллических панелях целесообразно осуществлять с помощью специальных гидроабразивных головок [4]. Однако для обработки металлических листов такой способ мало приемлем.

Поскольку перфорацию получают методом копирования инструмента – тела механического индентора, сечения гидроабразивного потока, перетяжки каустики лазера, образующей сверла, для панелей сот с продольно установленным наполнителем получения отверстий 0,3–0,5 мм остается проблемным до настоящего времени. Так как указанные размеры отверстий больше диаметра сфокусированного лазерного излучения, рассматривается возможность получения отверстий определенной конфигурации в листовых заготовках средствами струйно-лазерной обработки.

Таблица 1 – Сравнение геометрии и внешнего вида отверстий, полученных различными методами на образце фольги толщиной 55 мкм

	Тип 1 (полное отверстие)	Тип 2 (отверстие со стружкой)	Тип 3 (отсутствует отверстие)
Механическое прошивание (механич. индентор, ср. диам. 0,32 мм)	 <p>$D_{min}=0,26$ мм, $D_{max}=0,41$ мм, Особенность – наличие острых кромок, концентраторов напряжений</p>	 <p>$D_{min}=0,28$ мм, $D_{max}=0,38$ мм, Особенность – наличие острых кромок, концентраторов напряжений, а также фрагментов фольги в отверстии</p>	 <p>$D_{min}=0,25$ мм, $D_{max}=0,34$ мм, Особенность – поломка индентора привела к отсутствию полного формообразования отверстия, отверстие дефектное</p>
Лазерное прошивание (частота 150 Гц, диам. пятна в фокусе 0,12 мм, ориент. перетяжка каустики – 0,08 мм)	 <p>$D_{min}=0,11$ мм, $D_{max}=0,13$ мм, Криволинейное</p>	 <p>$D_{min}=0,12$ мм, $D_{max}=0,14$ мм, Криволинейное, с каверной</p>	 <p>$D_{min}=0,1$ мм, $D_{max}=0,11$ мм, Каверна без сквозного отверстия</p>
Электроискровое прошивание (игла с радиусом 0,04 мм, материал - графит, ток $I=50$ А, $U=36$ В)	 <p>$D_{min}=0,12$ мм $D_{max}=0,45$ мм Оплавление, нарушение формы, существование отклонения от круглости</p>	 	 <p>$D_{min}=0,12$ мм $D_{max}=0,45$ мм Оплавление, форма более правильная, требует применения вольфрамовых электродов и оптимизации межэлектродного промежутка</p>

Объединение луча лазера (мощностью около 500 Вт с длиной волны излучения 530–1062 нм) со струей жидкости малого диаметра дает возможность получить новый термогидродинамический способ обработки материалов, который обладает достаточно широкими технологическими свойствами [5]. В настоящее время авторы работ [6, 7] заявляют, что существует более 10 высокоэффективных способов использования этого нового инструмента – от резки микроэлектронных чипов до выполнения операций

полирования небольших криволинейных поверхностей. Струйно-лазерная обработка базируется на принципе сочетания высокоэнергетических потоков – гидродинамического и квантового, управление которыми позволяет интенсивно изменять состояние материала в зоне воздействия в течение непродолжительного времени. При этом, согласно [8], такие воздействия могут быть разделены на формообразующие и интенсифицирующие.

Технологии лазерно-струйного резания (прошивки) имеют следующие преимущества:

1) обеспечивают локальную управляемую термогидродинамическую нагрузку, которая ведет к формоизменению зоны воздействия с одновременным изменением структуры поверхностного слоя (его модификация);

2) имеют возможность локализации влияния на малых площадях, сопоставимых с размерами струйного потока;

3) активизируют факторы разрушения обрабатываемого материала, без распространения деструкции за пределы зоны влияния.

В то же время систематизированные сведения о явлениях и о рациональных режимах выполнения операций прошивки отверстий в пластинах, панелях и элементах криволинейного профиля с помощью струйно-лазерного потока в настоящее время отсутствуют, чем и обусловлена актуальность данной работы.

Результаты исследования

Известно, что луч лазера, падая на поверхность в течение некоторого времени t , мс, создает локальный нагрев зоны облучения [9]:

$$q(x) = q_0 \exp\left(-\frac{x^2}{r^2}\right), \quad (1)$$

где q_0 — плотность мощности излучения в центре пятна фокусировки; r — радиус луча с учетом распределения плотности излучения в соответствии с законом Гаусса.

При прошивке отверстия температурное поле будет определяться следующим образом:

$$T(x, z, t) = \frac{q_{\max} r^2}{K} \left(\frac{a}{\pi}\right)^{1/2} \int_0^t \frac{P(t-t') dt' \exp\left[\frac{z^2}{4at} - \frac{x^2}{4at'}\right]}{\sqrt{t'(4at' + r^2)}}, \quad (2)$$

где q_{\max} — максимальная плотность мощности излучения в центре пятна; x — радиальное расстояние от центра теплового источника;

$P(t) = q(t) / q_{\max}$, что при условии отражения излучения от оболочки струи позволяет предположить существование соответствия профиля получаемого отверстия сечением струи в плоскости его натекания на обрабатываемую поверхность как преграду.

Уравнения баланса тепловой энергии в произвольной области $\omega \subset \Omega$ с учетом начальных условий может быть представлено так:

$$\int_{\omega} \frac{\partial e}{\partial t} dv = \int_{\omega} g dv - \oint_{\partial \omega} \left(\vec{q}_T + c_g c_g T \vec{v}_f, \vec{n} \right) ds. \quad (3)$$

Поток жидкости, натекая на поверхность обработки, будет вызывать ее охлаждение путем

отвода теплоты от зоны влияния, в результате чего распространение термической деструкции за зону действия сфокусированного лазерного излучения происходить не будет. Действие потока жидкости учитывают краевые условия [10]:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} - \lambda \Delta T = \frac{(T - R_0) k P}{\pi AB} \exp \times \left[-2 \left(\frac{(x - vt)^2}{a^2} + \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right) \right] \times \exp(-kz) \quad \lambda \frac{dT}{dz} \Big|_{z=0} = \alpha(T - T_p). \quad (4)$$

Таким образом, температурное поле в зоне действия лазерно-струйного потока будет определяться так:

$$T(x, y, z) = \frac{P}{\pi^2 \rho c} \int_0^t \left[\frac{(x - v(t-t'))^2}{4\alpha t + A^2} + \frac{y^2}{4\alpha t + B^2} \right]^{1/2} \times \exp \left[-\frac{z^2}{4\alpha t} - h(\pi \alpha t)^{1/2} \exp \left(\frac{z}{2(\alpha t)^{1/2}} + h(\alpha t)^{1/2} \right) \times e^{hz + h^2 \alpha t} \right] dt, \quad (5)$$

где ρ , c , λ , $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$, h — плотность, удельная тепло-

емкость, коэффициент теплопроводности и температуропроводность материала заготовки, коэффициент теплоотдачи с поверхности заготовки соответственно; A и B — большая и малая полуоси эллиптического луча; $P = \pi q_0 AB$ — мощность лазерного излучателя.

Поскольку разрушение обрабатываемого материала вызывает его циклическое термическое нагружение до образования ванны расплава с последующим гидродинамическим ударом, ведущим к смыканию ванны и удалению продуктов из зоны резания, на основе анализа приведенных закономерностей очевидно, что увеличение интенсивности охлаждения ведет к локализации тепла возле центра воздействия. Следовательно, разрушения материала следует ожидать в локальной зоне ($\leq 0,1-0,15$ мм), соответствующей площади сечения потока и термического воздействия. Но при натекании на преграду поток начинает растекаться. Кроме того, осесимметричный поток и симметричное распределение излучения по сечению являются гипотетическими, а в действительности существует ряд геометрических пространственных отклонений в системе «сопло-фокусирующая система». При этом сама форма среза сопла может быть произвольной.

Именно поэтому представляет интерес вопрос определения картины распределения интенсивности облучения поверхности и, соответственно, формы и профиля лунки воздействия при вы-

полнении операций струйно-лазерной прошивки.

Для оценки формы образующейся лунки выполнили моделирование потока жидкости после его выхода из сопла и в плоскости натекания на препятствие – обрабатываемую заготовку. При этом исходили из предположения, что несоосность луча с выходным отверстием сопла, отличие формы отверстия от округлости ведет к уменьшению интенсивности излучения по сечению струйного потока и к изменению интенсивности по сечению, которая, при общем ослаблении, должна быть более стабильной. Учитывали также и то, что из всех рассмотренных вариантов входной части сопла конический конфузор может обеспечить постоянство предельного угла полного отражения независимо от величины смещения оси лазерного источника. Таким образом, этот участок будет создавать соответствующие условия для обеспечения рассеивания луча в теле струи, которое соответствует ее форме струи в плоскости натекания на препятствие. При этом места, в которых будет наблюдаться резкое изменение скоростей и направлений движения жидкости, будут максимальными диссипаторами энергии луча лазера. Такое предположение не противоречит результатам, полученным авторами [6, 9, 10].

С учетом условий отражения луча от внутренней оболочки струи (рис. 1), как тела с определенной прозрачностью и коэффициентом преломления на границе «вода-воздух», n угол наклона образующей конфузора не должен превышать $20^\circ 30'$. Для установления градиентов скорости потока в плоскости натекания на обрабатываемую поверхность выполнено моделирование его формообразования средствами среды FlowVision (рис. 2).

Считали, что струйный поток формируется соплом с изменяемой геометрией проточной части. Составляющие элементы сопла позволили получить такие формы выходного отверстия (на срезе): круглый, прямоугольный с закругленными углами, овальный. Они соответствуют ре-

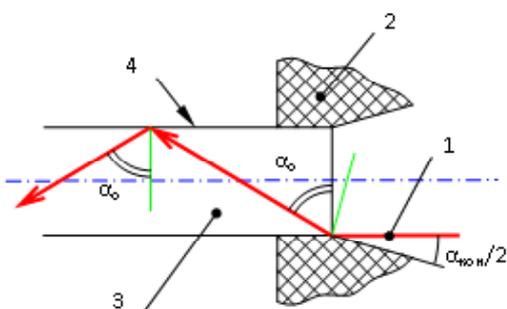
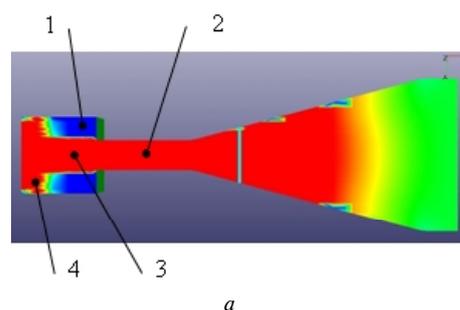


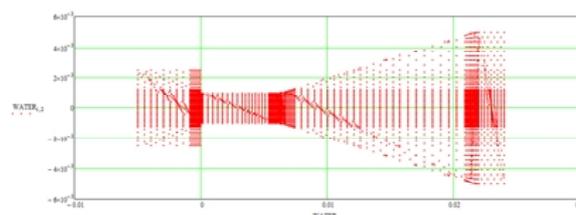
Рис. 1. Расчетная схема определения угла образующей конуса переходного участка насадка:

1 – лазерный луч; 2 – насадок; 3 – струя жидкости; 4 – граница сред (вода-воздух)

комендованным формам и размерам отверстий перфорации в наполнителях сот и панелях. Диаметр описанного вокруг профиля круга составляет 2,15 мм. Скорость потока жидкости на входе в насадок – 14...50 м/с. Оценивали перепад скоростей в свободном потоке (за срезом сопла) и устанавливали зоны максимальной неустойчивости, в которых, согласно результатам, возможно максимальное рассеивание луча лазера. При выполнении расчетов полученный массив данных, состоящий из 5594 строк координат по осям x и y , а также значений скорости по оси x (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Моделирование течения жидкости в сопле и за его пределами FlowVision (а) и массив точек, характеризующий скоростной режим потока (б):

1 – воздушная среда; 2 – участок насадка с профилированным отверстием; 3 – свободный поток жидкости; 4 – растекающийся поток после контакта с плоскостью обработки

Точечная визуализация массива данных, полученных в результате расчетов, позволяет установить не только распределение скоростей в потоке, и косвенно определить изменение интенсивности лазерного излучения при условии, что распределение интенсивности на перетяжке каустики в плоскости входа в конфузор соответствует закону Гаусса (рис. 3).

Результаты расчета показали существование определенного расстояния от среза сопла, на котором потери мощности вследствие нарушения устойчивости течения будут максимальными, и, соответственно, производительность обработки резко уменьшается; за этим сечением можно ожидать снижение точности воспроизведения контура.

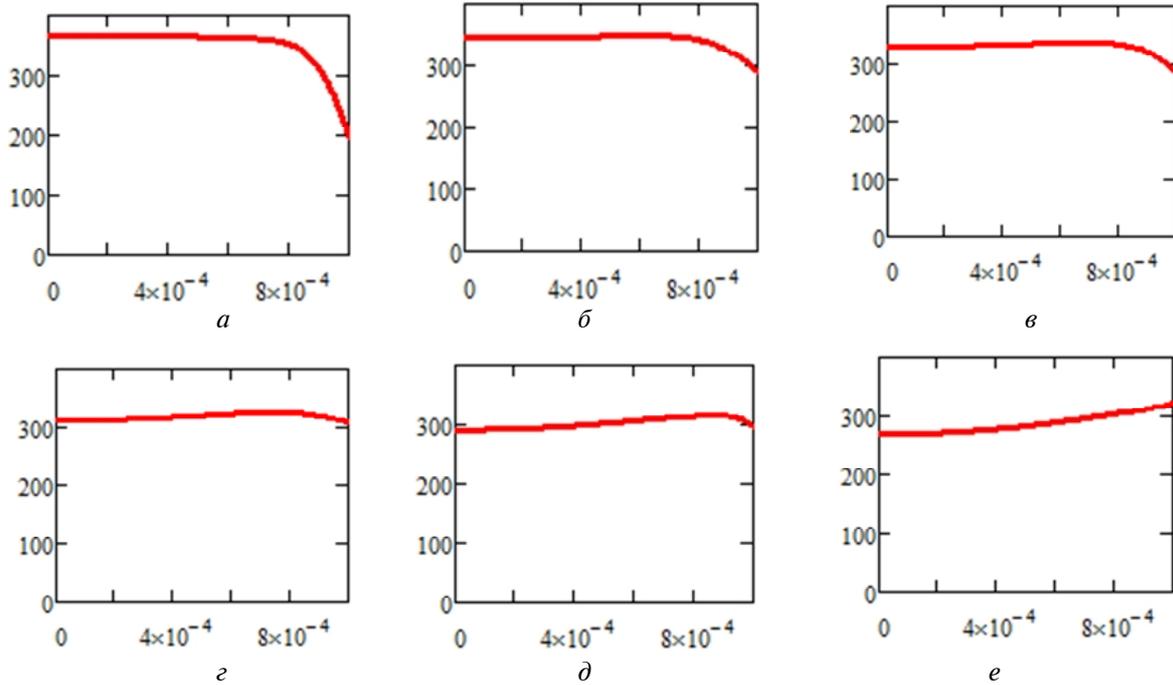


Рис. 3. Уменьшение скорости потока на торце насадки и на каждом последующем сечении струи за срезом, с шагом 1,0 мм: *a* – торец сопла; *б – e* – расстояние от торца сопла с шагом 1,0 мм, *e* – поверхность обработки

Анализ полученных гистограмм показывает, что поток жидкости малого диаметра, в который введено лазерное излучение, вызывает изменение его интенсивности по сечению (рис. 4), причем существует определенное расстояние между срезом сопла и поверхностью обработки, при которой наблюдается максимальное выравнивание без потери мощности. Следовательно, изменением формы среза сопла (выходного отверстия) можно обеспечить изменение формы получаемых отверстий, и улучшить их качество, что важно для выполнения перфорации в ответственных элементах летательных аппаратов.

Проведен ряд экспериментальных исследований, направленных на установление закономерностей изменения формы и размеров пятна обработки от геометрических параметров струйно-оптической системы.

Влияние геометрических параметров струйного потока и условий введения луча лазера в струйный поток на параметры получаемого отверстия в листовых материалах толщиной 0,05–2,5 мм оценивали с помощью специального лабораторного оборудования (рис. 5), которое позволило получить картины распределения интенсивности излучения (рис. 7) и установить функциональную обусловленность полей интенсивности облучения режимами течения жидкости, профилем сопла, отклонением соответствующих осей сопла и оптической системы лазера. Для получения картин распределения интенсивности использовали источник лазерного излучения с номинальным диаметром луча 1,2 мм (100 мW, 532 нм). Струя жидкости формировалась насадком с выходным отверстием с сечением диаметром 2 мм круглой, прямоугольной и овальной формы. Ве-

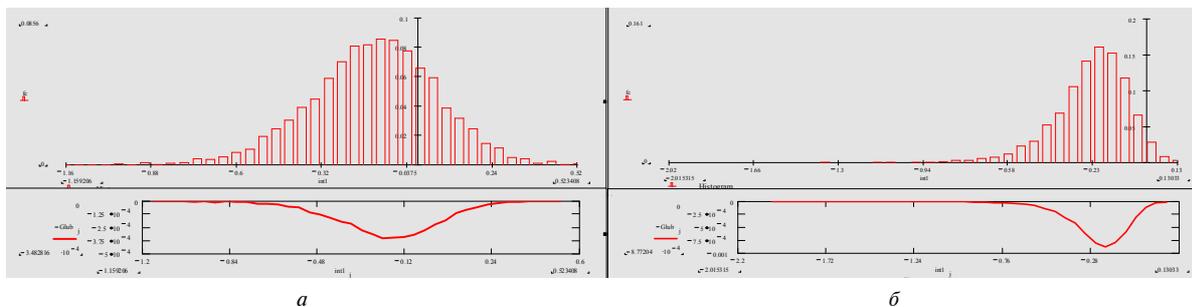


Рис. 4. Гистограммы и выровненные кривые интенсивности излучения в пятне на обрабатываемой поверхности при струйно-лазерном воздействии (*a*) и лазерном без потока жидкости (*б*). Ось лазера относительно оси сопла смещена на величину $0,1D_c$

личину излучения фиксировали с помощью фоторезистора ФСД-1. Устранение шума сигнала в процессе измерений осуществлял АЦП m-DAQ. При исследованиях расстояние L_{bi} от торца насадки до рабочей поверхности изменяли в пределах 0,05–48,0 мм с шагом 1,0 мм, давление жидкости перед насадкой – 0,5 МПа.

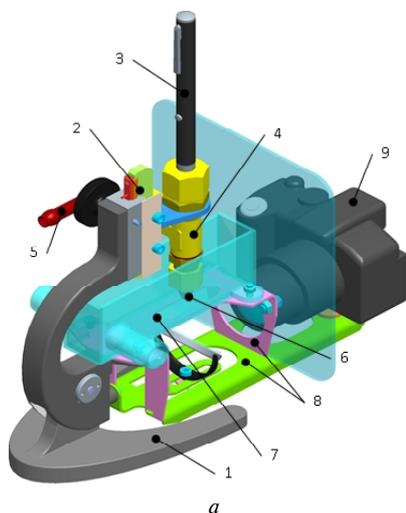


Рис. 5. 3D модель (а) устройства для исследования распределения излучения и используемые сопловые насадки (б), полученные методом прототипирования:

1 – основание; 2 – механизм вертикального перемещения насадка; 3 – источник лазерного излучения; 4 – камера коаксиального ввода луча лазера в струю жидкости; 5 – трубка подвода жидкости; 6 – насадок с профильным калибровочным каналом; 7 – рабочая ванна; 8 – фотоаппарат для фиксации распределения луча в отражении на мишени в ванне; 9 – кронштейн для крепления ванны и фотоаппарата

Было установлено, что интенсивность распределения излучения на поверхности имеет существенную неоднородность: на рис. 7 приведены результаты измерения интенсивности излучения на преграде в потоке жидкости диаметром 2,0 мм, несоосность 0,85 мм. При этом нетрудно видеть, что рост расстояния от среза сопла до преграды ведет к выравниванию неоднородности, а чрезмерный рост – к падению полной интенсивности. Изменяя расстояние L_{bi} , установили распределение интенсивности излучения и получили ряд эпок температур нагрева поверхности (в без-

размерном виде) в зависимости от параметра $\Phi = \frac{W_i}{d_c}$, W_i – смещение точки фокусирования по поверхности конфузора (рис. 6). Было установлено, что такое смещение способно вызывать нагревание поверхности за зоной непосредственного действия луча лазера при одновременном выравнивании интенсивности излучения в центральном сечении.

Таким образом, струйный поток способен не только вызывать интенсивное охлаждение поверхности, но и перераспределять излучение на площадь, превышающую площадь каустики на конфузоре. При этом существует определенное расстояние между срезом сопла и обрабатываемой поверхностью, при котором достигается максимальное выравнивание интенсивности при минимальных потерях мощности излучения.

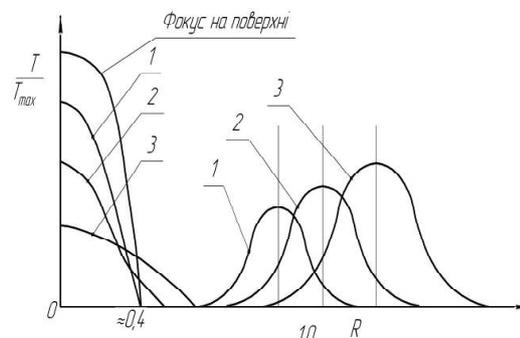


Рис. 6. Распределение относительной температуры (T/T_{max}) на поверхности в функции параметра W :

1 – $W = 0,2$; 2 – $W = 0,4$; 3 – $W = 0,6$

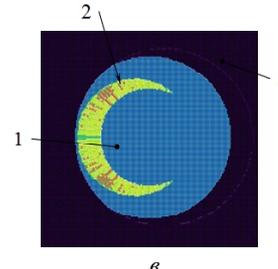
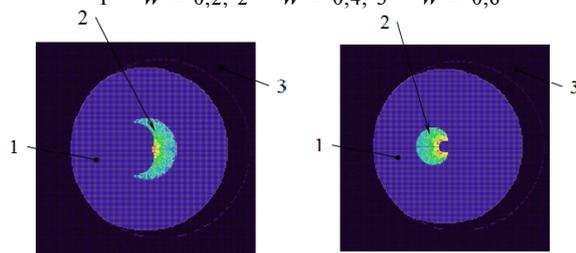


Рис. 7. Распределение интенсивности излучения на плоской поверхности при натекании струи диаметром 2,0 мм при несоосности луча и струи 0,8 мм для среза в форме правильного круга: а – расстояние от среза сопла до преграды 5 мм; б – 10 мм; в – 16 мм; 1 – отражение луча лазера, проходящего сквозь струю без излома; 2 – отражение луча от конусного участка насадка и границы «вода-воздух»; 3 – поверхность обрабатываемой детали

Поскольку такое различие может привести к изменению ожидаемого профиля отверстия, проводили исследования формы и точности отверстий в заготовках из нержавеющей стали марки 12Х17 толщиной 1,5 мм и в алюминиевой фольге на установке ЛСК-400-5; обработку выполняли со следующими режимами: давление истечения – 5,0–60,0 МПа, частота следования импульсов – 50 Гц, отверстия формировались как одним импульсом, так и серией в течение 0,15–0,25 с.

Получены образцы отверстий, имеющие форму, соответствующую форме канала сопла. При этом установлено, что достижение определенного качества кромки отверстия возможно изменением расхода жидкости (рис. 8).



Рис. 8. Отверстие в форме эллипса, полученное при установившемся движении жидкости (а) и полученное при нарушении режима течения (б)

В зависимости от требуемого диаметра отверстия D_0 и его формы, марки материала и толщины заготовки h_z , количество импульсов различно. Так, при обработке испытываемых образцов (АМг и 12Х17) установлено (рис. 9, а), что для фольги толщиной 25–55 мкм отверстие может быть получено одним импульсом, за минимально короткое время (не превышающее 0,05 с). Увеличение диаметра отверстия D_0 , увеличение толщины заготовки требует соответствующего увеличения времени обработки (количества импульсов), которое может достигать 2,0 с. При этом дальнейшее повышение времени обработки только ухудшает качество отверстия. Применение сопел большего диаметра нецелесообразно, поскольку наблюдается существенное отклонение формы отверстия от формы струйного потока (рис. 9, б). сравнение полученных результатов показывает, что круглая форма отверстия наиболее легко достижима; в листовых заготовках такие отверстия получают до диаметром 0,8 мм при снижении точности воспроизведения формы до 0,95; отверстия овальные и квадратные получают удовлетворительными по форме до 0,25 мм. Дальнейшее увеличение размеров ведет к существенному снижению точности – в среднем до 0,75 и хуже.

Таким образом, использование струйно-лазерного метода получения массива отверстий в тонколистовых заготовках из металлов и сплавов позволяет формировать качественные отверстия

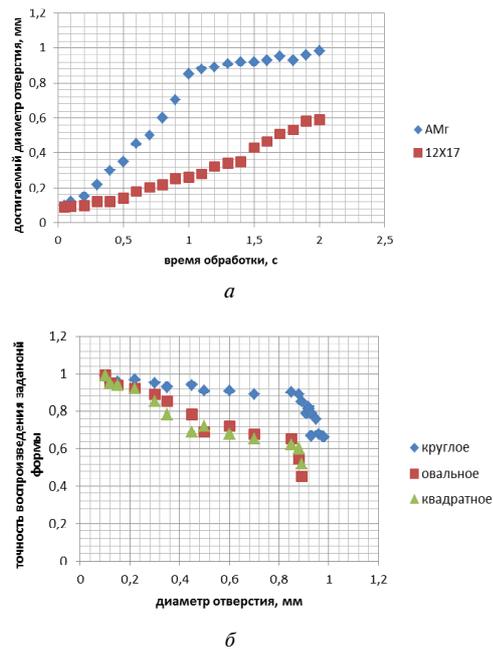


Рис. 9. Достижимые диаметры отверстий (а) за время обработки, с; точность воспроизведения заданной формы (б) в зависимости от формы среза сопла

диаметром 0,09–0,8 мм и более с практически полным отсутствием деструктивного слоя, а также выполнять перфорирование заготовки отверстиями в виде квадрата, эллипса и другой формы размерами до 0,25 мм с высокой производительностью.

Требуются дальнейшие исследования, направленные на влияние режимов истечения жидкости и частоты квантового потока на структурно-фазовые изменения в поверхностном слое различных материалов, результаты которых могут быть положены в основу методов функциональной обработки современных специальных материалов.

Выводы

Проведенные исследования позволили предложить действенный и эффективный способ получения профильных отверстий малых диаметров (от 0,1 до 0,8 мм) в наполнителях сотовых панелей и в самих панелях, который отличается высокой производительностью и позволяет получать отверстия без термических и механических дефектов. Способ может быть использован как для фольгированных наполнителей, так и для металлических панелей из нержавеющей стали толщиной до 1,5 мм.

Список литературы

1. Соколов Н. И. Сфероластики авиационного назначения на основе эпоксидных клеев и дисперсных наполнителей / Н. И. Соколов, В. Т. Минаков // ВИАМ/2011. – 205948. – 2011.

2. Функціонально-орієнтований підхід до удосконалення процесів гідроабразивного перфорування стільників із композиційних матеріалів / [О. Ф. Саленко, О. М. Мана, В. А. Нікітін, Ю. О. Павлюченко и др.] // Промислова гідраліка і пневматика. Всеукраїнський науково-технічний журнал. – Вінниця, 2014. – Вип. 4/2014 (46). – С. 64–72.
3. Pauchard Alexandre. Experimental micromachining results using a uv laser with the laser microjet / Alexandre Pauchard, Nandor Vago, Bernold Richerzhagen [text] // Synova SA, Chemin de la Dent d'Oche, 1024 Ecublens, Switzerland, pauchard@synova.ch // Proceedings of the 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics 2008.
4. About some results of exploration of water jet guided laser onto the solids' surface / O. [Salenko, O. Fomovska, V. Dudyuk, O. Mana] // Unitex – 10: International scientific conference 19–20 November 2010, Gabrovo 2010. – P. 414–421.
5. Synova: The water jet guided laser. – S.A., Switzerland. – 28 March 2006. [Электронный ресурс] <http://www.synova.ch/microjet.pdf>
6. R. Martin «Natural diamond cutting using water jet-guided laser», Laser LIM. – 25.05.2011. – [Электронный ресурс] <http://www.synova.ch/conferences>
7. Salenko A. About effects of stream-beam influence on a surface of firm bodies [text] / A. Salenko, V. Dudyuk, O. Mana // Unitex-09: International scientific conference. – Vol. 3. – P. 462–468. – Gabrovo, 2009. – Laser workshop: Mittweida – Germany.
8. Коваленко В. С. Комбіновані лазерно-дугові процеси обробки матеріалів. Ч. 1. Ефекти комбінованої обробки і способи її реалізації / В. С. Коваленко, І. В. Кривцун // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2001. – № 5. – С. 33–44.
9. Laser Parallel Thermocracking of Brittle Nonmetallic Materials / [V. S. Kondratenko, V. E. Borisovsky, P. D. Gindin, A. S. Naumov] // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. «Priborinform-2005», Tunisia, October 2005.
10. Кучеров А. Н. Распространение лазерного пучка в потоке жидкости и газа : автореф. на соиск. уч. степени докт. тех. наук, спец. 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. – ЦАГИ. – Москва, 2004.

Поступила в редакцію 30.03.2015

**Холодний В.Ю., Коваленко С.В., Павлюченко Ю.О., Габузян Г.В., Саленко О.Ф.
Підвищення ефективності процесу струменево-лазерного перфорування листових заготовок профільованим потоком**

Показано результати досліджень лазерно-струменевої технології обробки матеріалів, як одного з перспективних методів різання різних виробів. Показано особливості створення профілів насадків (перехідної ділянки) для найкращого формування лазерно-струменевого потоку. Створено оптимальний отвір порожнини насадка. Використовуючи програмне забезпечення Mathcad проведено моделювання поширення світлового потоку, як в порожнині насадка, так і в вільному струмені. Було проведено математичне моделювання потоку рідини через порожнини побудованих насадків з використанням програми моделювання потоків рідин FlowVision. Було проведено ряд досліджень на імітаційній установці і на лазерно-струменевому комплексі ЛСК-400-5. Діаметр струменя повинен бути більше діаметра променя лазера на величину її розпаду.

Ключові слова: лазерно-струменева обробка, отвір, високоенергетичний потік.

Kholodnyi V., Kovalenko S., Pavluchenko U., Gabuzian G., Salenko A. Increase of efficiency process of water jet guided laser perforation sheet workpieces by profiled stream

The results of researches of water jet guided laser method of materials processing as one of the perspective methods cutting various products are shown. The features create profiles nozzles (transition area) for optimal forming water jet guided laser stream are shown. Created optimal hole of nozzle cavity. Using Mathcad was conducted modeling of dissemination of light stream as a nozzle cavity and in the free jet. Mathematical modeling of fluid flow through the constructed nozzle cavity in FlowVision was conducted. A lot of researches on simulated installation and laser-jet complex LSK-400-5 was conducted. The diameter of the jet must be greater than the diameter of the laser beam on the value of its collapse.

Key words: water jet guided laser, hole, power beam effectivity.