

*Показані результати досліджень лазерно-струминного процесу профілювання алюмінієвої фольги АМг-2Н, використовуваної для гофронабора авіаційно-космічних стільникових панелей. Встановлено залежність міцності матеріалу від режимів виконання обробки, наведені раціональні схеми лазерно-струминного прошивання отворів, а також надано рекомендації щодо призначення режимів перфорування. Обґрунтовано положення про можливість виконання отворів різної форми*

*Ключові слова: лазерно-струменевий метод, перфорація, алюміній-магнієва фольга, дефектний шар, отвір, високоенергетичний потік, стільникові панелі*

*Показаны результаты исследований лазерно-струйного процесса перфорирования алюминиевой фольги АМг-2Н, используемой для гофронабора авиационно-космических сотовых панелей. Установлена зависимость прочностных характеристик материала от режимов выполнения обработки, приведены рациональные схемы лазерно-струйного прошивания отверстий, а также даны рекомендации по назначению режимов перфорирования. Обосновано положение о возможности выполнения отверстий различной формы*

*Ключевые слова: лазерно-струйный метод, перфорація, алюминий-магниева фольга, дефектный слой, отверстие, высокоэнергетический поток, сотовые панели*

# ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНО- СТРУЙНОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПЕРФОРИРОВАНИЯ СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ АВИАЦИОННЫХ СЕНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ

**В. Ю. Холодный**  
Ассистент\*

E-mail: v.kholodnyi@gmail.com

**А. Ф. Саленко**

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой\*

E-mail: salenko2006@ukr.net

\*Кафедра процессов и оборудования  
механической и физико-технической обработки  
Кременчугский национальный  
университет им. Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20,  
г. Кременчуг, Украина, 39600

## 1. Введение

Сотовые сэндвич-панели являются наиболее ответственными несущими элементами различных летательных систем и аппаратов [1]. Для их производства используются специальные технологии, позволяющие выполнить высокоточную укладку сотового заполнителя в гофронабор, произвести его предварительное перфорирование, выполнить проклейку панелей, а также осуществить соответствующий контроль готового изделия.

Для космических аппаратов, как правило, в качестве сотового заполнителя используется тонколистовая фольга [2], преимущественно алюминий-магниева, которая укладывается в гофронабор после предварительного перфорирования и нанесения клеевых полос. В дальнейшем, после шлифования торцов и разворачивания в требуемый размер, фольга фиксируется между несущими панелями клеевым или другим соединением.

Перфорация выполняется для уравнивания давления в получаемых сотах, а в некоторых случаях, для улучшения шумопоглощающих характеристик панели. От точности выполнения элементов панели, качества ее проклейки, а также качества предварительной обработки сотового заполнителя зависят ее физико-механические свойства, прежде всего, прочность, сопротивление изгибным, сжимающе-растягивающим многоцикловым и статическим нагрузкам, а также вес панели.

Традиционно перфорирование фольги из рулона осуществляется механическим способом путем прошивки отверстий группами игл [3], находящихся на барабане. Однако при такой обработке существует вероятность попадания отверстия на клеевую полосу, что приведет к герметизации соты в дальнейшем. Кроме того, отверстия после проколов содержат ряд концентраторов напряжений в виде разрывов и трещин, ослабляющих заполнитель и приводящих к снижению прочности панели в целом.

Поэтому поиск путей повышения эффективности перфорирования сотового заполнителя и устранения недостатков, указанных выше, является важной научно-технической задачей, решение которой позволяет улучшить качество панелей в целом.

---

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

---

Среди способов и методов получения различных отверстий малого диаметра лазерные технологии занимают ведущее место. Применение длиннофокусной оптики, средств контроля зоны обработки позволяет выполнять отверстия требуемой формы с высокой точностью в большинстве заготовок толщиной  $h$ , значительно превышающей диаметр  $d$  получаемого отверстий [4].

Перфорирование тонколистовых заготовок (в частности, алюминиевой фольги) с помощью импульсного лазерного излучения является достаточно сложным процессом. Если к отверстиям предъявляются высокие требования по точности формы, то используются лазеры со сканирующей системой, позволяющей формировать отверстие путем многократного обхода контура [5].

Заготовки с покрытиями также могут подвергаться лазерной обработке [6], при этом система управления лучом изменяет условия лазерного воздействия с целью предотвращение адгезионного повреждения поверхности. Используются фемто- и наносекундные лазеры, позволяющие, по свидетельству авторов, обеспечивать требуемое регулирование и высокое качество обработки.

Несколько иные системы (с изменяемым фокусным расстоянием) применяются при получении отверстий в заготовках значительной толщины. В [7] кроме того обосновывается возможность обработки отверстий в пакетах заготовок, без нарушения их структуры и формы отверстий.

Однако в случае, если высоких требований к отверстиям в заготовке не предъявляется (например, перфорирование мембран для упаковки продуктов питания), отверстия могут быть получены и другим способом – импульсным воздействием на обрабатываемый материал, при котором формообразование будет происходить вследствие высокоинтенсивного нагрева, плавления и частичного испарения материала в зоне воздействия [8]. Получаемые отверстия не имеют правильной геометрической формы, однако, использование традиционного Nd:Yag лазера, работающего в импульсном режиме (на частоте до 500 Гц), позволяет существенно удешевить стоимость обработки. Частота следования импульсов выбирается в соответствии с выбранной скоростью сканирования, что делает обработку также и высокопроизводительной. Главным недостатком такого перфорирования является неправильная форма отверстий, наличие зон оплавления в прилегающей области, а также вероятность неполного прошивания отверстия.

Новые возможности для получения высококачественных, достаточно точных отверстий (от 5 мкм до

800 мкм) открывает способ, носящий название Water Jet Guided Laser (WJGL), запатентованный фирмой Synova SA [9]. Данный способ предусматривает обработку лучом, транспортируемым струей жидкости малого диаметра (0,08–0,15 мм и более), истекающей из сопла под давлением 0,5–2,5 МПа.

Сущность процесса заключается в том, что на обрабатываемую поверхность циклически воздействует мощное лазерное излучение, для которого вода является световодом. Импульс излучения нагревает и расплавляет материал в локальной зоне, после чего в моменты пауз на расплав воздействует струйный поток, обеспечивающий высокоинтенсивное охлаждением ванны расплава и вынос продуктов разрушения.

Возможности метода достаточно широки: в [10] обобщается о перспективах использования WJGL для обработки кремниевых чипов (их раскроя с обеспечением низкодефектного торца реза, отсутствием сколов в пределах 1–3 мкм, в [11] приведены результаты по исследованию возможностей резки сверхтвердых материалов (CBN).

Ведутся также работы и по получению профилированных отверстий малого диаметра [12].

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение данного метода в производство сдерживает сложная струйно-лучевая головка ([13], рис. 1, а), предназначенная для введения луча лазера в струйный поток. Кроме того, наличие высокоточных механизмов и устройств обеспечения качества и формы получаемого отверстия приводят к значительному удорожанию системы WJGL и препятствуют ее внедрению в современное машиностроение.

Учитывая, что WJGL-обработка базируется на использовании наиболее дешевых и надежных импульсных Nd:Yag лазерах, и позволяет выполнять отверстия в тонколистовых заготовках с высокой производительностью, данный метод может быть применен и для получения перфорации в сотовом заполнителе авиационных сэндвич-панелей.

Авторским коллективом кафедры ПОМФТО КрНУ им. М. Остроградского (г. Кременчуг, Украина) разработана оригинальная система для совмещения струи жидкости с лучом [14], использующая принцип формирования струи кольцевым соплом.

Применение запатентованной системы позволяет использовать различные формы насадок, что значительно расширяет технологические возможности данного метода (рис. 1, б). Однако в этом случае требуется проведение дополнительных исследований, поскольку условия формирования струи оказывают существенное влияние на эффективность его транспортирования в рабочую зону, и по свидетельству [15] могут приводить к выходу излучения за оболочку струи.

Поскольку 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, необходимость проведения исследований в этом направлении является обоснованной и актуальной.

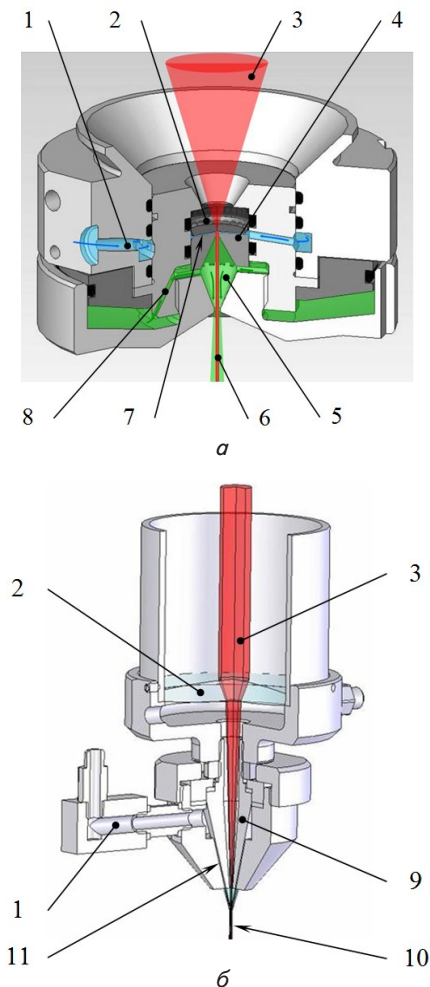


Рис. 1. Устройства для формирования струйно-лучевого потока: *а* – разработка фирмы Supova [9] (Швейцария), *б* – разработка сотрудников кафедры ПОМФТО КрНУ им. М. Остроградского [14]; 1 – канал для подвода хладагента в камеру; 2 – оптический элемент окна, предназначенного для ввода лазерного луча в струю хладагента; 3 – лазерный луч; 4 – насадок с соплом; 5 – камера для формирования струи хладагента путем введения под давлением нейтральных газов (*гелия*); 6 – струя хладагента с введенным в нее лучом лазера и «оболочкой» из нейтрального газа; 7 – камера с подводимым хладагентом; 8 – канал для подвода к формируемой струе нейтральных газов; 9 – коническая вставка; 10 – сформированный струйно-лучевой поток; 11 – кольцевой конический канал для подвода хладагента

### 3. Цель и задачи исследования

Цель исследований – повышение прочностных характеристик алюминиевого наполнителя сотовых панелей при перфорировании лазерно-струйным методом.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- математическое моделирование течения жидкости в сопловом насадке, определение вероятного распределения интенсивности излучения на обрабатываемой поверхности;

- оценка влияния геометрических погрешностей и формы среза сопла на картину распределения; возможность получения отверстий с формой, отличающейся от окружности;

- изучение и анализ дефектного слоя в тонколистовых заготовках, а также определение влияния режимов обработки на его формирование; испытание образцов на разрыв и определение прочностных характеристик материала.

## 4. Материалы и методы исследований лазерно-струйного способа получения профильных отверстий малых диаметров в наполнителях сотовых панелей и в самих панелях

### 4. 1. Методы исследований

Известно, что луч лазера, падая на поверхность в течение некоторого времени  $t$ , мс, создает локальный нагрев зоны облучения [16]:

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

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 выражением:

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

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 и с учетом [17] позволяет сделать вывод существовании корреляционной связи между профилем получаемого отверстия и профилем струи в сечении в плоскости его натекания на обрабатываемую поверхность как преграду. Кроме того, изменение условий совмещение осей струи и луча лазера приведет изменению условий отражения, и выражение

$$\left[\frac{z^2}{4at} - \frac{x^2}{4at'}\right]$$

в (2) не может быть корректно применено.

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

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

Поток жидкости не только изменяет эпюру распределения излучения по поверхности вследствие явления отражения луча от оболочки ламинарного потока, но и, натекая на поверхность обработки, вызывает ее охлаждение путем отвода теплоты от зоны действия

лазерного луча, в результате чего распространение термической деструкции за зону воздействия происходить не будет. Согласно результатам, полученным в [18], влияние потока жидкости учитывают краевые условия:

$$c_p \frac{dT}{dt} - \lambda \Delta T = \frac{(T - R_0)kP}{\pi AB} \exp \times \left[ -2 \left( \frac{(x - vt)^2}{a^2} + \left( \frac{y}{b} \right)^2 \right) \right] \times \exp(-kz), \quad (4)$$

$$\lambda \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=0} = \alpha(T)(T - T_p).$$

Таким образом, температурное поле при условии коаксиальности потока и излучения, для случая круглого сечения среза сопла и эллиптической формы пятна излучения, определится следующим образом:

$$T(x, y, z, t) = \frac{P}{\pi \frac{1}{2} \rho c} \int_0^1 \frac{e^{-\frac{(x-v(t-z))^2}{4\alpha\tau+A^2} - \frac{y^2}{4\alpha\tau+B^2}}}{\left[ (4\alpha\tau+A^2)(4\alpha\tau+B^2)\alpha\tau \right]^{1/2}} \times \left[ e^{-\frac{z^2}{4\alpha\tau} - h(\pi\alpha\tau)^{1/2} \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2(\alpha\tau)^{1/2}} + h(\alpha\tau)^{1/2} \right)} \times e^{hz+h^2\alpha\tau} \right] dt, \quad (5)$$

где  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$ ,  $h$  – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и температуропроводность материала заготовки, коэффициент теплоотдачи с поверхности заготовки соответственно;  $A$  и  $B$  – большая и малая полуоси эллиптического луча;  $P = \pi q AB$  – мощность лазерного излучателя.

Между импульсами излучения на ванну расплава действует только поток жидкости, с усилием  $P$ , определяемым

$$P_n = \mu f_c v \sqrt{2\rho p_b}, \quad (6)$$

где  $f_c$  – площадь струи;  $V$  – скорость потока.

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 термического воздействия. Сам поток также вызывает неравномерное охлаждение преграды, поскольку при контакте с последней он начинает растекаться.

В то же время на основании работ [19] становится очевидным, что изменение формы пятна нагрева, а также условий охлаждения непосредственно определяется течением жидкости в струе, при этом изменение скоростей или направлений течения может привести как к существенным потерям мощности, излучения, так и к изменению формы луча.

Для оценки влияния условий течения жидкости на эпюру распределения интенсивности излучения выполнено имитационное моделирование в среде FlowVision (рис. 2, а, б) позволившее установить картины скоростей и линий тока при изменении формы канала, а также рассчитать ожидаемую интенсивность излучения в пятне.

При моделировании течения жидкости в канале сопла принято во внимание, что струйный поток формируется соплом с изменяемой геометрией проточной части. Возможны следующие формы выходного отверстия (сопла): круглое, прямоугольное с закругленными углами, овальное. При этом диаметр отверстия сопла насадка составляла 2 мм; скорость потока жидкости на входе в насадок – 14 ... 50 м/с. При выполнении расчетов получен массив данных, состоящий из 5594 строк координат по осям  $X$  и  $Y$ , и значений скорости по оси  $X$ .

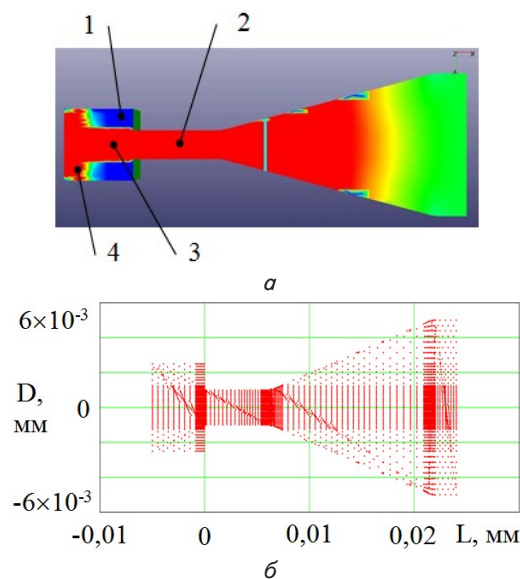


Рис. 2. Моделирование течения жидкости в сопле и за его пределами: а – средствами FlowVision; б – полученный массив точек, характеризующий скоростной режим потока; 1 – воздушная среда; 2 – участок насадки с профилированным отверстием на срезе; 3 – свободная струя жидкости; 4 – поток, растекающийся после контакта с поверхностью обработки

После интегрирования результатов расчета в программный модуль TracePRO70 была получена точечная визуализация массива данных, показывающая направление распространения луча лазера в конкретной струе (рис. 3) при ее натекании на преграду. Это дало возможность также определить гистограммы интенсивности излучения в плоскости натекания (рис. 4).

Результаты моделирования позволили сделать следующие важные выводы: существует определенное расстояние от среза сопла до поверхности обработки, где потери мощности являются минимальными, и, соответственно, производительность обработки будет наибольшей. В этом сечении изменение положения осей потока и луча наименее сказываются на изменении гистограммы. Кроме того, установлено, что за указанным критическим сечением происходит выравнивание интенсивности излучения по струе, несмотря на потерю мощности. Таким образом, из-



менением формы среза сопла (выходного отверстия) можно обеспечить изменение формы получаемых отверстий, улучшить их качество, что важно для выполнения перфорации в ответственных элементах летательных аппаратов.

Таким образом, при выполнении отверстий перфорации в листовых рулонных заготовках необходимо обеспечить:

- мощность импульса лазерного излучения, достаточную для прошивания отверстия при действии хладагента – струи жидкости, истекающей из соплового насадка;

- характеристики струйного потока (его диаметр, давление истечения, определяющее расход жидкости и, следовательно, интенсивность охлаждения) при котором сечение струи будет соответствовать профилю требуемого отверстия, а гидродинамическое давление, определяемое по (6), не будет вызывать деформации заготовки, расположенной на опорной поверхности;

- рациональное расстояние от среза сопла до поверхности обработки, при котором потери мощности излучения будут минимальны, а распределение интенсивности излучения по сечению – максимально выровненным, что позволит получать отверстия требуемой формы.

При этом второе условие, с одной стороны, обеспечивает возможность получения отверстия требуемой формы, а с другой – обуславливает формирование некой дефектной зоны (зоны оплавления), геометрические размеры которой сложнопрогнозируемы, однако непосредственно определяющие физико-механические свойства заготовки после перфорирования.

Для решения поставленных задач проведены исследования процесса ЛСП отверстий.

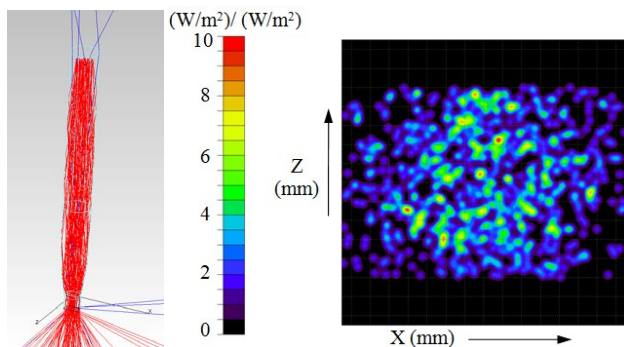


Рис. 3. Направление распространения луча в потоке воды до момента натекания на поверхность и получаемая картина интенсивности луча по сечению сопла (срез сопла – прямоугольник 1,5×2,0 мм)

#### 4. 2. Исследуемые материалы и оборудование, используемые в экспериментах

Экспериментальные исследования проводили в два этапа – с использованием лазера низкой мощности (для определения картин распределения на

поверхности и подтверждения теоретических положений); с использованием опытно-промышленного лазерно-струйного комплекса ЛСК-400-5 (рис. 4, а–д).

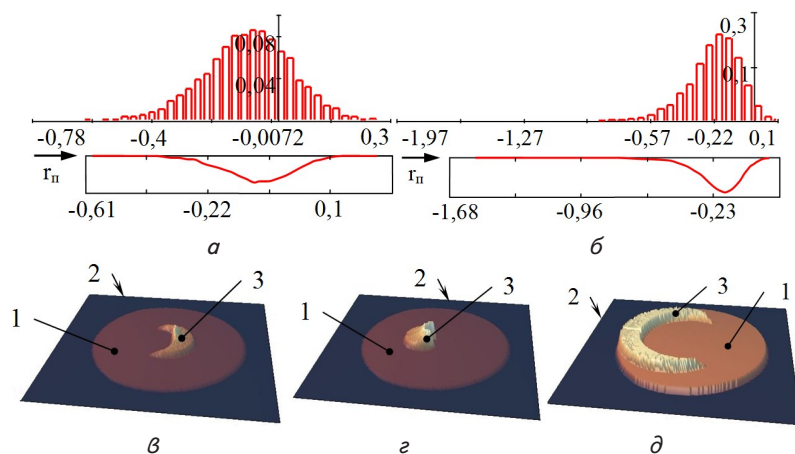


Рис. 4. Гистограммы и выровненные кривые интенсивности излучения в пятне на обрабатываемой поверхности (ось лазера относительно оси сопла смещена на величину 0,1D<sub>с</sub>). Визуализация моделирования интенсивности излучения на поверхности обрабатываемой детали с несоосностью луча и струи хладагента в 0,1 мм (отверстие сопла выполнено в форме правильного круга): а – при струйно-лазерном воздействии; б – при лазерном воздействии без потока жидкости; в – расстояние от среза сопла до преграды 5 мм; г – 10 мм; д – 16 мм; 1 – отражение луча лазера, проходящий сквозь струю без излома; 2 – отражение луча от конусного участка насадка и границы «вода-воздух»; 3 – поверхность обрабатываемой детали

При измерении светового потока в струе жидкости с использованием сопел разного поперечного сечения использовали аналогово-цифровой преобразователь m-DAQ [20], фоторезисторный мостик, построенный на ФСД-1, эспанзомат AQUAPRESS AFC24SBA, источник лазерного излучения BGP-3010 (532 nm, 100 mW), детурбулизатор. Имитационная установка (рис. 5) реализована по принципу подобия, что позволило проводить снятие картин распределение излучения при истечении жидкости из сопел с большим диаметром на срезе (около 2 мм). Величина светового излучения фиксировалась с помощью фоторезистора ФСД-1, а картина распределение излучения – матрицей фотоаппарата Canon PowerShot A110.

Данные снимались в автоматическом режиме АЦП m-DAQ, схема включения которого представлена на рис. 6. Для повышения точности измерений в системе подачи жидкости был установлен эспанзомат AQUAPRESS AFC24SBA, уменьшение турбулентности потока достигалось использованием детурбулизаторов.

Непосредственно перфорирование заготовок осуществлялось на лазерно-струйном комплексе ЛСК-400-5 (рис. 7), а механические свойства перфорированной фольги исследовались на универсальной испытательной машине УМЭ–10, с использованием тензодатчиков KELI DEG 50кг [21], АЦП m-DAQ. Исследование формы отверстий и дефектной зоны осуществлялось на электронном растровом микроскопе РЭМ-106И. Для перфорирования использовали алюминий-магниевую фольгу АМг-2Н толщиной 55 мкм.

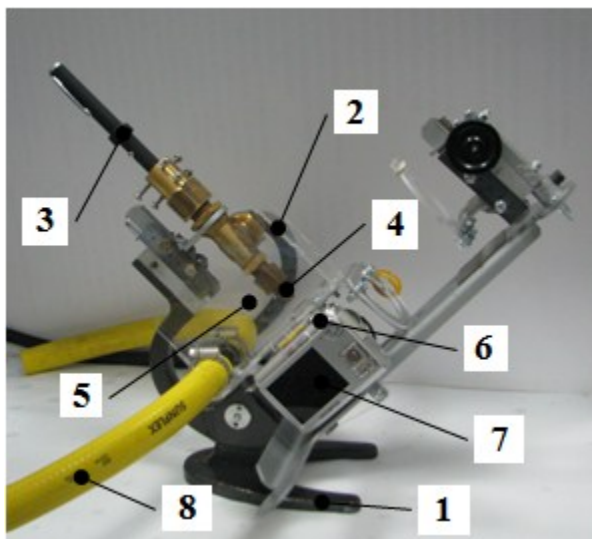


Рис. 5. Экспериментальная установка: 1 – основание; 2 – трубка подвода жидкости; 3 – источник лазерного излучения; 4 – насадок; 5 – рабочая ванна; 6 – фоторезистор; 7 – фотоаппарат; 8 – сливной шланг

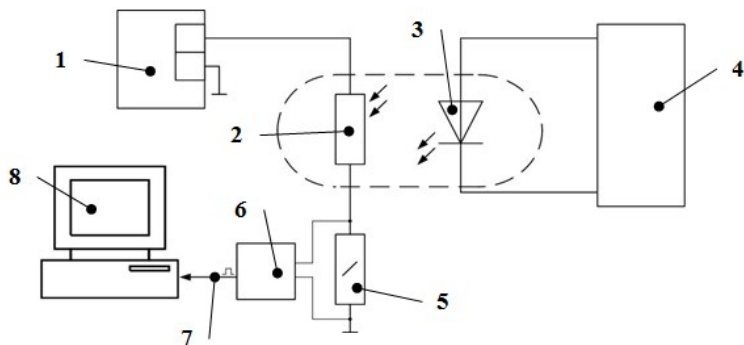


Рис. 6. Принципиальная схема измерительной системы на основе АЦП: 1 – блок питания 220 АС/15 DC; 2 – ФСД-1; 3 – источник лазерного излучения BGP-3010; 4 – блок питания; 5 – резистор 10 кОм; 6 – АЦП m-DAQ; 7 – USB соединение; 8 – ЭВМ

Контроль режимов истечения жидкости осуществляли с помощью манометра образцового (5–500 МПа), вакуумметра (0,5–10 мм в. с.), датчик давления LNA-300, датчик разрежения LNR-25.

**4. 3. Режимы обработки и снятия прочностных характеристик с образцов**

Обработку листовой заготовки из фольги АМг-2Н толщиной 55 мкм подвергли перфорированию с такими режимами: мощность лазера – 200 Вт, частота следования импульсов – 50 и 75 Гц, скорость сканирующей подачи – 15,0–30,0 м/мин, шаг отверстий перфорации – 5,0–10,0 мм, установленный диаметр отверстий – 0,1 мм, 0,35 мм и 0,7 мм (в соответствии с используемыми сопловыми насадками). Проверка возможности формирования профильного отверстия выполнялась на заготовке из нержавеющей стали марки 12Х17 толщиной 1,2 мм. Время прошивания – 0,5 с.

Жидкость – вода деаэрирования, деионизированная, подавалась в рабочую зону с расходом 0,003 дм<sup>3</sup>/с – 0,05 дм<sup>3</sup>/с. Диаметр сопла соответствовали диаметру получаемого отверстия.

Для механических испытаний из обработанной заготовки вырезали образцы размерами 30×35 мм (рис. 8), которые вклеивались в державки согласно методике испытаний. При этом проводили испытания образцов, полученных различными методами: механическим прокалыванием индентором, лазерной прошивкой, с продувкой рабочей зоны и без продувки, а также с охлаждением потоком жидкости.

Все заготовки, выбранные для испытаний, перфорировались с одинаковым шагом  $t = 5,0$  мм, линия перфорации располагалась перпендикулярно к направлению приложения растягивающего усилия разрывной машины. Нагружение образца производили с подачей 100 мм/мин, деформацию и, соответственно, возникающие напряжения оценивали по временному ряду, полученному с m-DAQ.



Рис. 7. Общий вид комплекса ЛСК-400-5

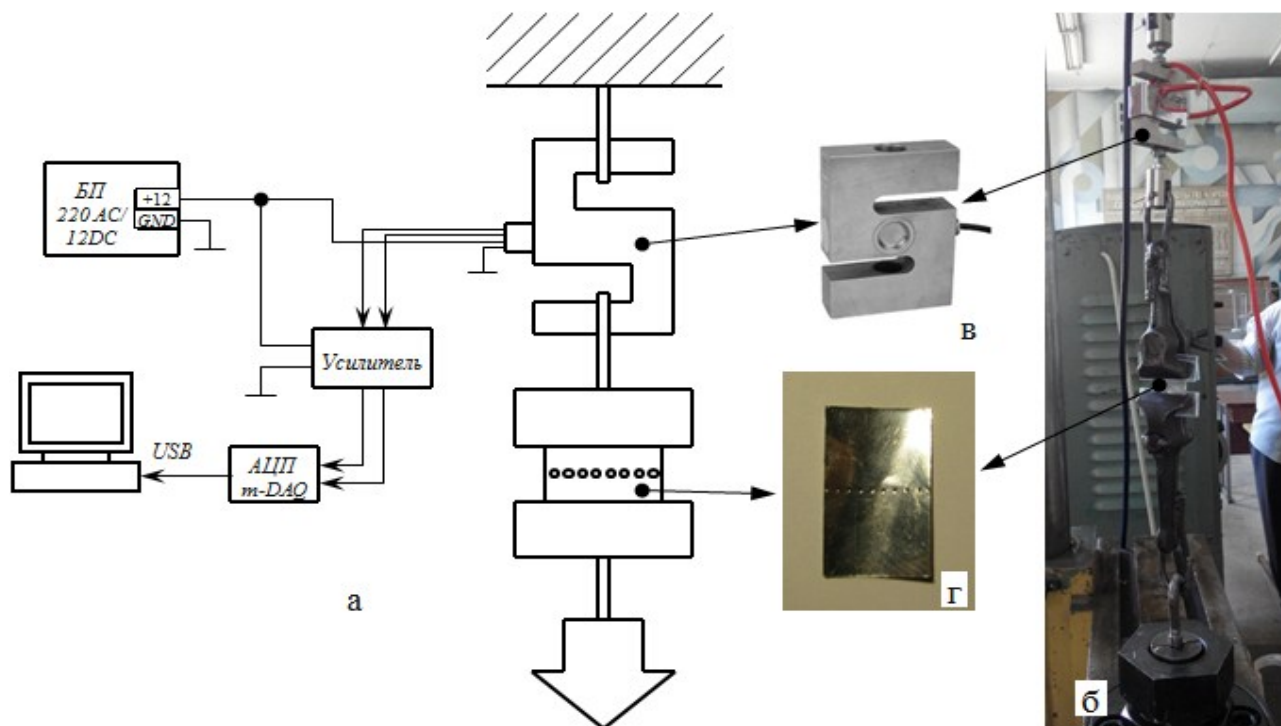


Рис. 8. Испытание перфорированных образцов из алюминий-магниевого фольги: а – принципиальная схема стенда для определения механических характеристик образцов; б – заготовка на разрывной машине; в – тензодатчик KELI DEG 50 кг; г – образец фольги АМг толщиной 55 мкм

### 5. Результаты исследований перфорированных образцов

Микроэлектронное исследование точности получения формы отверстия, величины зон термодеструкции и наличия концентраторов напряжений показало следующее. Наиболее точно выполнены отверстия именно лазерно-струйным методом (табл. 1): при заданном диаметре 0,070 мм реально полученный размер колебался в пределах 0,067–0,071 мм, что является достаточно точным и воспроизводимым результатом. По другим способам получения отверстий видно, что отверстия получаются с большим разбросом значений в пределах 0,63–0,75 мм. Наиболее неточными можно считать отверстия, полученные механическим прокалыванием, – усредненный диаметр изменяется в пределах от 0,64 мм до 0,97 мм.

Также установлено, что полученные механическим способом (МС) отверстия имеют значительные разрывы, нередко превышающие диаметр самого отверстия, а кромки деформированы. Таким образом, при механическом прокалывании отверстий ширина деструктивной зоны может достигать 0,45–0,55 мм.

Отверстия, получаемые лазером с продувкой зоны обработки (ЛП), имеют различную конфигурацию, и характеризуются наличием оплавленной зоны шириной до 0,25 мм. Зона оплавления имеет четко различаемые микротрещины в радиальном направлении. Использование воды для охлаждения зоны прошивки (при реализации лазерной перфорации с продувкой и охлаждением (ЛПВ)) существенно не уменьшает диаметр полученного отверстия, а в некоторых случаях способствует его увеличению, одновременно искажая форму отверстия. Получаемые отверстия имеют раз-

ные полуоси – при номинальном диаметре 0,7 мм разница может составлять до 0,32 мм. Оплавление торца минимальное, не более 0,085 мм, однако с незначительным оплавлением торца. Прошивка лазерным импульсом (Л) также характеризуется низким качеством, малым диаметром и значительной зоной оплавления.

Таким образом, проведенные исследования показали, что наиболее точно и с минимальным отклонением от заданной формы удается воспроизвести лазерно-струйным методом, который также позволяет исключить значительный оплавленный слой на торце и микротрещины, присутствующие в слое при реализации других методов обработки.

Результаты механических испытаний исследуемых образцов представлены на рис. 9 и сведены в табл. 2. Статическому нагружению подверглись образцы с перфорацией, выполненной указанными выше методами. При этом нагрузка образцов производилась по рекомендациям [22].

Анализ результатов зависимости времени до разрушения образца от прилагаемой нагрузки по перфорационной линии показал следующее (табл. 2). Образец из алюминий-магниевого фольги, обработанный ЛСП, выдерживает нагрузки на растяжение, большие на 12 % по сравнению с образцами, полученными МС и на 20–35 % – другими способами (ЛП, ЛПВ, Л).

Установлено, что продолжительность сопротивления образца, полученного ЛСП, действующей нагрузке (с момента начала роста напряжений до момента разрушения) значительно превышает аналогичные характеристики других образцов (для отдельных образцов – на треть), что свидетельствует о практически неизменной текучести образца до и после перфорирования.



Таблица 1

Сравнение точности и качества отверстий, получаемых различными методами

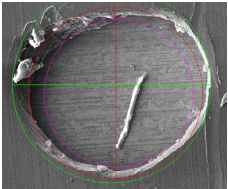
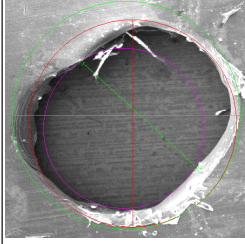
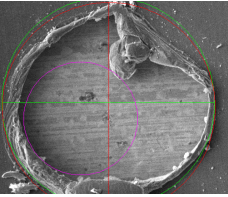
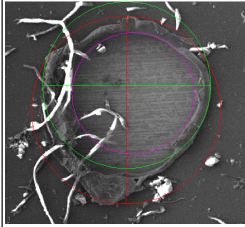
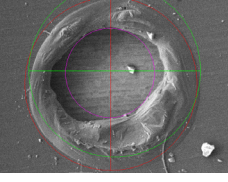
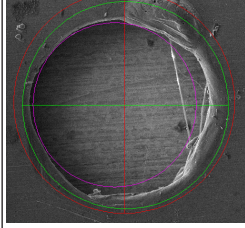
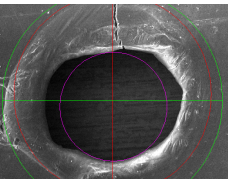
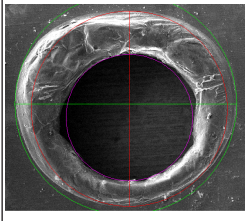
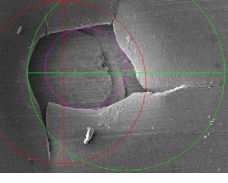
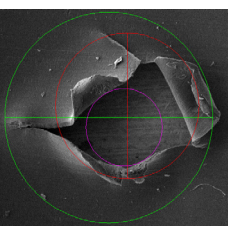
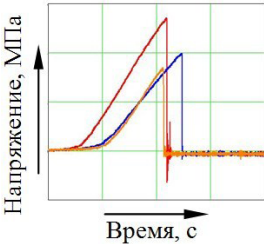
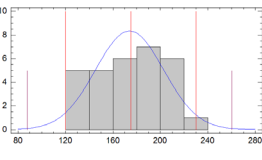
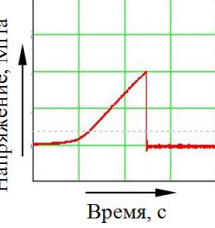
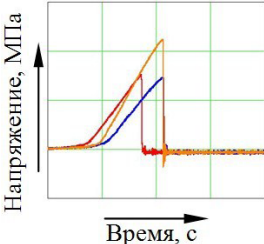
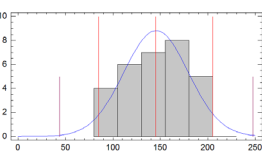
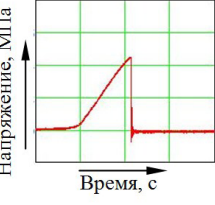
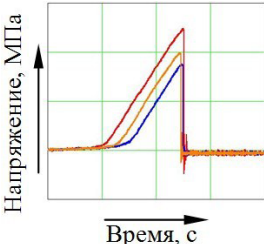
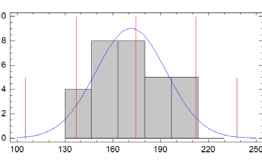
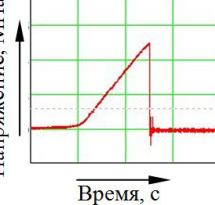
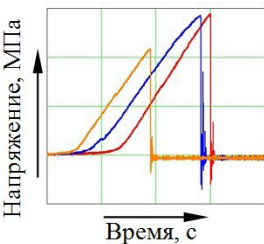
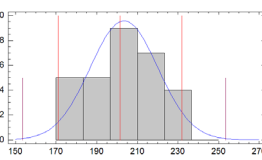
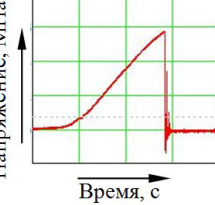
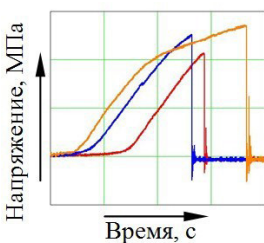
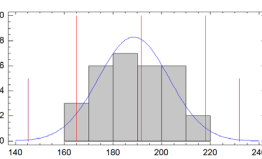
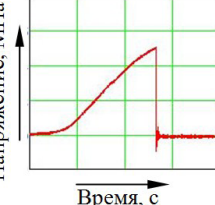
Метод	Микрофотографии	Геометрическая характеристика		Метод	Микрофотографии	Геометрическая характеристика	
		$dy_{max}, dx_{max}, d_{min}$ , мм	$d_c, \sigma_d$			$dy_{max}, dx_{max}, d_{min}$ , мм	$d_c, \sigma_d$
ЛП	Лицевая сторона 	$dy_{max}=0,6649$ $dx_{max}=0,7606$ $d_{min}=0,5718$	$d_c=0,6662$ $\sigma_d=0,0945$	ЛПВ	Лицевая сторона 	$dy_{max}=0,8535$ $dx_{max}=0,9382$ $d_{min}=0,6597$	$d_c=0,799$ $\sigma_d=0,1392$
	Тыльная сторона 	$dy_{max}=0,7548$ $dx_{max}=0,7541$ $d_{min}=0,4035$	$d_c=0,5792$ $\sigma_d=0,1758$		Тыльная сторона 	$dy_{max}=0,984$ $dx_{max}=0,8751$ $d_{min}=0,6373$	$d_c=0,8107$ $\sigma_d=0,1734$
Л	Лицевая сторона 	$dy_{max}=0,716$ $dx_{max}=0,7135$ $d_{min}=0,3699$	$d_c=0,543$ $\sigma_d=0,1731$	ЛСП	Лицевая сторона 	$dy_{max}=0,81$ $dx_{max}=0,7552$ $d_{min}=0,5985$	$d_c=0,7043$ $\sigma_d=0,1059$
	Тыльная сторона 	$dy_{max}=0,6356$ $dx_{max}=0,7101$ $d_{min}=0,3452$	$d_c=0,5277$ $\sigma_d=0,1824$		Тыльная сторона 	$dy_{max}=0,7638$ $dx_{max}=0,8638$ $d_{min}=0,4937$	$d_c=0,6788$ $\sigma_d=0,1851$
МС	Лицевая сторона 	$dy_{max}=0,6437$ $dx_{max}=0,7709$ $d_{min}=0,3167$	$d_c=0,5438$ $\sigma_d=0,2271$	Примечание: $SS = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$ – сумма квадратов отклонений всего количества $N$ наблюдений от их общего среднего значения; $SS_A = \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений средних значений по строкам от общего среднего значения; $SS_E = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$ – сумма квадратов отклонений результатов опытов от среднего значения соответствующего наблюдения, или окончательная сумма квадратов; степени свободы составляют $f = N - 1 = \sum_{i=1}^p n_i - 1$ для $SS$ , $f_a = p - 1$ для $SS_A$ и $f_c = N - p = \sum_{i=1}^p n_i - p$ для $SS_E$			
	Тыльная сторона 	$dy_{max}=0,9287$ $dx_{max}=0,6413$ $d_{min}=0,3409$	$d_c=0,6348$ $\sigma_d=0,294$				



Таблица 2

Сравнение механических характеристик образцов с перфорацией, полученной различными методами

Метод	Критические напряжения возникающие в образце до его разрушения $\bar{\sigma}$ , МПа	Разброс напряжений до разрушения $\sigma_b$ , МПа	Статистическая обработка результатов определения прочности образца $\sigma_{cp}$	Усредненная кривая разрушения	Примечания
ЛП	158,5	 <p>Напряжение, МПа</p> <p>Время, с</p> <p><math>\sigma_{min}=128; \sigma_{max}=216</math></p>		 <p>Напряжение, МПа</p> <p>Время, с</p>	$\alpha=0,05, k=l-3=$ $=4[\chi^2]=12,6 < \chi_{cp}^2=$ $=38,0$ расхождения между распределениями статистически достоверны
Л	178,7	 <p>Напряжение, МПа</p> <p>Время, с</p> <p><math>\sigma_{min}=86; \sigma_{max}=205</math></p>		 <p>Напряжение, МПа</p> <p>Время, с</p>	$[\chi^2]=12,6 < \chi_{cp}^2=82,5$ расхождения между распределениями статистически достоверны
ЛПВ	198,2	 <p>Напряжение, МПа</p> <p>Время, с</p> <p><math>\sigma_{min}=138; \sigma_{max}=211</math></p>		 <p>Напряжение, МПа</p> <p>Время, с</p>	$[\chi^2]=12,6 < \chi_{cp}^2=25,7$ расхождения между распределениями статистически достоверны
ЛСП	228,5 Полученное напряжение наиболее близко к пределу прочности материала ( $[\sigma]=265$ МПа)	 <p>Напряжение, МПа</p> <p>Время, с</p> <p><math>\sigma_{min}=173; \sigma_{max}=231</math></p>		 <p>Напряжение, МПа</p> <p>Время, с</p>	$[\chi^2]=12,6 < \chi_{cp}^2=28,6$ расхождения между распределениями статистически достоверны
МС	201,3	 <p>Напряжение, МПа</p> <p>Время, с</p> <p><math>\sigma_{min}=166; \sigma_{max}=217</math></p>		 <p>Напряжение, МПа</p> <p>Время, с</p>	$[\chi^2]=12,6 < \chi_{cp}^2=19,2$ расхождения между распределениями статистически достоверны

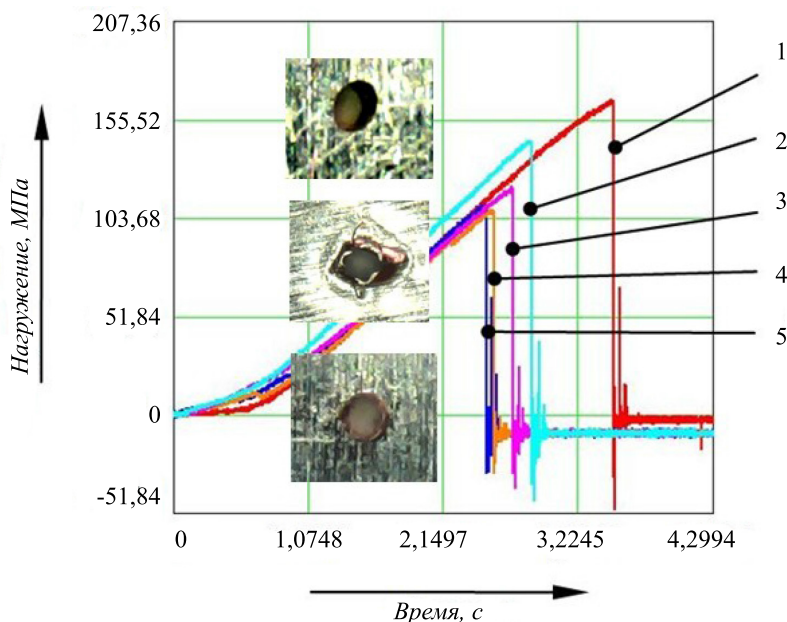


Рис. 9. Результаты экспериментов по разрыву образцов из фольги АМг толщиной 55 мкм по предварительно нанесенной перфорации при статическом нагружении. Методы выполнения перфорации: 1 – лазерно-струйный; 2 – механическим прокалыванием; 3 – лазером через слой воды; 4 – лазером с продувкой; 5 – лазером без продувки

Полученные результаты обладали статистической значимостью, контролируемые параметры подчинялись кривой Гаусса (проверка осуществлялась с помощью  $\chi^2$ -критерия Пирсона). Это дало возможность установить усредненное критическое напряжение, при котором происходило разрушение образцов, а также определить относительное удлинение образца до разрушения.

Так, относительное удлинение перфорированного образца составило 14 %, а предел прочности при этом снизился менее чем 36,5 МПа и составил 228,5 МПа.

Представляют особый интерес также и результаты профилирования струи с целью получения отверстий соответствующей формы (табл. 3).

Применение более толстой заготовки позволило рассмотреть процесс формирования отверстия во времени. Установлено, что образование отверстия происходит этапно и носит квазициклический характер, что обуславливается периодическими явлениями нагрева и гидродинамического охлаждения поверхности. Циклическость характеризуется несколькими основными гармониками и опре-

деляется как условиями истечения жидкости из насадки, так и частотой подачи импульсов лазерного излучателя; частота практически не зависит от свойств обрабатываемого материала.

При этом в поверхностном слое заготовки возникают явления, связанные с изменением структуры слоя и его химического состава, поскольку в момент подачи импульса излучения на поверхности возникает полость жидкости с насыщенным паром, размеры которой циклически меняются при изменении режимов энергетического воздействия.

В то же время струйно-лучевое влияние удовлетворительно формирует профилированное отверстие, форма которого относительно полно соответствует профилю сопла, а также предупреждает распространение теплового воздействия за пределы действия луча. При этом, чем больше режим движения жидкости соответствует ламинарному, тем лучше качество получаемого отверстия, меньше дефекты поверхностных слоев и меньше отклонения от ожидаемой формы.

Таблица 3

Сравнение картин распределения излучения по сечению и полученных отверстий на опытных образцах

№	Тип профиля, размеры пятна	Микрофотография	Отверстие, полученное на ЛСК-400-5
1	Окружность, $D_0=2,25$ мм $D_n=2,55...2,67$ мм		
2	Квадрат, L×B 2,5×2,5 мм $D_n=2,65×2,71$ мм		
3	Эллипс, A×B 2,5×3,5 мм $D_n=2,6×3,4$ мм		

## 6. Обсуждение результатов исследований перфорированных образцов

В результате проведенных исследований обоснована целесообразность применения ЛСП и обоснована эффективность применения запатентованной системы [8] формирования струйно-лучевого потока. Проведение исследований с использованием стенда для оценки распределения интенсивности излучения по сечению струи позволило установить возможность получения профильных отверстий малого диаметра (до 2,0 мм) за счет изменения формы струи, что весьма важно при выполнении перфорации наполнителя в малоразмерных сотовых системах. Полученные результаты были положены в основу создания специальных струйных насадок для выполнения операций на действующем оборудовании лазером с длиной волны 1062 нм. Кроме того, проведенные исследования позволили сравнить температурные поля, формируемые различными способами воздействия на обрабатываемую заготовку (Л, ЛП, ЛСП, ЛПВ).

Использование средств растровой электронной микроскопии дало возможность провести детальное изучение микрогеометрических параметров получаемых отверстий и связать показатели качества отверстий (в том числе, и зону оплавления торца) с режимами обработки.

Применение аналогово-цифровых преобразователей типа m-DAQ позволило в режиме реального времени произвести испытания образцов с полученной перфорацией и определить показатели прочности и относительного удлинения с минимальной погрешностью.

Следовательно, можно считать, что представленный комплекс экспериментального оборудования позволил максимально точно и с минимальными затратами времени доказать теоретические положения о целесообразности применения ЛСП в производстве и определить пути дальнейшего совершенствования процесса.

Дальнейшие усилия должны быть направлены на определение рациональных параметров зоны обработки, установление приемов эффективного перфорирования заготовки из рулона.

Результаты исследований могут быть положены в основу расчетов режимов выполнения обработки и создания средств автоматизированного сканирующего способа перфорирования алюминиевого сотового

заполнителя из рулонного материала, широко применяемого при производстве сотовых сэндвич-панелей. Использование оригинальной запатентованной системы для формирования струйно-лучевого потока повышает стабильность и надежность обработки: получаемые отверстия имеют меньший разброс геометрических параметров, а прочность готового наполнителя выше, чем прочность аналогичных образцов, перфорированных другими методами.

## 7. Выводы

1. В результате математического моделирования течения жидкости в сопловом насадке FlowVision а также анализа отражения луча от внутренней поверхности струи программными средствами TracePRO70 и визуализации точек теплового воздействия в струйном потоке получены картины распределения интенсивности излучения и температурные поля на обрабатываемой поверхности, что позволило сделать вывод о возможности получения профильных отверстий (диаметром до 2,0 мм) за счет изменения сечения потока жидкости.

2. Показано, что существует определенное расстояние от среза сопла до поверхности обработки, где потери мощности являются минимальными, и, соответственно, производительность обработки будет наибольшей. В этом сечении изменение положения осей потока и луча наименее сказываются на изменении гистограммы. Кроме того, установлено, что за указанным критическим сечением происходит выравнивание интенсивности излучения по струе, несмотря на потерю мощности.

3. Проведено микроэлектронное исследование формы и дефектов получаемых отверстий, выполнено механическое испытание образцов и показано, что образцы с перфорацией, полученными ЛСП, имеют максимальную прочность на разрыв, несколько меньшую по сравнению с прочностью исходного материала (265 МПа). По сравнению с традиционно используемым в промышленности МС прочность выше на 14 % и обуславливается локализованной дефектной зоной и отсутствием иных концентраторов напряжений. Другие лазерные методы, в частности, Л, ЛПВ, ЛП показали более низкую прочность образцов (на 20–35 %), что объясняется более широкой зоной повреждения, являющейся следствием явлений в пограничном слое при формировании отверстий в тонколистовой заготовке.

## Литература

1. Сливинский, В. И. Эффективность применения сотовых конструкций в летательных аппаратах [Текст] / В. И. Сливинский, Г. В. Ткаченко, М. В. Сливинский // Вестник СибГАУ. – 2005. – № 3. – С. 169–173.
2. Колганов, И. М. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Часть 1 [Текст]: учеб. пос. / И. М. Колганов, П. В. Дубровский, А. Н. Архипов. – УлГТУ – Ульяновск: Университет, 2003. – 148 с.
3. Воронько, В. В. Экспериментальное исследование точности отверстий, перфорированных в листовых деталях авиационных двигателей способом электрогидравлической штамповки [Текст] / В. В. Воронько, Я. С. Жовноватюк // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2015. – № 3. – С. 56–64.
4. Гиндин, П. Д. Лазерные наноматериалы и технологии: Монография [Текст] / П. Д. Гиндин, А. Б. Бельский, С. В. Ковалев, А. М. Савченко, В. П. Соболев. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 221 с.
5. Hartmann, C. High Density Perforation of Thin Al-Foils with Ultra Short Pulse Lasers [Text] / C. Hartmann, N. Hambach, M. Jüngst, S. Keller, J. Holtkamp, A. Gillner // Journal of Laser Micro/Nanoengineering. – 2013. – Vol. 8, Issue 3. – P. 266–270. doi: 10.2961/jlmn.2013.03.0013



6. Naeem, M. Laser Percussion Drilling of Coated and Uncoated Aerospace Materials with a High Beam Quality and High Peak Power Lamp Pumped Pulsed Nd:YAG Laser [Text] / M. Naeem, M. Wakeham // 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics, 2010.
7. Walthe, K. Manufacturing of shaped holes in multi-layer plates by Laser-drilling [Text] / K. Walther, M. Brajdic, J. Dietrich, M. Hermans, M. Witty, A. Horn, I. Kelbassa, R. Poprawe. – PICALO, 2008. – P. 789–794.
8. Yilbas, B. S. Laser Drilling: Practical applications [Text] / B. S. Yilbas // Springer, 2013. – 90 p. doi: 10.1007/978-3-642-34982-9
9. Synova, S. A. Natural diamond cutting using water jet-guided laser [Electronic resource] / S. A. Synova. – Available at: [http://www.synova.ch/fileadmin/user\\_upload/conferences/2011\\_LIM2011\\_Synova\\_final.pdf](http://www.synova.ch/fileadmin/user_upload/conferences/2011_LIM2011_Synova_final.pdf). – 12.05.2013. – Title from the screen.
10. Perrottet, D. Particle-free semiconductor dicing using the water jet guided laser technology [Text] / D. Perrottet, A. Spiege, F. Wagner, R. Housh, B. Richerzhagen, J. Manley // Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics 2004. – Synova SA: Switzerland, 2004.
11. Pauchard, A. Recent developments in the cutting of ultra hard materials using water jet-guided laser technology [Text] / A. Pauchard, M. Di Marco, B. Carron, G. Suruceanu, B. Richerzhagen, A. Brule, N. Kling // ALAC 2008 conference proceeding, 2008.
12. Brule, A. Laser MicroJet® for High Precision Drilling of Mechanical Devices such as Fuel Injection Nozzles [Text] / A. Brule, J. Deschamps, M. Di Marco, B. Richerzhagen, H. Levine // Proceedings of LPM2008-the 9th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2008.
13. Mullick, S. Development of a water-jet assisted underwater laser cutting process [Text] / S. Mullick, Y. K. Madhukar, S. Roy, A. K. Nath // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. – 2013. – Vol. 7, Issue 4. – P. 365–371.
14. Пристрій для виконання струминно-променевої обробки матеріалів. Пат. 63732 У Україна, МПК В24В 41/00 [Текст] / Саленко О. Ф., Дудюк В. О., Холодний В. Ю. – заявник і патентоприймач Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – у 201015758; заявл. 27.10.2010 ; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20. – 2011. – 9 с.
15. Richerzhagen, B. Complete Model to Simulate the Thermal Defocusing of a Laser Beam Focused in Water [Text] / B. Richerzhagen, G. Delacrétaz, R. P. Salathé // Optical Engineering. – 1996. – Vol. 35, Issue 7. – P. 2058–2066. doi: 10.1117/1.600995
16. Salenko, O. Jets methods of cutting carbide and super hard material [Text] / O. Salenko, V. Schetinin, L. Fomovska. – Germani, Lambert Academic Publisher, 2013. – 118 p.
17. Salenko, A. Changing the spot of local destruction of samples at water jet guided laser processing with appropriate profiling jet [Текст] / A. Salenko, V. Kholodnyi // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2015. – № 1 (73). – С. 57–64.
18. Schulz, W. Simulation of laser cutting [Text] / W. Schulz, M. Niessen, U. Eppelt, K. Kowalick // Springer Series in Materials Science. – 2009. – Vol. 119. – P. 21–69. doi: 10.1007/978-1-4020-9340-1\_2
19. Саленко, А. Особенности методики исследования профильных отверстий малого размера для процесса лазерно-струйной обработки материалов [Текст] / А. Саленко, В. Холодный // Unitex – 2013: International scientific conference 22-23 november 2013. – Gabrovo, 2013. – P. III-139–III-145.
20. Микросистема сбора данных m-DAQ [Электронный ресурс]. – ООО “ХОЛИТ Дэйта Системс”. – Режим доступа: <http://www.holit.ua/ru/products/comp/ind/expansion/adc/vneshnie/2842.html/> – 01.04.2013. – Загл. с экрана.
21. Тензодатчик KELI DEG 50кг [Электронный ресурс]. – ООО “ДКЛ”. – Режим доступа: <http://dkl.kiev.ua/product/tenzodatchik-keli-deg-50kg/> – 17.09.2015. – Загл. с экрана.
22. Jahubar, A. Orientation Effects of Stress Concentrators on the Material Deformation Behaviour during Tensile Testing of Thin AISI 316 Stainless Steel Strips [Text] / A. Jahubar, S. K. Pandey, K. S. Pandey // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). – 2014. – Vol. 4, Issue 10. – P. 43–48.