

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СТРУМЕНЕВО-ЛАЗЕРНОГО ПЕРФОРУВАННЯ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК ПРОФІЛЬНИМ ПОТОКОМ

INCREASE OF EFFICIENCY PROCESS OF WATER JET GUIDED LASER PERFORATION SHEET WORKPIECES BY PROFILED STREAM

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-струминного 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-струминна обробка, отвір, високоенергетичний потік.

Вступ

Стільникові композиційні та сандвіч-панелі наразі широко використовуються в авіаційній, ракетній техніці та в енергетичному машинобудуванні. Такі панелі водночас із виконанням головної функції — основи для монтажу інших силових елементів та пристроїв, досить часто застосовують у якості шумопоглинальних засобів. Кожухи, що складаються з декількох шарів, сполучених між собою за допомогою перфорованого стільникового наповнювача, мають відмінні шумопоглинальні властивості; задовільну міцність, вогнетривкість. Як правило, стільникові панелі виготовляються із карбон-полімерних (типу С-41) або карбон-карбонових композицій, склопластику типу СВМ, Аг-4С; для авіаційної та космічної техніки використовуються титанові та алюмінієві сплави. При цьому перфорування може здійснюватися як в панелях (для забезпечення звукоізолюючого ефекту), так і в наповнювачі (для передування розриву комірок стільників при виникненні перепаду тиску) [1].

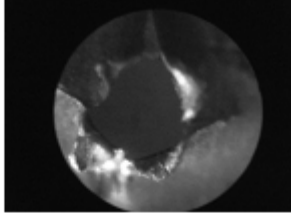
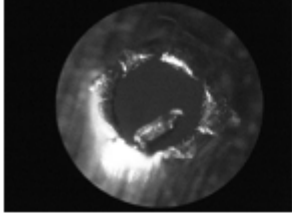
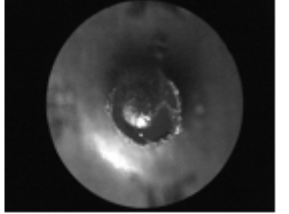
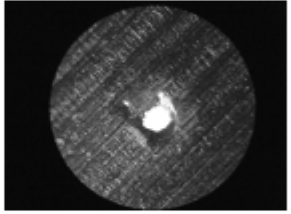
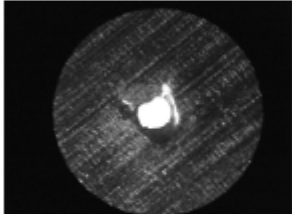
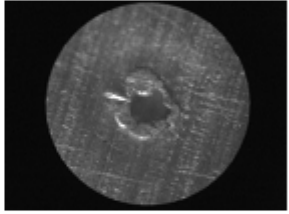
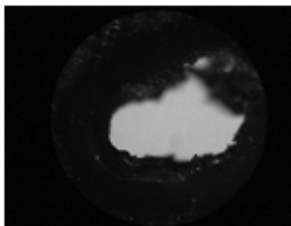
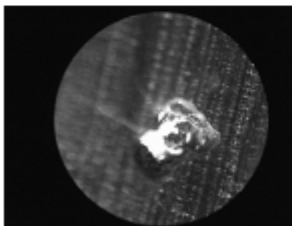
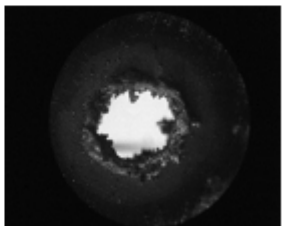
Операції перфорування є складними і нетехнологічними, оскільки передбачають отримання великої кількості дрібних отворів, з точним взаємним розташуванням; відсутність деструкції та розшарування матеріалу у місці отвору, а також будь-яких концентраторів напружень, що можуть виникати в момент отримання отвору.

З урахуванням результатів, отриманих у [2] та [3], можна стверджувати що для тонких стільникових наповнювачів лазерне перфорування є досить продуктивним та ефективним за умови, що отвір не перевищує 0,05-0,12

мм (таблиця 1); отвори більшого діаметру (0,15-0,25 мм) традиційно виконують механічним способом за допомогою встановлених у гребінку інденторів. При цьому механічне перфорування фольги малої товщини жорсткими інденторами веде до виникнення пошкодження заготовки і утворення різного роду концентраторів напружень. Електроіскрове прошивання має інші недоліки — нестабільність форми отвору, а у деяких випадках і повна відсутність отвору в цілому, що при наступному укладенні наповнювача у гофрований набір може призвести до виникнення герметизації комірки стільника і її наступного руйнування.

Виконання отворів діаметром 0,9-1,2 мм методом копіювання в неметалевих панелях доцільно здійснювати за допомогою спеціальних гідроабразивних головок. Однак для обробки металевих листів такий спосіб мало прийнятний. У будь-якому випадку отвори перфорації отримують методом копіювання інструмента — механічного індентора, гідроабразивного потоку, перетяжки каустики лазера, свердла тощо. Саме тому для панелей стільника з поздовжньо встановленим наповнювачем отримання отворів 0,3-0,5 мм залишається проблемним до теперішнього часу. Оскільки зазначені розміри отворів більші за діаметр сфокусованого лазерного випромінювання, розглядається можливість отримання отворів певної конфігурації у листових заготовках наповнювачів стільникових систем та сандвіч-панелей, використовуваних в якості несучих елементів або шумопоглинальних кожухів, засобами струминно-лазерного впливу.

Таблиця 1 — Порівняння геометрії та зовнішнього виду отворів, отриманих різними методами на зразку фольги типу товщиною 55 мкм

	Вибірка зразків тип 1 (повний отвір)	Вибірка зразків тип 2 (отвір із неவிпученою стружкою)	Вибірка зразків тип 3 (відсутній отвір)
Механічне прошивання (механіч. індентор, уср. діам 0,32 мм)	 <p>$D_{\min}=0,26$ мм, $D_{\max}=0,41$ мм, Особливість – наявність гострик крайок, концентраторів напружень</p>	 <p>$D_{\min}=0,28$ мм, $D_{\max}=0,38$ мм, Особливість – наявність гострик крайок, концентраторів напружень, а також фрагментів фольги в отворі</p>	 <p>$D_{\min}=0,25$ мм, $D_{\max}=0,34$ мм, Особливість – поломка індентора призвела до відсутності повного формоутворення отвору, отвір дефектний</p>
Лазерне прошивання (частота 150 Гц, діам плями у фокусі 0,12 мм, орієнт. перетяжка каустики – 0,08 мм)	 <p>$D_{\min}=0,11$ мм, $D_{\max}=0,13$ мм, Криволінійне</p>	 <p>$D_{\min}=0,12$ мм, $D_{\max}=0,14$ мм, Криволінійне, з каврною</p>	 <p>$D_{\min}=0,1$ мм, $D_{\max}=0,11$ мм, Каверна без наскрізного отвору</p>
Електроіскрове прошивання (голка з радіусом 0,04 мм, матеріал – графіт, струм $I=50$ А, $U=36$ В)	 <p>$D_{\min}=0,12$ мм, $D_{\max}=0,45$ мм, Оплавлення, порушення форми, існування відхилення від круглості</p>		 <p>$D_{\min}=0,12$ мм, $D_{\max}=0,45$ мм, Оплавлення, форма більш правильна, потребує застосування вольфрамових електродів та оптимізації міжелектродного проміжку</p>

Сполучення променя лазера (потужністю біля 500 Вт із довжиною хвилі випромінювання 530-1062 нм) зі струменем рідини малого діаметру дозволяє отримати новий термо-гідродинамічний засіб оброблення матеріалів, що володіє досить широкими технологічними властивостями [5]. Нині автори робіт [5, 6] заявляють, що існує принаймні понад 10 доцільних способів використання цього нового інструменту — від різання мікроелектронних чипів до виконання операцій полірування невеликих криволінійних поверхонь. Лазерно-струминна обробка базується на принципі сполучення високоенергетичних впливів, що дозволяє досить просто змінювати стан матеріалу в зоні впливу протягом нетривалого часу. Відповідно до [6], такі впливи можуть бути поділені на формозмінюючі та інтенсифікуючі.

При цьому технології лазерно-струминного прошивання мають наступні переваги:

1) забезпечують локальне кероване термо-гідродинамічне навантаження, яке призводить не тільки до формозміни ділянки навантаження внаслідок різних механізмів пошкодження, а і викликає певні зміни структури поверхневого шару, його модифікацію;

2) мають можливість мінімізації зони впливу, її локалізації у малих обсягах, порівняних із розмірами струминного потоку;

3) під дією високоенергетичного потоку активізуються чинники руйнування оброблюваного матеріалу, без поширення деструкції за межі зони впливу;

4) широкі технологічні можливості є незаперечними, від різання і прошивання отворів до полірування поверхонь важкооброблюваних матеріалів, з одночасними керованими структурними та фазовими змінами поверхневого шару.

У той же час систематизованих відомостей щодо виконання операцій прошивання отворів у пластинах, панелях та елементах криволінійного профілю за допомогою Лазерно-струминного потоку нами не виявлено, чим і обумовлена актуальність даної роботи.

Результати дослідження

Доцільність використання лазерно-струминної обробки для операцій перфорування витікає з того, що промінь лазера, надходячи до поверхні протягом часу t , мс, створює локальне нагрівання в зоні впливу [4]

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

де q_0 — щільність потужності випромінювання у центрі плями фокусування; r — радіус променя із урахуванням розподілу щільності випромінювання відповідно до закону Гауса.

При прошиванні отвору глибиною h температурне поле у зоні впливу визначатиметься розподілом

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

де q_{\max} — максимальна щільність потужності випромінювання у центрі плями, x — радіальна відстань від центру теплового джерела, $P(t) = q(t) / q_{\max}$, що за умови відбиття випромінювання від оболонки струменя дозволяє припустити існування відповідності профілю отриманого отвору перерізом струменя у площині його спливання на оброблювану поверхню як перепону.

Рівняння балансу теплової енергії в довільній області $\omega = \Omega$ з урахуванням початкових умов набуде вигляду

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

Рідинний потік, спливаючи на поверхню обробки, створюватиме її охолодження шляхом відведення теплоти із зони впливу, внаслідок чого поширення термічної деструкції за зону дії сфокусованого лазерного випромінювання не відбуватиметься. Дія рідинного потоку вимагає врахування крайових умов

$$\begin{aligned} \text{ср} \frac{dT}{dt} - \lambda \Delta T &= \frac{(T - R_0) k P}{\pi A B} \exp \times \\ &\times \left[-2 \left(\frac{(x - vt)^2}{a^2} + \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right) \right] \times \exp(-kz) \end{aligned} \quad (4)$$

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

Таким чином, температурне поле у зоні дії лазерно-струминного потоку визначатиметься залежністю

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

де ρ , c , λ , $\alpha = \lambda/c\rho$, h — густина, питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності та температуропровідність матеріалу заготовки, коефіцієнт тепловіддачі з поверхні заготовки відповідно; A та B — велика і мала напівосі еліптичного променя; $P = \pi qAB$ — потужність лазерного випромінювача.

На основі аналізу приведених закономірностей можна припустити, що збільшення інтенсивності охолодження веде до локалізації тепла біля центру впливу. Отже, слід очікувати руйнування матеріалу в локальній зоні ($\leq 0,1$ — $0,15$ мм), яка значно менша за площу гідродинамічного і термічного впливів.

Для визначення форми отриманого отвору, виконуваного лазерно-струминним потоком, моделювали швидкоплинний потік як після його виходу поза зріз сопла, так і в площині нагікання на перепону — оброблювану заготовку. При цьому виходили із припущення, що неспівосність променя із вихідним отвором сопла, відмінність форми отвору від круглості призведе до зменшення інтенсивності випромінювання за перетином струминного потоку та до змін цієї інтенсивності за площиною. Відповідно, різниця швидкостей видалення матеріалу в лунці впливу за площиною дії потоку може призводити до відмінності форми отримуваних отворів.

Виконаний аналіз [6–9] свідчить (рисунок 1), що з усіх розглянутих поздовжніх конфігурацій перехідної ділянки тільки конічна може забезпечити постійність граничного кута повного відбиття незалежно від величини зміщення осі лазерного джерела. Можна очікувати, що і ця ділянка створюватиме відповідні умови і для забезпечення такого розсіювання променя у тілі струменя, яке відповідатиме формі струменя і площині його нагікання на перепону. При цьому місця, в яких спостерігатиметься різка зміна швидкостей і напрямків руху рідини, будуть максимальними дисипаторами енергії променя лазера. Таке припущення не протирічить отриманим результатам [5–7].

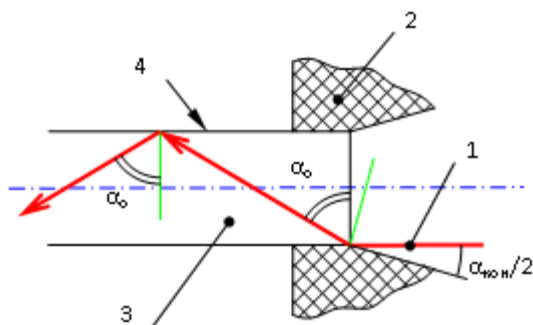


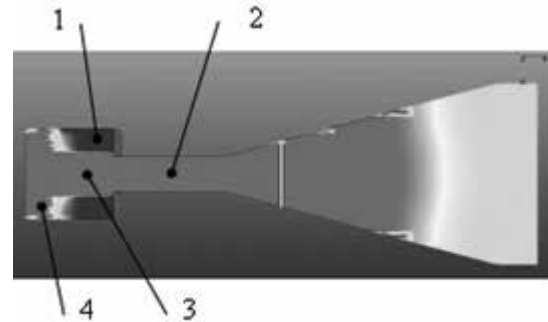
Рисунок 1 — Розрахункова схема визначення кута твірної конусу перехідної ділянки насадку: 1 — лазерний промінь; 2 — насадок; 3 — струмінь рідини; 4 — межа середовищ (вода—повітря)

З урахуванням умов відбиття променя від внутрішньої оболонки струменя як тіла із певною прозорістю та коефіцієнтом заломлення на границі «вода-повітря» n

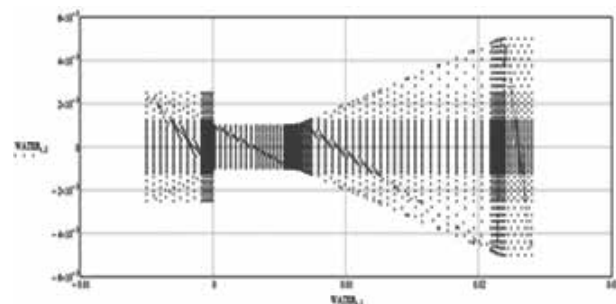
кут нахилу твірної конусної частини перехідної ділянки не повинен перевищувати 20-30 °.

Для встановлення градієнтів швидкості потоку в площині нагікання на оброблювану поверхню виконане моделювання його формоутворення засобами середовища FlowVision (рисунок 2). Вважали, що струминний потік формується соплом зі змінною геометрією протокової частини. Складові елементи сопла дозволили отримати такі форми вихідного отвору (на зрізі): круглий, прямокутний із заокругленими кутами, овальний. Вони відповідають рекомендованим формам та розмірам отворів перфорації у наповнювачах стільників та окремих їх панелях. Діаметр описаного довкола профілю кола насадка складає 2,15 мм.

Швидкість потоку рідини на вході до насадка — 14–50 м/с. Оцінювали перепад швидкостей у вільному потоці (за зрізом сопла) та встановлювали зони максимальної несталості, в яких, відповідно до результатів, можливе максимальне розсіювання променя лазера. При виконанні розрахунків отриманий масив даних, що складається з 5594 рядків координат за осями x та y , а також значень швидкості за віссю x (рисунок 2, б).



а)



б)

Рисунок 2 — Моделювання течії рідини у соплі та за його межами FlowVision (а) та масив точок, що характеризує швидкісний режим потоку (б): 1 — повітряне середовище; 2 — ділянка насадку з профільованим отвором; 3 — вільний струмінь рідини; 4 — потік, що спливає після контакту із площиною обробки

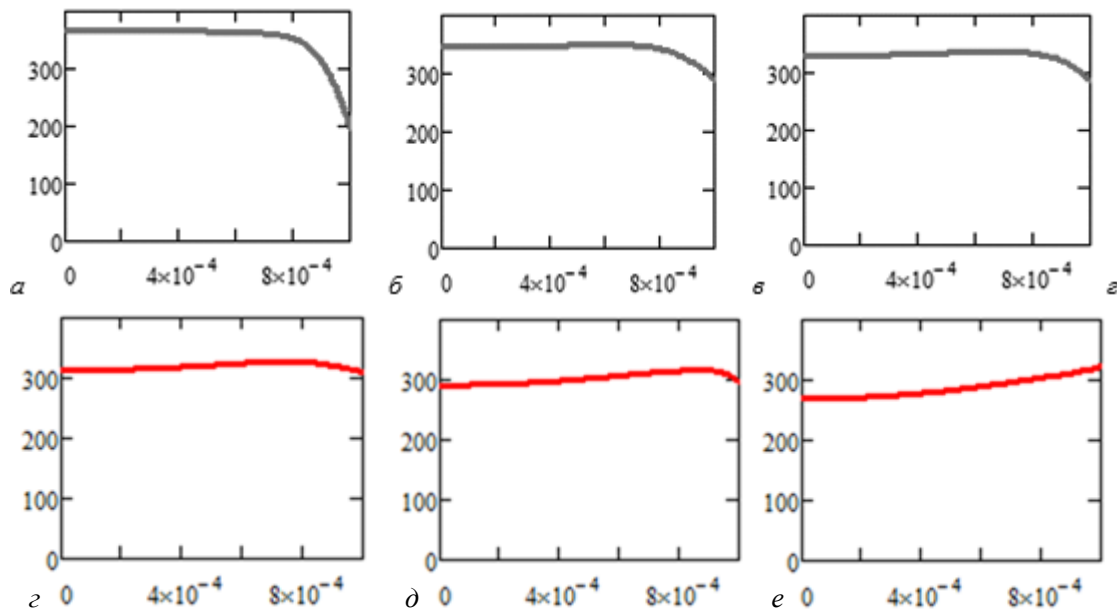


Рисунок 3 — Зменшення швидкості потоку на торці насадку та на кожному наступному перетині вільного витікання рідини за зрізом, із кроком 1,0 мм: графіки подані від вісі струменя (зліва) до границі проекції отвору насадку (справа): а — торець сопла; б — е — відстань від торця сопла з кроком 1,0 мм, е — поверхня обробки

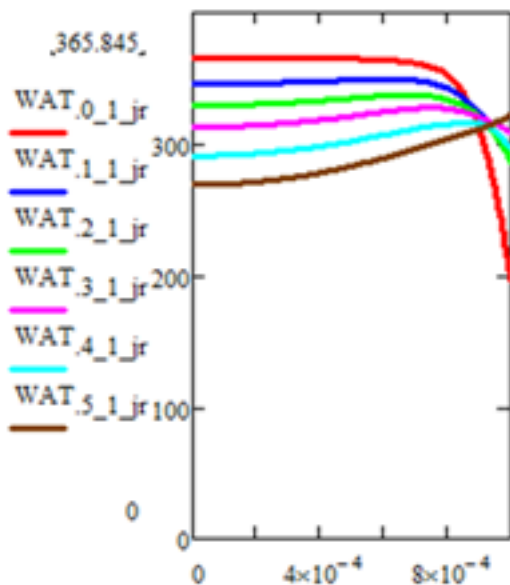


Рисунок 4 — Зменшення інтенсивності випромінювання та його розсіювання за очікуваний контур

Точкова візуалізація масива даних, отриманих в результаті розрахунків, дозволяє встановити не тільки розподіл швидкостей у потоці, а й визначити зміну інтенсивності лазерного випромінювання за умови, що розподіл інтенсивності на перетяжці каустики в площині входу дифузору сопла відповідає закону Гауса (рисунок 3).

Отримані результати свідчать, що існує чітка відстань від зрізу сопла до поверхні обробки, де втрати

потужності внаслідок порушення сталості течії будуть максимальними, і, відповідно, продуктивність обробки різко зменшиться; окрім того, за цим перетином має спостерігатися значне зниження точності відтворення контуру (рисунок 4).

Зазначені міркування дозволили побудувати криві нагрівання та охолодження зони різання і прилеглої до неї зони, за умови симетричності плями випромінювання та круглої форми отвору струминного сопла та співпадання осей струменя і лазерного променя. Однак із урахуванням просторових відхилень осей променя і струменя та також геометричних похибок форми каналу сопла інтенсивність розподілу випромінювання на мішені (поверхні) має суттєву неоднорідність: на рисунку 5 наведено результати оцінки інтенсивності випромінювання на перепоні у потоці рідини діаметром 2,0 мм при неспівосності 0,85 мм. При цьому неважко бачити, що зростання відстані від зрізу сопла до перепони призводить до вирівнювання неоднорідності, а надмірне зростання — до падіння повної інтенсивності.

Таким чином, потік рідини малого діаметру, в який введено лазерне випромінювання, забезпечує зміну форми променя в місті натікання потоку на перепону, вирівнюючи його інтенсивність за перетином, причому існує певна відстань між зрізом сопла та поверхнею обробки, за якої спостерігається максимальне вирівнювання без втрати потужності. Можна також припустити, що зміною форми зрізу сопла (вихідного отвору) можна забезпечити відповідно зміну форми отримуваних отворів, та поліпшити їх якість, що важливо для виконання перфорації у відповідальних елементах космічних апаратів.

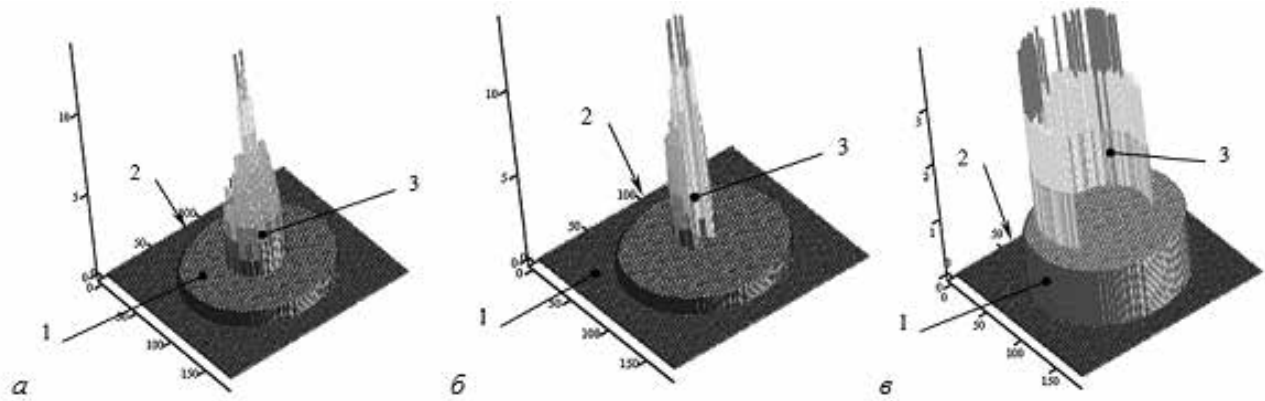
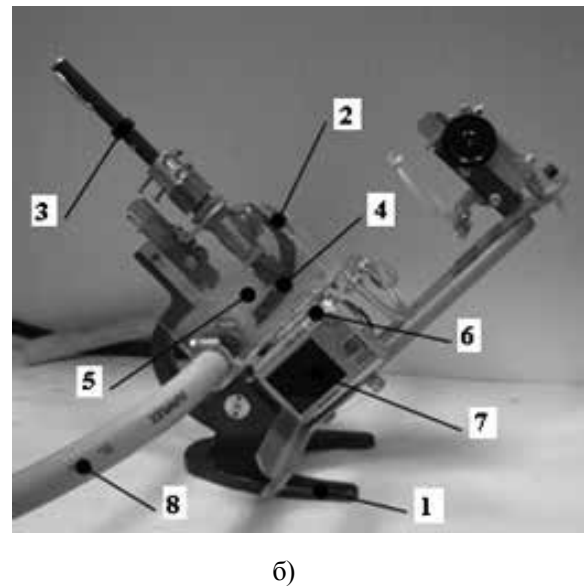
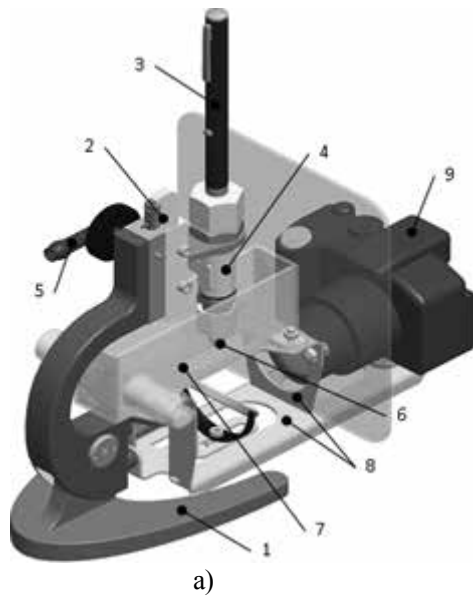


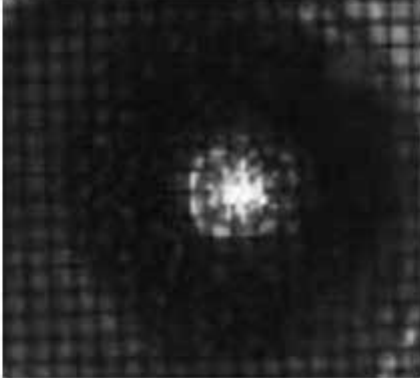
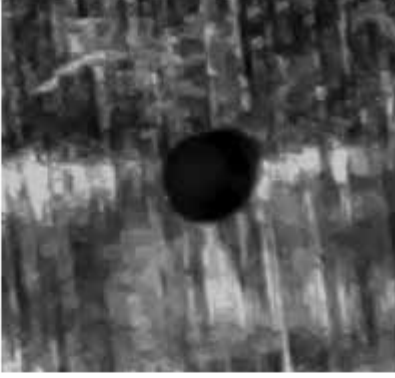
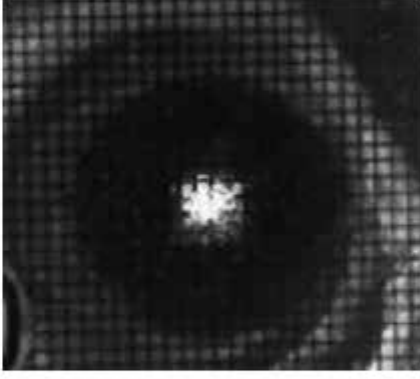
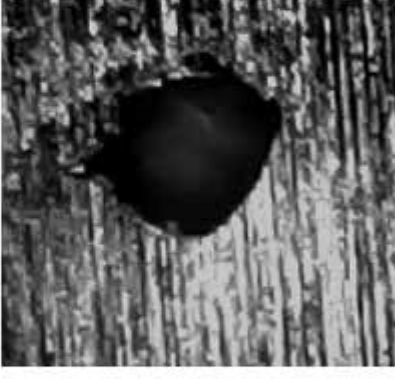
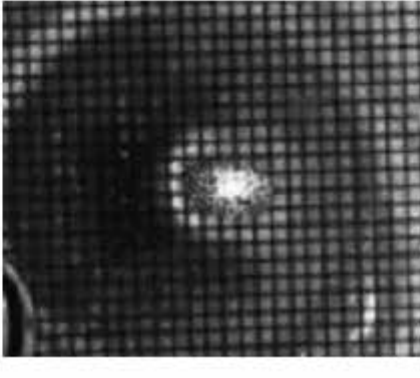
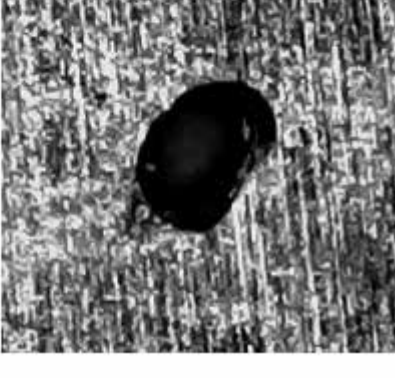
Рисунок 5 — Розподіл інтенсивності випромінювання на перепоні при натіканні струменя діаметром 2,0 мм при неспівності променя і струменя на рівні 0,8 мм для зрізу у формі правильного кола: а — відстань від зрізу сопла до перепони 5 мм; б — 10 мм; в — 16 мм; 1 — відбиток променя лазера, що проходить крізь струмінь без зламу; 2 — відбиток променя від конусної ділянки насадку та межі «вода—повітря»; 3 — поверхня оброблюваної деталі

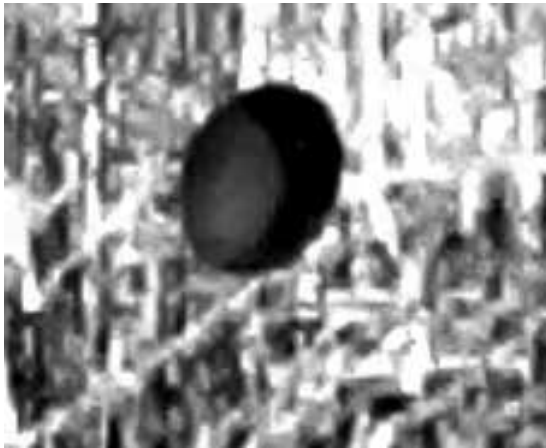


в)

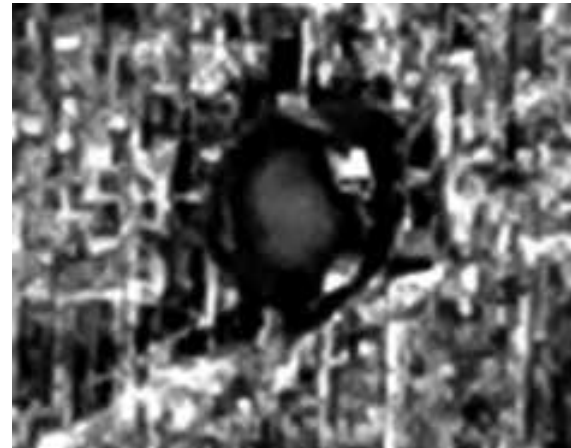
Рисунок 6 — 3D модель (а) фото (б) дослідного пристрою та використовувані соплові насадки (в), отримані методом прототипування: 1 — основа; 2 — механізм вертикального переміщення насадку; 3 — джерело лазерного випромінювання; 4 — камера коаксимального введення променя лазера в струмінь рідини; 5 — трубка підведення рідини; 6 — насадок з профільним калібрувальним каналом; 7 — робоча ванна; 8 — фотоапарат для фіксації розподілу променя у відбитку на мішені у ванні; 9 — кронштейн для кріплення ванни та фотоапарата

Таблиця 2 — Порівняння картин розподілу випромінювання за перетином та отримуваний отворів на дослідних зразках

№	Тип профіля, розміри плями	Мікрофотографія	Отвір, отриманий на ЛСК-400-5
1	Окружність, $D_0=2,25 \text{ mm}$ $D_n=2,55 \dots 2,67 \text{ mm}$		
2	Квадрат, LxВ $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$ $D_n=2,65 \times 2,71 \text{ mm}$		
3	Еліпс, AxВ $2,5 \times 3,5 \text{ mm}$ $D_n=2,6 \times 3,4 \text{ mm}$		



а)



б)

Рисунок 7 — Отвір у формі еліпсу, отриманий при усталеному русі рідини (а) та отриманий при порушенні режиму течії (б)

Для доведення теоретичних посилок та припущення про спрямлення променя лазера до форми водяного потоку, визначення впливу геометричних похибок сполучення лазера з струменем, а також для встановлення можливості зміни форми лазерного випромінювання швидкоплинним струменем проведено ряд експериментальних досліджень та уточнення параметрів моделі.

Вплив геометричних параметрів струминного потоку та умов сполучення променя лазера зі струминним потоком на параметри отриманого отвору в листових матеріалах товщиною 0,05–2,5 мм оцінювали за допомогою спеціального лабораторного устаткування (рисунок 6), яке дозволило отримати картини розподілу інтенсивності випромінювання та встановити функціональну обумовленість полів інтенсивності опромінення режимами течії рідини, профілем сопла, відхиленням відповідних вісей сопла і оптичної системи лазера. При цьому для отримання картин розподілу інтенсивності використовували джерело лазерного випромінювання з номінальним діаметром променя 1,2 мм (100 мВт, 532 нм). Струм рідини формувався насадком із вихідним отвором з перетином діаметром 2 мм круглої, прямокутної та овальної форми. Величина випромінювання фіксували за допомогою фоторезистору ФСД-1. Нехтування пульсаціями в процесі вимірів здійснювали АЦП m-DAQ. При дослідженнях відстань від торця насадки до робочої поверхні змінювали в проміжку 0,0–48,0 мм із кроком 1,0 мм, тиск живлення камери перед насадком — 0,5 МПа.

З метою зменшення турбулентності потоку було використано детурбулізатор, дрібна сітка якого зменшувала пульсації перед проходом до насадки. Результати зведено до таблиці 2. Встановлено, що розсіювання випромінювання за перетином струменя на раціональній відстані відбувається практично за всім перетином, однак спостерігається суттєва відмінність інтенсивності випромінювання.

Оскільки така відмінність може призвести до зміни очікуваного профілю отвору, проводили дослідження

форми та точності отворів у заготовках із неіржавіючої сталі марки 12Х17 товщиною 1,5 мм та в алюмінієвій фользі на установці ЛСК-400-5; обробку виконували з наступними режимами: тиск витікання — 5,0–60,0 МПа, час обробки — 0,1 с., робоча частота лазера — 65 Гц.

При аналізі картин руйнування та отриманих отворів встановлено, що процес відбувається етапно і носить квазіциклічний характер. Циклічність проявляється на кількох гармоніках та визначається як умовами течії рідини, так і частотою подачі імпульсів лазера, практично не залежать від структури оброблюваного матеріалу та фізико-механічних властивостей його компонентів. При використанні твердотільного Nd:Yag лазера з довжиною хвилі $\lambda = 1062$ нм пікові амплітуди вникають на частотах $(0,2-0,25)n_1$ та $(2,4-3,5)n_1$. При цьому в поверхневому шарі заготовки виникають явища, пов'язані зі зміною структури шару та його хімічного складу, оскільки в момент подання імпульсу випромінювання на поверхні виникає порожнина рідини із пересиченою парою, розміри якої циклічно змінюються при зміні режимів енергетичного впливу.

У той же час струминно-променеви вплив задовільно формує профільований отвір, форма якого відносно повно відповідає профілю сопла, а також попереджає поширення теплового впливу за межі дії променя. При цьому чим більше режим руху рідини відповідає ламінарному, тим краща якість отриманого отвору, менші дефекти поверхневих шарів та менші відхилення від очікуваної форми.

Висновки

Проведені дослідження дозволили запропонувати дієвий та ефективний спосіб отримання профільних отворів у наповнювачах стільникових панелей та у самих панелях, який відрізняється високою продуктивністю та дозволяє отримувати отвори без термічних і механічних дефектів. Спосіб може бути використано як для фольгованих наповнювачів, так і для металевих панелей із неіржавіючої сталі товщиною до 1,5 мм.

Література

1. Саленко, О.Ф. Функціонально-орієнтований підхід до удосконалення процесів гідроабразивного перфорування стільників із композиційних матеріалів / О.Ф. Саленко, О.М., Мана, В.А. Нікітін, Ю.О.Павлюченко, С.В. Коваленко // Промислова гідраліка і пневматика. Всеукраїнський науково-технічний журнал. — 2014. — №4 (46). — С. 64—72.
2. Salenko, O., Fomovska V., Dudyuk, V., Mana O. About some results of exploration of water jet guided laser onto the solids' surface // Unitex-10: International scientific conference 19-20 November 2010, Gabrovo 2010. — P. 414—421
3. Salenko, A., Dudyuk, V., Mana O. About effects of stream-beam influence on a surface of firm bodies // Unitex-09: International scientific conference. — vol.3. — p.462—468. — Gabrovo, 2009. — Laser workshop: Mittweida — Germany.
4. Jets methods of cutting carbide and super hard material// Salenko, O., Schetinin, V., Fomovska, L. — Lambert Academic Publisher. — Germani. — 2013. — 118 p.
4. Synova: The water jet guided laser. — Synova S.A., Switzerland. — 28 March 2006. [Электронный ресурс] Imp//www.synova.ch.microjet.pdf
5. Synova (2002): The water jet guided laser. — Synova S.A., Switzerland. — Cied 28 March 2006. Imp//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. Дейч, М.Е. Техническая газодинамика. — М.: Госэнергоиздат, 1961.
8. Френкель, Н.З. Гидравлика. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. — 456 с.
9. Пирумов, У.Г. Обратная задача теории сопла / У.Г. Пирумов, Н.З. Френкель, М.Е. Дейч. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
10. Семко, А.Н., Локтюшина, Ю.В. Об учете сжимаемости при расчете течения в гидродушке / А.Н. Семко, Ю.В. Локтюшина // Вісник Донецького національного університету, Сер. А: Природничі науки. — 2011. — № 2. — Стр. 95—101.

References

1. Salenko, A.F., Mana, A.M., Nikitin, V.A., Pavluhenko, U.O., Kovalenko S.V. Funkcional'no-orijentovanyj pidhid do udoskonalennja procesiv gidroabrazivnogo perforuvannja stil'nykiv iz kompozicijnyh materialiv. [Functionally oriented approach to improve processes waterjet perforation of honeycomb composites] — Promyslova gidravlika i pnevmatyka. — 2014. — 4/ (46). — S. 64—72.
2. Salenko, O. Fomovska, V., Dudyuk, O. Mana. About some results of exploration of water jet guided laser onto the solids' surface // Unitex-10: International scientific conference 19-20 November 2010, Gabrovo 2010. — P. 414—421.
3. Salenko, A., Dudyuk, V., Mana, O. About effects of

stream-beam influence on a surface of firm bodies // Unitex-09: International scientific conference. — vol.3. — p.462—468. — Gabrovo, 2009. — Laser workshop: Mittweida-Germany.

4. Jets methods of cutting carbide and super hard material // O. Salenko, V. Schetinin, L. Fomovska. — Lambert Academic Publisher. — Germani. — 2013. — 118 p.

5. Synova: The water jet guided laser. — S.A. Synova, Switzerland. — 28 March 2006. [Electronic resource] Imp//www.synova.ch.microjet.pdf

6. Synova (2002): The water jet guided laser. — S.A. Synova, Switzerland. — Cied 28 March 2006. Imp//www.synova.ch.microjet.pdf.

7. Martin, R. Natural diamond cutting using water jet-guided laser, Laser LIM. — 25.05.2011. — [Electronic resource] http://www.synova.ch/conferences

8. Deych, M., Tekhnicheskaya gazodinamika [Technical gasdynamics] — М.: Gosenergoizdat, 1961.

9. Frenkel, N. (1956), Gidravlika [Hydraulic] — М.: Gosenergoizdat, 1956. — 456 s.

10. Pirumov, Yu. Obratnaya zadacha teorii sopla [Inverse theory of nozzle] — М.: Mashinostroyeniye. — 240 s.

11. Semko, A., Loktyushina, Yu. (2011), On account of the compressibility of the calculation of the flow in the hydrocushion // Visnyk Donetskogo natsionalnogo universytetu. — № 2. — S. 95—101.

Надійшла 14.08.2015

УДК 621.23.000:241

Повышение эффективности процесса лазерно-струйного перфорирования листовых заготовок профильным потоком

**А.Ф. Саленко, В.Ю. Холодный,
С.В. Коваленко, Ю.А. Павлюченко**

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.

UDC 621.23.000:241

**Increase of efficiency process of water jet
guided laser perforation sheet workpieces by
profiled stream**

**A.F. Salenko, V.Yu. Kholodnyi,
S.V. Kovalenko, Yu.O. Pavluchenko**

The results of researches of water jet guided laser method of materials processing as one of the perspective methods cut-

ting various products are shown. The features create profiles nozzles (transition area) for optimal forming water jet guided laser stream are shown. The optimal hole of the nozzle cavity is created. The modeling of the dissemination of the light stream was conducted using Mathcad software. The mathematical modeling of the fluid flow through the constructed nozzle cavity was conducted using FlowVision. Numerous researches on simulated installation and laser-jet complex LSK-400-5 were conducted. The diameter of the jet must be greater than the diameter of the laser beam on the value of its collapse.

Keywords: water jet guided laser, hole, power beam efficiency.