МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ХОЛОДНИЙ ВОЛОДИМИР ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.9.048:62-472

ОТРИМАННЯ ОТВОРІВ ПЕРФОРАЦІЇ В СТІЛЬНИКОВИХ КОНСТРУКЦІЯХ ЗАСОБАМИ СТРУМИННО-ЛАЗЕРНОГО ВПЛИВУ

Спеціальність 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі процесів і обладнання механічної та фізико-технічної обробки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти та науки України.

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор
Саленко Олександр Федорович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, завідувач кафедри процесів і обладнання механічної та фізико-технічної обробки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Анякін Микола Іванович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», старший науковий співробітник кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій;

кандидат технічних наук, доцент
Сапон Сергій Петрович,
Чернігівський національний технологічний університет, доцент кафедри технології машинобудування та деревообробки.

Захист відбудеться 9 грудня 2016 р. о 10^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 23.073.02 у Кіровоградському національному технічному університеті за адресою: 25006, м. Кропивницький,
пр. Університетський, 8.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Кіровоградського національного технічного університету, за адресою: 25006, м. Кропивницький,
пр. Університетський, 8.

Автореферат розісланий 8 листопада 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради О. К. Дідик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Розвиток авіа- та ракетобудування нерозривно пов'язаний із розширенням сфери використання новітніх матеріалів, яким притаманні особливі властивості та для оброблення яких традиційні підходи не є ефективними. Такі матеріали обумовлюють появу принципово нових методів обробки, серед яких останнім часом все ширше використовується струминно-лазерний метод, заснований на явищах одночасно-циклічної дії теплового і струминного потоків. У цьому випадку на поверхні виникає високоградієнтне температурне поле, локалізоване на виключно малій ділянці, що обумовлює прецизійність руйнування та локалізацію термонапружень у досить малому обсязі. У такий спосіб можна обробити кераміку, карбідні матеріали, нітридні сполуки та штучні алмази. В провідних країнах дані технології використовуються для розкрою кремнієвих чипів, для виконання обробки надміцних матеріалів.

Крім отримання наскрізних різів, аерокосмічна галузь потребує розробки і впровадження новітніх процесів перфорування елементів стільникових конструкцій, тобто виконання отворів малого діаметру (від 0,05 мм до 1,50 мм) круглої або профільної форми (наприклад, при перфоруванні стільникового заповнювача силових або теплозахисних панелей літальних апаратів), які традиційно виконуються механічним прошиванням, свердлуванням або прошиванням променем оптичного квантового генератора (ОКГ), і які є найбільш нетехнологічними і вартісними видами обробки. Головними проблемами перфорування є забезпечення точності форми отвору та передування виникненню концентраторів напружень, що знижують фізико-механічні властивості заготовки і стільникового виробу в цілому, оскільки такі отвори, як правило, отримують копіюванням профілю робочого інструменту. Механічне проколювання групами інденторів не тільки деформує заготовку, що потребує введення додаткових технологічних операцій, а і веде до отримання розривів міжотвірних ділянок, тобто до виникнення невиправного браку.

Ряд робіт і виконані нами попередні дослідження довели, що струминно-лазерна обробка, як певний гібридний метод отримання отворів копіюванням, має перспективи для реалізації операцій перфорування, оскільки продуктивність обробки може бути збільшеною у кілька разів. Однак розрізненість напрацювань і відсутність систематизованих відомостей щодо особливостей процесу прошивання отворів у тонколистових заготовках обумовлюють необхідність поглибленого вивчення явищ, які протікають у зоні термічно-гідродинамічного впливу, встановлення закономірностей формування струминно-лазерного потоку, його спроможності виконувати кероване руйнування поверхонь твердого тіла, отримання відповідних функціональних залежностей. Цим і обумовлена актуальність роботи та її науково-практичний інтерес.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувалися на підставі держбюджетних, госпдоговірних та пошукових тем внутрішньо-вузівського фінансування: фундаментальної держбюджетної теми «Розробка теорії струминно-лазерного різання композитів на основі функціонально-орієнтованого підходу» (№ д.р. 111U001898, 2010-13 рр.), госпдоговірної теми «Удосконалення процесу абразивно-струминного різання надтвердих інструментальних композитів на основі функціонально-орієнтованого підходу» (замовник ТОВ Науково-дослідницьке, конструкторсько-технологічне, виробничо-впроваджувальне підприємство «Інструмент», м. Світловодськ, 2014 р.),

госпдоговірної теми «Розробка технології та виготовлення комплекту зразків з ВВКМ 3D-структури для визначення властивостей матеріалу» (№ д.р. 0116U000939 – замовник ДП «КБ «Південне», м. Дніпро, 2016 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення якості перфорування елементів стільникових конструкцій шляхом формування отворів методом копіювання засобами струминно-лазерного впливу.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі науково-технічні задачі:

1. Розробка фізичної та математичної моделі взаємодії струминно-лазерного потоку з тонколистовою заготовкою.

2. Розробка оригінального безвіконного пристрою для сполучення променя ОКГ зі струменем рідини, визначення його раціональних параметрів, математичне моделювання течії рідини в сопловому насадку та встановлення закономірностей витікання рідини з профільованого отвору.

3. Розробка оригінальної методики дослідження явищ сполучення променя лазеру зі струменем рідини, сформованим сопловим пристроєм із регульованими параметрами витікання.

4. Виявлення закономірностей сполучення променя лазеру зі струминним потоком, встановлення впливу форми зрізу сопла та режимів витікання рідини на епюри розподілу інтенсивності випромінювання на оброблюваній поверхні, визначення енергетичної спроможності струминно-лазерного потоку формувати отвір методом копіювання.

5. Встановлення функціональної обумовленості параметрів отримуваних отворів і дефектного шару в оброблюваних тонколистових заготовках режимами обробки та параметрами струминно-лазерного пристрою, визначення міцності перфорованих гофронаповнювачів, отриманих різними технологічними способами.

6. Розробка інженерної методики розрахунку режимів ведення обробки, розробка рекомендацій і принципів створення струминно-лазерних пристроїв безвіконного типу, впровадження методу перфорування тонколистових заготовок засобами струминно-лазерного впливу із регульованим струминним потоком у діюче виробництво.

Об'єкт дослідження – ерозія тонколистової заготовки від струминно-лазерного впливу за умови відсутності робочої подачі.

Предмет дослідження – забезпечення параметрів якості та геометричної точності дрібнорозмірних отворів перфорації при їх виконанні струминно-лазерним методом.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз взаємодії струминного та лазерного потоків в поєднанні з експериментальними дослідженнями процесу їх взаємодії на оригінальній лабораторній установці. При теоретичному моделюванні взаємодії потоків використовувались програмні комплекси «Mathcad», «FlowVision» та «TracePRO». Визначення температурних полів здійснювалося на основі фундаментальних законів тепло- та масопереносу, умов течії рідини в сопловому насадку; на поверхні – на базі основних закономірностей гідродинаміки та гідромеханіки, із використанням диференційного та інтегрального числення. Для дослідження отримуваних отворів, вивчення дефектного шару та концентраторів напружень, використовувалися сучасні інструментальні методи, зокрема, растрова електронна мікроскопія, енергодисперсійний мікроаналіз. Обробку експериментальних даних виконували методами дисперсійного та регресійного аналізу із використанням пакету «StatGraphic Centurion». Для моделювання елементів конструкції лабораторної установки та процесів, що досліджувалися, використо-

вували програмні комплекси «PTC Creo 3.0» та «SolidWorks». Достовірність теоретичних положень, наукових та практичних результатів, наведених у роботі, підтверджено експериментально в лабораторних умовах та в умовах виробництва.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. На основі отриманих картин розподілу інтенсивності випромінювання, визначених за розв'язком теплової задачі температурних полів в тонколистовій заготовці в умовах натікання на неї сполученого струминно-лазерного потоку, вперше доведена можливість отримання методом копіювання профільних отворів (діаметром до 2,0 мм), форма яких відповідає формі перерізу струменя. Доведено, що форма отвору функціонально обумовлюється режимами течії струминного потоку.

2. Удосконалено принцип сполучення променя лазеру зі струменем рідини та вперше обґрунтовано доцільність використання кільцевих сопел зі змиканням потоку у засопловому просторі. Показано, що використання кільцевих сопел дозволяє зняти обмеження щодо максимального тиску витікання рідини.

3. Вперше встановлено функціональну обумовленість ширини дефектної зони тонколистових заготовок швидкістю витікання рідини з сопла та енергією імпульсу випромінювання та показано, що кількість імпульсів ОКГ, яка формує отвір і є пропорційною товщині оброблюваного матеріалу та розміру більшої діагоналі профілю, істотно не впливає на ширину дефектного шару.

4. Отримали подальший розвиток методи оцінки інтенсивності випромінювання уздовж та впоперек струменя та показано, що існує певна відстань від зрізу сопла до поверхні обробки, де втрати потужності випромінювання є мінімальними, і, відповідно, продуктивність обробки буде найбільшою.

Практична цінність роботи.

1. Розроблено оригінальну методику дослідження явищ сполучення променя лазеру зі струменем рідини та виготовлено спеціальний лабораторний стенд для отримання картин розподілу інтенсивності випромінювання на перепоні та прогнозування форми отримуваного отвору.

2. Встановлені основні закономірності для визначення числа Рейнольдса Re, яке обумовлює перерозподіл інтенсивності випромінювання за перетином струменя, і, відповідно, обумовлює точність форми отримуваного отвору

3. Розроблено алгоритм щодо визначення оптимальної відстані від зрізу сопла до поверхні обробки, де втрати потужності устаткування є мінімальними, а продуктивність обробки – максимальною.

4. Запропоновано оригінальну конструкцію безвіконного струминно-лазерного пристрою із регульованою протоковою частиною, використання якого дозволяє отримувати отвори методом копіювання потрібної форми у заготовках товщиною до 0,8 мм

5. На основі головних положень дисертації сформульовано рекомендації у вигляді технічних вимог до технологічного обладнання та засобів струминно-лазерного впливу для отримання отворів перфорації малого діаметра в умовах ДП «КБ «Південне»» (м. Дніпро). Розроблено та впроваджено рекомендації із перфорування заготовок на підприємстві ТОВ «АВМ АМПЕР» (м. Кременчук).

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертації отримані автором самостійно. Збір статистичних даних виконувався автором сумісно з фахівцями кафедри систем автоматичного управління і електроприводу, кафедри механіки та матеріалознавства та кафедри процесів і обладнання механічної та фізико-технічної обробки (ПОМФТО) КрНУ ім. М. Остроградського. В публікаціях,

виконаних у співавторстві, дисертанту належить: проаналізовано можливість отримання профільованих отворів в тонколистових матеріалах струминно-лазерним методом з коаксіальним введенням променя лазера [6, 19]; проведено комп'ютерне моделювання течії рідини в профільованих соплових насадках та її витіканні в атмосферу з подальшим натіканням на перешкоду [4]; проведено комп'ютерне моделювання розповсюдження світлового потоку в потоці рідини [20]; для зняття характеристик розподілу випромінювання у потоці і визначення величин інтенсивності спроектовано та виготовлено вимірювальний комплекс, що здатний фіксувати і вимірювати просторовий розподіл випромінювання малопотужного лазера за перерізом [18]; проведено оцінку впливу геометричних похибок при виготовленні струминно-формуючої головки і форми зрізу сопла на картину розподілу світового потоку на поверхні деталі, що оброблюється [9, 14]; проведено оцінку впливу інструментальної помилки та похибки методу в дослідах струминно-лазерного метода обробки [15, 16]; визначено вплив величини інтенсивності випромінювання та його розподілення за потоком струменя від швидкості потоку (числа Рейнольдса) [3, 8, 13]; розроблено модель взаємодії струминно-лазерного потоку із поверхнею твердого тіла [11]; проаналізовано вплив умов формування струминно-лазерного потоку на точність виконуваної форми отворів, можливість отримання отворів малого розміру круглої форми або профільних [2, 10]; розглянуті явища утворення дефектного шару в оброблюваних тонколистових заготовках та встановленні функціональні закономірності впливу режимів обробки на форму і параметри дефектного шару, визначення міцності перфорованих гофронаповнювачів, отриманих різними технологічними способами [1, 7, 21].

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях, зокрема: Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (21–22 квітня 2011 р., 25–26 квітня 2013 р, 24–25 квітня 2014 р., 15–16 квітня 2015 р., м. Кременчук); XII Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (22–25 жовтня 2012 р., м. Київ); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (9–12 листопада 2012 р., м. Кременчук); Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (25–28 червня 2013 р., 24–27 червня 2014 р., м. Київ); Міжнародній науково-технічній конференції «Машинобудування – очима молодих» (30 жовтня – 01 листопада 2013 р., м. Кременчук); Unitex – 2013: International scientific conference 22– 23 november 2013 (22–23 листопада 2013 р., м. Габрово, Болгарія); XXII міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (21–23 травня 2014 р., м. Харків); XX Міжнародній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (26–29 травня 2015 р., м. Київ); International Scientific-Methodological Conference «How to teach material sciences: new approaches and experiences from the MMATENG project» (23 липня 2015 р., м. Краків, Польща).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено в 21 науковій праці: 7 статтях у провідних фахових виданнях в Україні та за кордоном, 1 патенті України на корисну модель та 13 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 146 найменувань на 16

сторінках та 3 додатків на 12 сторінках. Основний текст дисертації викладений на 174 сторінках, повний обсяг дисертації становить 204 сторінки машинописного тексту, включаючи 98 рисунків та 28 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи, сформульовано мету, об'єкт, предмет дослідження і задачі, які автор розв'язує в роботі. Окреслено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Подано відомості про апробацію, публікації та структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** розглянуті проблеми перфорування компонентів стільникових конструкцій (СК) авіа- та космічної техніки. Систематизовано технологічні процеси виготовлення СК та забезпечення якості готового виробу. Проаналізовані питання, що стосуються способів і методів перфорування елементів СК, зокрема, наповнювачів, існуючі застосовувані методи перфорації тонколистових матеріалів; зроблено висновок про перспективність струминно-лазерної обробки при перфоруванні тонколистових заготовок. Особливу увагу приділено технологічним можливостям струминно-лазерної обробки, як методу циклічного термічно-гідродинамічної дії, який за рахунок суміщення двох високоенергетичних впливів дозволяє зменшити або усунути деякі недоліки, властиві іншим способам, що значно розширює гаму матеріалів, оброблюваних у такий спосіб. На основі результатів, отриманих A.Pauchard, K.Lee, B.Richerzhagen та ін. зроблено припущення про можливість мінімізації деструктивного шару на поверхні отвору. Проведено ґрунтовний аналіз і висвітлено сутність струминно-лазерної обробки, подано особливості її реалізації для отримання отворів методом копіюванням.

У **другому розділі** проведено обґрунтування можливості використання струминно-лазерного впливу для отримання отворів перфорації в тонколистових металевих заготовках.

Визначено обумовленість параметрів процесу струминно-лазерного прошивання (СЛП) явищами на поверхні оброблюваної заготовки, встановлено відмінність процесу від лазерного (Л), лазерного з продувкою (ЛП) та лазерного із охолодженням водою (ЛПВ). Показано, що при СЛП чергування фаз обробки відбувається всякий раз, коли після імпульсу випромінювання ОКГ поверхня перепони, що контактує зі струменем, в зоні з найбільшим градієнтом швидкості потоку миттєво перегрівається і плавиться з утворенням порожнин пересиченої пари; в паузі між імпульсами ці порожнини змикаються в потоці, і поверхнею поширюється ударна хвиля, з одночасним інтенсивним охолодженням зони термовпливу.

Розподіл температури на поверхні поглинання при ЛП як функції глибини *z*, відлічуваної від поверхні, радіальної відстані *x* від центру теплового джерела й часу *t* з моменту початку впливу теплового імпульсу визначатиметься рівнянням

$$T(x,z,t)=\frac{q(x)r^2}{\lambda}\left(\frac{a}{\pi}\right)^{1/2}\int_0^t\frac{P(t-\tau)\exp\left[\dfrac{z^2}{4at}-\dfrac{x^2}{4a\tau}\right]}{\sqrt{\tau}\left(4a\tau+r^2\right)}d\tau,$$

де $q(x)=q_0\exp\left(-x^2/r^2\right)$, де q_0 — щільність потужності випромінювання в центрі плями фокусування; r — радіус гаусового пучка; λ – коефіцієнт теплопровідності;
a – температуропровідність матеріалу заготовки; t – плинний час; x, z – координати;
P – потужність лазерного випромінювання.

Вважаючи, що температурні поля породжуються джерелами W_s, залежать від стоків W_g відводу тепла (у тому числі і за рахунок гідродинамічного впливу) з поверхні $\partial\Omega$ за законом Ньютона і переносом тепла потоком газу під час випаровування нагрітої поверхні зі швидкістю $\vec{v}_f$ в напрямку осі OZ, скористаємося поняттям стоку тепла, який для випадку охолодження зони впливу матиме такий вид: $q_l = \beta_v T^v + \sigma T^4 + L\nu_{ev}$. Тут перша складова – конвекційні тепловтрати, друга – променеві та остання – втрати на випаровування. Закон збереження теплової енергії для довільної області $\omega \subset \Omega$ виражає рівність енергії, виділеної джерелами тепла W_s за відрізок часу $t_2 - t_1, t_2 > t_1 \geq 0$, сумі енергій, витраченої стоками W_g, витраченої на підвищення внутрішньої енергії e та енергії, переданої потоками тепла $\vec{q}_T$ через поверхню $\partial\omega$ за той же проміжок часу.

Потік рідини при СЛП не тільки змінює епюру розподілу випромінювання по поверхні внаслідок явищ відбиття променя від оболонки ламінарного потоку, але й, натікаючи на поверхню обробки, викликає її охолодження шляхом відведення теплоти від зони дії лазерного променя, в результаті чого поширення термічної деструкції за зону впливу відбуватися не буде. Згідно з результатами, отриманими в роботах W. Schulz, M. Niessen, U. Eppelt, K. Kowalick, вплив потоку рідини враховують крайові умови: $c\rho\frac{dT}{dt} - \lambda\Delta T = \frac{(T-T_1)kP}{\pi AB}\exp\times\left[-2\left(\frac{(x-vt)^2}{c^2} + \left(\frac{y}{b}\right)^2\right)\right]\times\exp(-kz), \qquad \lambda\frac{dT}{dz}\Big|_{z=0} = \alpha(T)(T-T_2)$, де T_1 и T_2 – температура на верхньому та нижньому участках різа відповідно; c – питома теплоємність; ρ – щільність; ΔT – зміна температури; k – експериментальний коефіцієнт; α – коефіцієнт теплообміну; v – швидкість руху фронту тепла; b, c – параметри розподілу щільності потужності випромінювання (закон Гаусса).

З урахуванням крайових умов температурне поле за умови коаксіальності потоку і випромінювання, для випадку круглого перетину зрізу сопла і еліптичної форми плями випромінювання, визначиться в такий спосіб:

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

де x, y, z – координати; t – час; η – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні заготовки відповідно; α – коефіцієнт теплопровідності; A і B – велика і мала півосі струминно-лазерного потоку; і $P = \pi qAB$ – потужність лазерного випромінювача.

Між імпульсами випромінювання на ванну розплаву діє тільки потік рідини, із зусиллям P_n, визначеним $P_n = \mu f_c v\sqrt{2\rho p_b}$, де f_c – площа струменя; v – швидкість потоку; p_b – тиск рідини; μ – коефіцієнт витрати сопла.

При СЛП між імпульсами ОКГ утворена газова камера змикається потоком із сопла із виникненням гідродинамічного удару, що визначається як

$$p = \frac{\rho_2 v(t) C_0}{1+\sqrt{\frac{\rho_1 E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}}}, \qquad (2)$$

де ρ_1, E, μ – щільність, модуль пружності та в'язкість рідини у ванні розплаву,

ρ_2 C_0 – щільність та швидкість звуку у потоці перед ударом, $v(t)$ – швидкість в момент удару.

На відміну від СЛП, під час ЛПВ потужного гідроудару не відбувається.

На кінець періоду між імпульсами ОКГ температура на поверхні визначатиметься як

$$T(t) = T_{\max} - \frac{q_l \delta}{\lambda}\left[\frac{2}{\sqrt{\pi}}\frac{\sqrt{a(t-\tau)}}{\delta} + \exp\left(\frac{a(t-\tau)}{\delta^2}\right) erfc\left(\frac{\sqrt{a(t-\tau)}}{\delta}\right)\right] \quad (3)$$

δ – глибина проникнення тепла, $q_l = f(f_c, p, t)$

Порівняння картин зміни температур при СЛП, Л, ЛП (рис. 1) показує, що збільшення інтенсивності охолодження веде до локалізації тепла біля центру впливу. Отже, руйнування матеріалу слід очікувати в локальній зоні (≤ 0,1–0,15 мм), що відповідає площі перетину зони термічного впливу. Сам потік також викликає нерівномірне охолодження перепони, оскільки при контакті з останньою він починає розтікатися. Однак в цілому форма вирви ерозії однозначно визначається геометричними параметрами струминно-лазерного потоку.

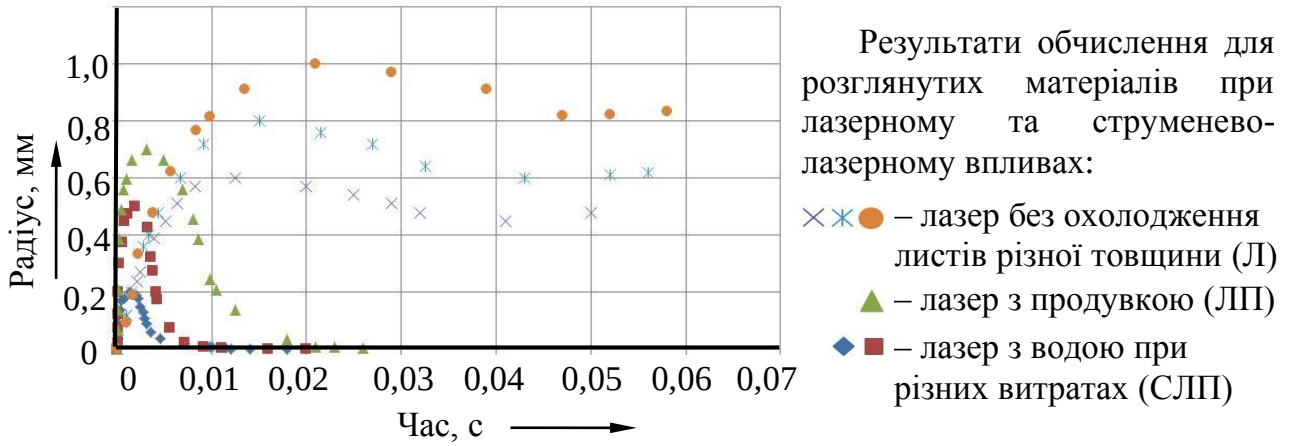


Рис.1. Результати обчислення поширення зони термічної деструкції для аналізованих матеріалів при лазерному та лазерно-струминному впливах

Для виконання обробки методом копіювання профілю потоку запропоновано нову конструкцію струминно-лазерного пристрою із кільцевим каналом (рис. 2, б), що використовує принцип формування струменя кільцевим соплом і відрізняється від пристрою Synova (рис. 2, а). Застосування запатентованої системи [21] дозволяє використовувати різні форми насадок та знімає обмеження щодо умов підведення рідини, що значно розширює технологічні можливості даного методу. Однак в цьому випадку потрібне проведення додаткових досліджень, оскільки умови формування струменя істотно впливають на ефективність його транспортування в робочу зону, і за свідченням B. Richerzhagen, G. Delacrétaz, R. P. Salathé можуть призводити до виходу випромінювання за оболонку струменя.

Для оцінки можливості формування отвору методом копіювання виконали моделювання поведінки швидкоплинного потоку із визначенням епюри розподілу випромінювання за перетином струменя як після його виходу за зріз сопла, так і на площині натікання. При цьому виходили із припущення, що неспіввісність променя із вихідним отвором сопла, відмінність форми отвору від форми робочої плями випромінювання веде до зменшення інтенсивності випромінювання на робочій площадці. Відповідно, і до зміни умов видалення матеріалу з поверхні, що може призводити до відмінності форми отримуваних отворів.

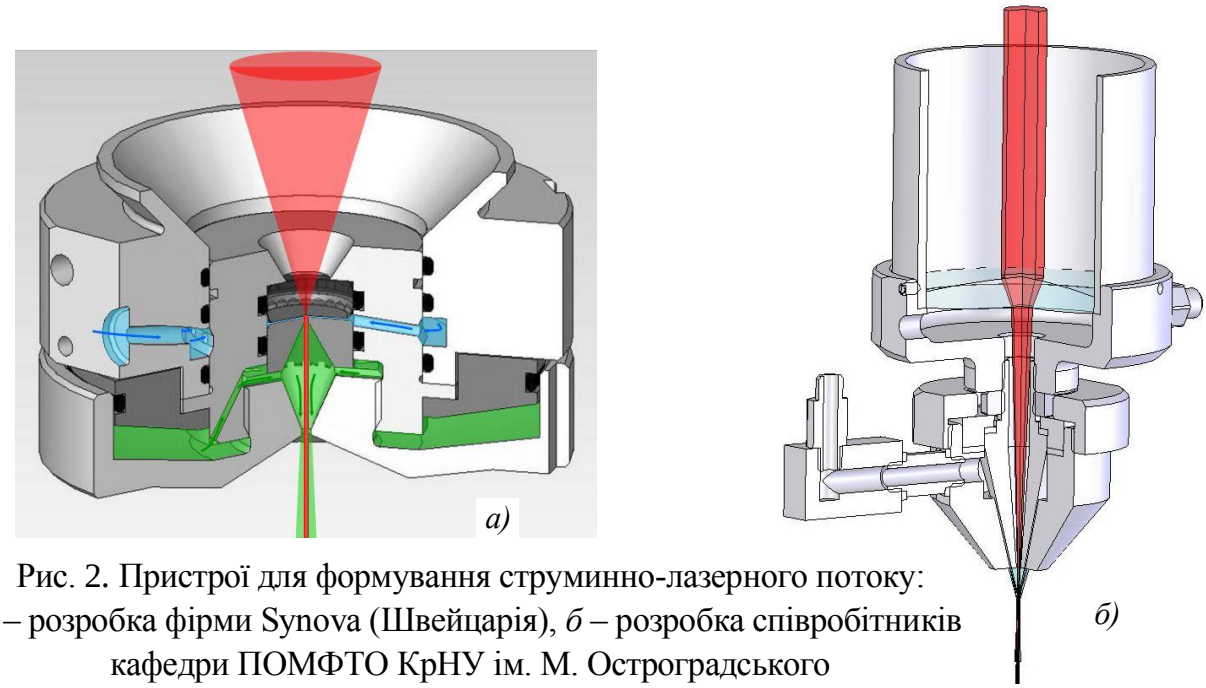


Рис. 2. Пристрої для формування струминно-лазерного потоку: *а* – розробка фірми Synova (Швейцарія), *б* – розробка співробітників кафедри ПОМФТО КрНУ ім. М. Остроградського

Виконаний аналіз робіт R. Martin, М.Дейча, Н.Френкеля довів (рис. 3, а), що з усіх розглянутих конфігурацій перехідної ділянки сопла тільки конічна може забезпечити постійність межового кута повного відбиття незалежно від величини зміщення вісі ОКГ. Можна очікувати, що ця ділянка створюватиме відповідні умови для забезпечення такого розсіювання променя у тілі струменя, яке відповідатиме формі струменя в площині її натікання на перепону. При цьому місця, в яких спостерігатиметься різка зміна швидкостей і напрямків руху рідини, будуть максимальними дисипаторами енергії променя ОКГ.

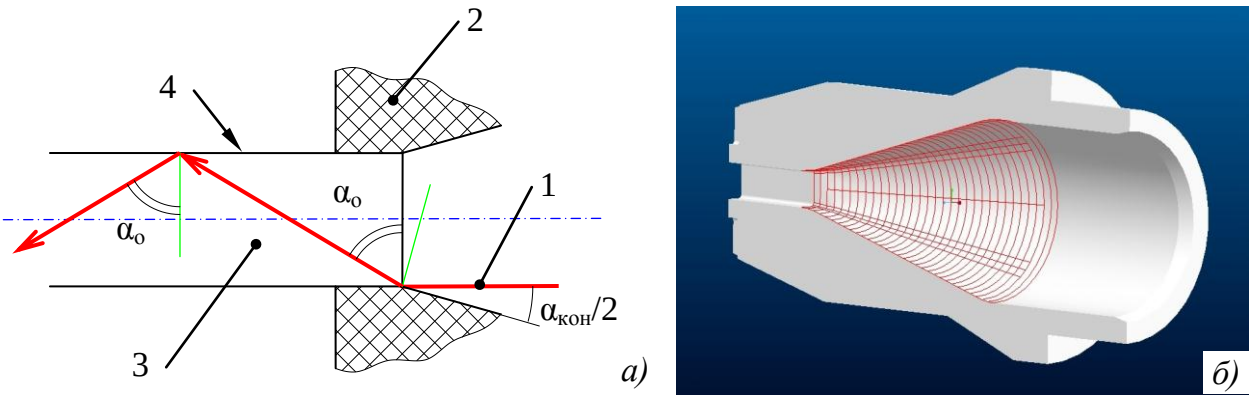


Рис. 3. Розрахункова схема визначення кута твірної конусу перехідної ділянки сопла (а) та побудований за цією схемою профіль каналу сопла із нециліндричним зрізом (б): 1 – промінь ОКГ; 2 – сопло; 3 – струмінь рідини; 4 – межа середовищ (вода–повітря)

Для оцінки впливу умов витікання рідини на епюру розподілу інтенсивності випромінювання виконано імітаційне моделювання в середовищі FlowVision (рис. 4), яке дозволило встановити картини швидкостей і ліній течії при зміні форми каналу, а також розрахувати очікувану інтенсивність випромінювання в плямі.

При моделюванні течії рідини в каналі сопла взято до уваги, що струменевий потік формується соплом із змінною геометрією прото-кової частини. Досліджено

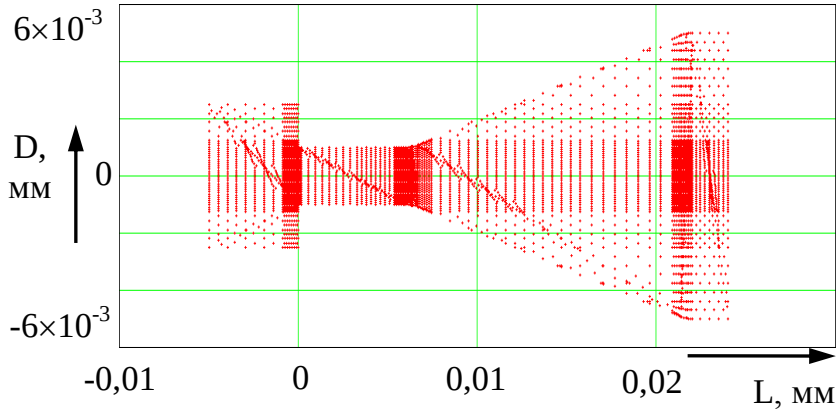


Рис. 4. Масив точок, що характеризує швидкісний режим потоку, отриманий в результаті моделювання течії рідини після виходу із сопла в FlowVision

такі форми вихідного отвору сопла: кругла, прямокутна з заокругленими кутами, овальна. При цьому діаметр отвору сопла становив 2 мм; швидкість потоку рідини на вході в насадок – 14...50 м/с.

Точкова візуалізація масиву 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 в площині входу дифузору сопла відповідає закону Гауса.

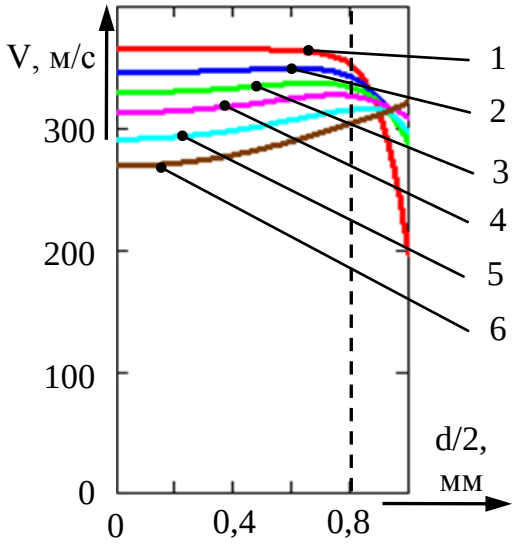


Рис. 5. Зменшення інтенсивності випромінювання та його розсіювання за очікуваний контур при довжені струменя l_s, мм: 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 4; 6 – 5 (на поверхні натікання)

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 може відбутися значне зниження точності форми отвору (рис. 5).

Дане твердження узгоджується і з результатами точкової візуалізації поширення променя лазера в конкретному струмені при його натіканні на перешкоду розрахунок якої здійснений на основі лінії течії в соплі та за сопловому просторі із використанням програмного модулю TracePRO 70 (рис. 6).

Слід зазначити, що з урахуванням просторових відхилень вісей променя і струменя та геометричних похибок форми каналу сопла інтенсивність розподілу випромінювання на поверхні має суттєву неоднорідність: на рис. 7 наведені результати оцінки інтенсивності випромінювання на перепоні в потоці рідини *d* діаметром 2,0 мм при неспіввісності 0,18 мм. Початкове зростання відстані від зрізу сопла до перепони веде до вирівнювання неоднорідності, а подальше – до падіння повної інтенсивності.

З метою кількісної оцінки перерозподілу інтенсивності контролювали параметри форми отворів характерні розміри в перетинах (де максимальної *a* і мінімальної *b* півосі), $R_a = \frac{a_z}{a_p}$; $R_b = \frac{b_z}{b_p}$, та інтегральний показник відмінності форми, установлений за 12 точками контрольованого контуру $R_p = \sum_{i=1}^{12} \frac{a_{zi}}{a_{pi}}$. Нами доведено (рис. 8), що збільшення відстані *h* істотно впливає на зміну форми перерізу струменя, як і

зростання тиску p_b, при перевищенні певної межі якого відбувається порушення сталості витікання рідини із утворенням кавітаційних каверн.

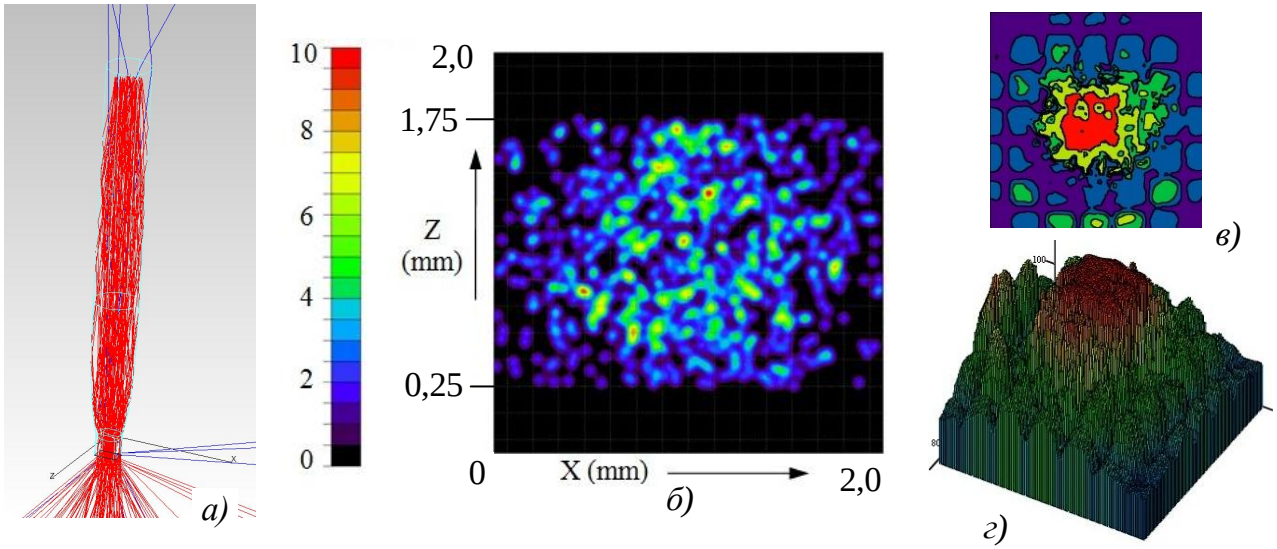


Рис. 6. Напрямок поширення променя в потоці рідини до моменту натікання на поверхню (а) і картина інтенсивності променя по перетину сопла (б) (зріз сопла – прямокутник 1,5×2,0 мм). Світлова пляма у вигляді контурного (в) та 3D (в) графіків

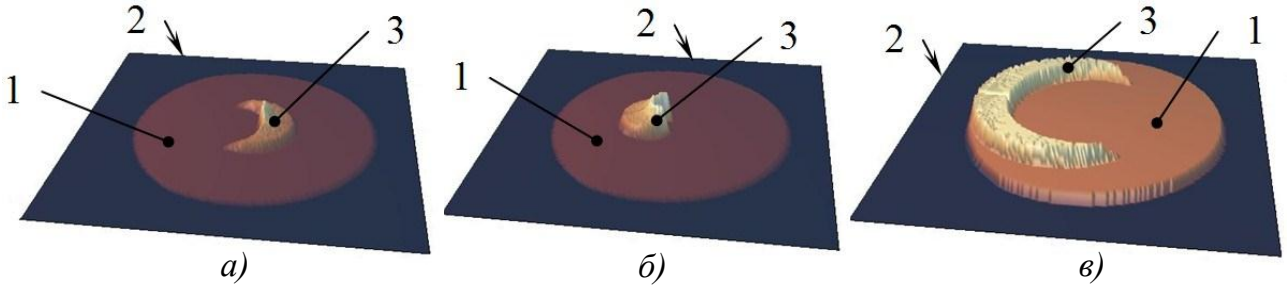


Рис. 7. Моделювання інтенсивності променя ОКГ на поверхні оброблюваної деталі з неспіввісністю променя і струменя хладагенту в 0,18 мм (отвір сопла виконано у формі кола): а – відстань від зрізу сопла до перешкоди 5 мм; б – 10 мм; в – 16 мм;
1 – відображення променя лазера, що проходить крізь струмінь без зламу;
2 – відображення променя від конусної ділянки насадка і границі «вода-повітря»;
3 – поверхня оброблюваної деталі

Таким чином, зроблені наступні висновки: існує певна відстань від зрізу сопла до поверхні обробки, де втрати потужності є мінімальними, і, відповідно, продуктивність обробки буде найбільшою. У цьому перетині зміна положення осей потоку і променя найменше позначаються на зміні гістограми інтенсивності випромінювання ОКГ. Також установлено, що за вказаним перетином відбувається вирівнювання інтенсивності випромінювання по струменю, одночасно із частковою втратою потужності. Таким чином, зміною форми зрізу сопла (вихідного отвору) можна забезпечити зміну форми одержуваних отворів, поліпшити їх якість, що важливо для виконання перфорації у відповідальних елементах СК.

Третій розділ висвітлює результати розподілу інтенсивності випромінювання лазеру в профільованому потоці.

Проведено обґрунтування досліджуваних факторів, виконано постулювання регресійних моделей з подальшим встановленням ряду закономірностей формування струминно-лазерного потоку.

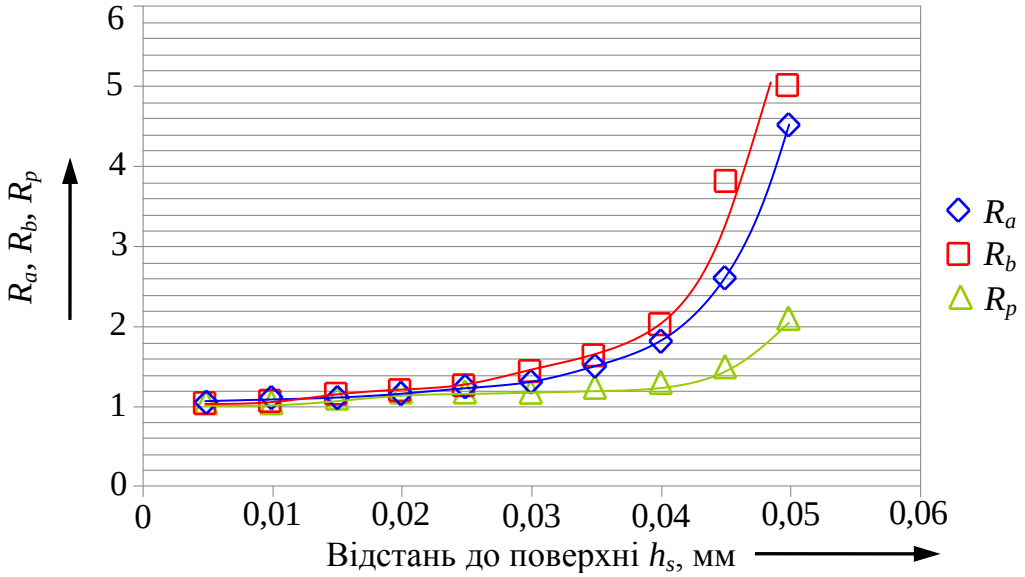


Рис. 8. Зміна параметрів R_a, R_b, R_p форми отворів на поверхні натікання у функції h_s

Базуючись на принципах подібності модовості розподілу пучка ОКГ для визначення впливу умов витікання рідини із соплового насадку на максимальну потужність випромінювання, впливу геометричних параметрів потоку на розсіювання випромінювання за перетином, а також визначення впливу умов сполучення струменя рідини із струминного сопла параметри розподілу інтенсивності за перетином струменя у площині його натікання на оброблювану поверхню запропоновано оригінальний дослідний стенд, побудований на основі низькопотужного лазеру ($Nd:YVO_4$), модовість та розподіл інтенсивності випромінювання якого відповідає Nd:Yag лазеру, використовуваному в промисловості.

Особливістю даного стенду є можливість фіксаації картин розподілу випромінювання на поверхні натікання фотоелектронним пристроєм за рахунок додаткової оптичної системи у ванні, що сприймає натікаючий потік із змінними сопловими насадками. Пристрій також дозволяє: визначати витратні характеристики використовуваних сопел для розрахунку числа Рейнольдса; використовувати насадки із різними конфігураціями профілю каналу і, відповідно, коефіцієнтами витрати рідини μ; формувати перерізи струменя кільцевими соплами заданого перетину, достатнім для спостереження без застосування спеціальної оптичної системи і збільшуваної апаратури; змінювати висоту струменя – параметр l_s, а також регулювати точку введення сфокусованого лазерного випромінювання за відстанню l_0; вести візуальний контроль і фіксацію конфігурації струменя і його відбитка.

При вимірюванні світлового потоку в струмені рідини з використанням сопел різного поперечного перерізу використовували аналогово-цифровий перетворювач m-DAQ, фоторезисторний місток, побудований на ФСД-1, еспанзомат AQUAPRESS AFC24SBA, джерело лазерного випромінювання BGP-3010 (532nm, 100mW), детурбулізатор; картини розподілу випромінювання фіксували матрицею фотоапарата Canon PowerShot A110.

Зняття характеристик розподілу випромінювання у потоці за інтенсивністю I визначення величин I_{max} та I_{min} виконували вавтоматичному режимі вимірювальним комплексом, побудованим на базі АЦП і здатним фіксувати і вимірювати просторовий розподіл випромінювання за перерізом.

Струминно-лазерний вплив здійснювали на поліметилметакрилат (оргскло). З урахуванням його оптичних властивостей (прозорість) в процесі експерименту

реєструвалася не тільки величина світлового потоку джерела лазерного випромінювання, а і конфігурація світлового відбитка струменя.

Отримання відповідних регресійних моделей здійснене на основі повних факторних планів для багатофакторного аналізу. Незалежним вимірюваним параметром обрано число Рейнольдса Re. При проведенні досліджень отримували залежності відносної інтенсивності I/I_{max} випромінювання у функції числа Рейнольдса Re для певних перетинів сопла:

– для круглого $I/I_{мах} = 0{,}4811 + 2{,}6926\cdot10^{-4}\cdot Re - 7{,}9704\cdot10^{-8}\cdot Re^2$; (3)

– для еліптичного $I/I_{мах} = 0{,}74551 - 8{,}0024\cdot10^{-5}\cdot Re - 1{,}7399\cdot10^{-9}\cdot Re^2$; (4)

– для квадратного $I/I_{мах} = 0{,}8481 - 5{,}8901\cdot10^{-5}\cdot Re - 1{,}3908\cdot10^{-8}\cdot Re^2$. (5)

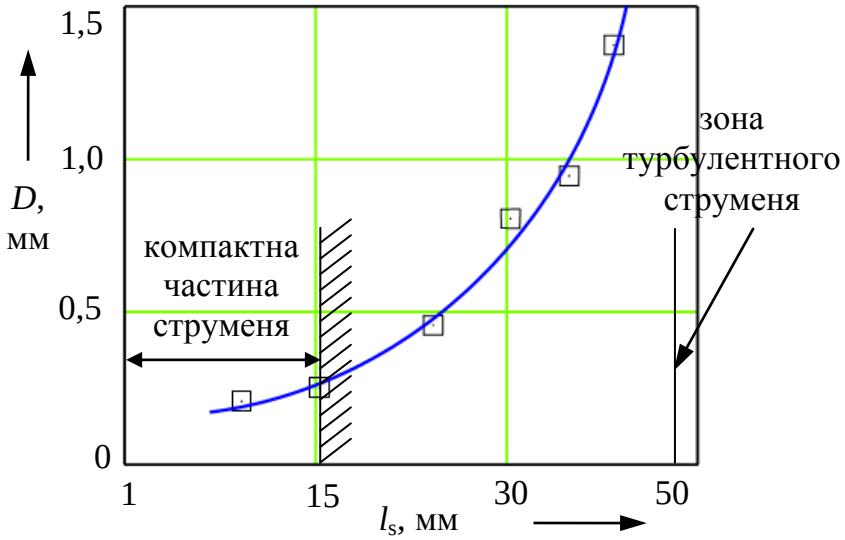
Також встановлено вплив параметрів перетину струменя (величини півосей A та B, мм) на мінімальне значення інтенсивності на границі дії:

$$I_{min} = 0{,}2255 - 0{,}0107\cdot A - 0{,}0171\cdot B + 0{,}0022\cdot S - 1{,}42\cdot10^{-5}\cdot \mathrm{Re}. \quad (6)$$

де S – відстань між перетяжкою каустики на фокусі та поверхнею натікання струменя, мм.

Встановлено, що на інтенсивність випромінювання та його розподіл за плямою контакту впливає відстань l між точкою введення променя лазера в струмінь рідини та поверхнею натікання струменя.

При цьому прийнято до уваги, що при збільшенні вільної частини струменя його діаметр зростає (рис. 9). При цьому має місце вирівнювання інтенсивності випромінювання за перетином струменя, що доводить раніше зроблений висновок про можливість перерозподілення інтенсивності випромінювання ОКГ струминним потоком. У той же час раціональна відстань від зрізу сопла до поверхні обробки має становити l=(15…25)D_{max}, де D_{max} – максимальний діаметр сопла.



– дані, отримані в результаті натурного експерименту

Рис. 9. Залежність діаметра від довжини струменя рідини

В четвертому розділі приведені експериментальні дослідження на діючому промисловому обладнанні. Їх результати підтверджують достовірність сформульованих теоретичних посилок. Також встановлено вплив технологічних факторів, зокрема, потужності та кількості імпульсів ОКГ, витрати рідини, форми та профілю сопла на параметри отримуваного отвору.

Дослідження форми та точності отворів проводили 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 лазеру – 65 Гц.

Безпосередньо перфорування заготовок для гофронабора авіаційно-космічних стільникових панелей з алюмінієво-магнієвої фольги здійснювалося на лазерно-струминному комплексі ЛСК-400-5, а механічні властивості перфорованої фольги досліджувалися на універсальній випробувальній машині УМЕ-10, з використанням тензодатчика KELI DEG 50 кг, АЦП m-DAQ. Дослідження форми отворів і дефектної зони здійснювалося на електронному растровому мікроскопі РЕМ-106І. Для перфорування використовували алюміній-магнієву фольгу АМг2-Н товщиною 55 мкм.

Обробку листової заготовки з фольги АМг2-Н товщиною 55 мкм піддали перфоруванню з такими режимами: потужність лазера – 200 Вт, частота проходження імпульсів – 50 і 75 Гц, швидкість скануючої подачі – 15,0-30,0 м/хв, крок отворів перфорації – 5,0–10,0 мм, встановлений діаметр отворів – 0,1 мм, 0,35 мм і 0,7 мм (відповідно до використовуваних сопловими насадками). Перевірка можливості формування профільного отвору виконувалася на заготовці з нержавіючої сталі марки 12Х17 товщиною 1,2 мм. Час прошивання – 0,5 с. Рідина – вода деаерована, деіонізована, подавалася в робочу зону з витратою 0,003-0,05 дм^3/с. Діаметр сопла відповідав діаметру одержуваного отвору.

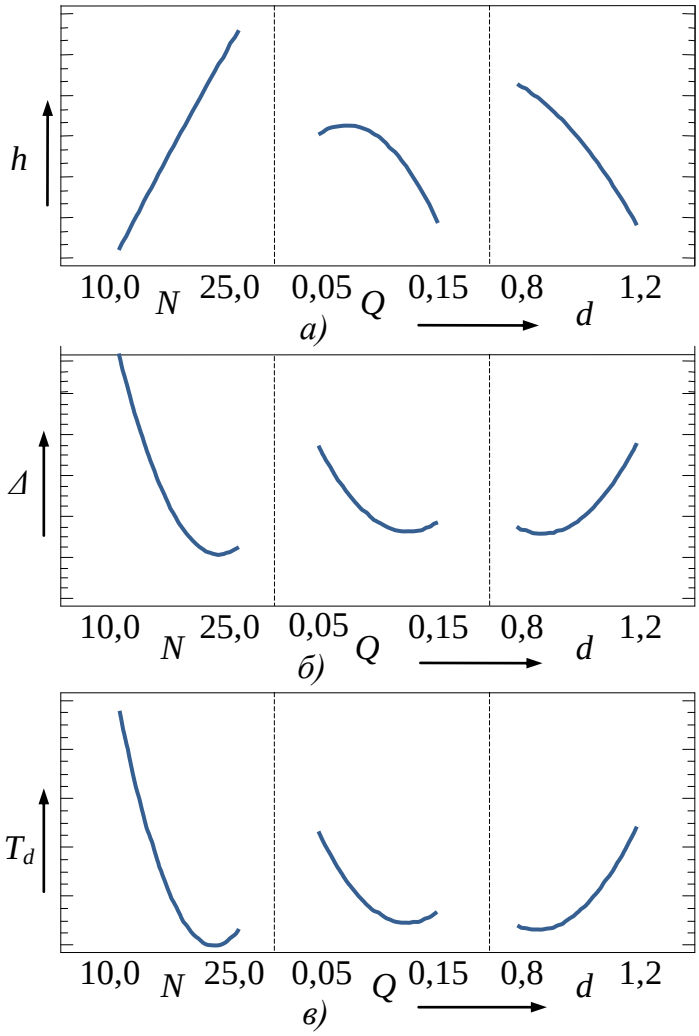
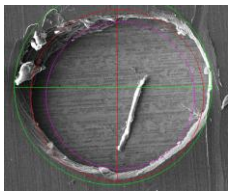
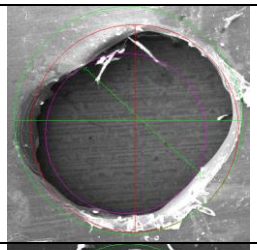
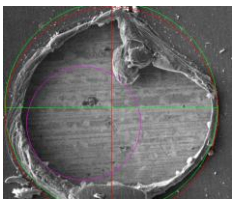
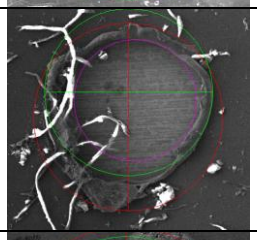
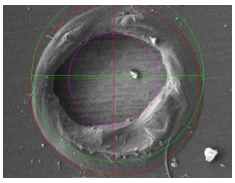
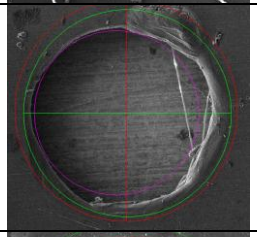
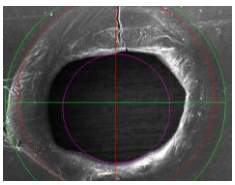
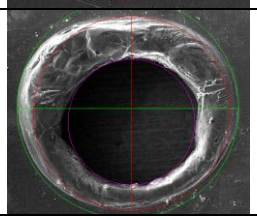
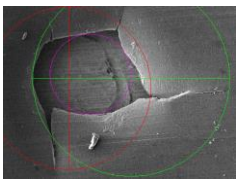
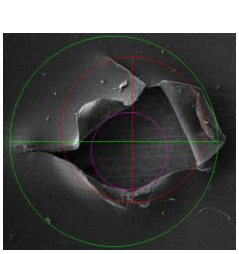


Рис. 10. Головні ефекти зростання глибини лунки h, мм (*а*), відхилення від округлості отвору Δ (*б*) і зміни товщини дефектного шару T_d, мм (*в*) у функції N, Q, d

Для механічних випробувань з обробленої заготовки вирізали зразки розмірами 30×35 мм, які вклеювалися в державки відповідно до методики випробувань. При цьому проводили випробування зразків, отриманих різними методами: механічним прошиванням індентором (МС), та іншими способами: Л, ЛП, ЛПВ та СЛП.

Для інженерної практики особливе значення має встановлення закономірностей розвитку лунки у часі від дії струминно-лазерного потоку (рис. 10), що володіє певними енергетичними характеристиками. Згідно з приведеним вище, встановлення глибини лунки h, похибки форми Δ та ширини деструктивної зони T_d для конкретних матеріалів у функції технологічних режимів обробки, зокрема, кількості імпульсів N для певної потужності імпульсу (його тривалості при генеруванні визначеної енергії), витрати технологічної рідини та діаметра (і форми) отримуваного отвору (за максимальним розміром) d_{max} може бути вирішена отриманням відповідних регресійних рівнянь (7 – 9).

Таблиця 1 – Порівняння точності і якості отворів, одержуваних різними методами

Метод		Мікрофотографії	Геометрична характеристика: dy_{max}, dx_{max}, d_{min}, мм	Геометрична характеристика: d_c, σ_d	Метод		Мікрофотографії	Геометрична характеристика: dy_{max}, dx_{max}, d_{min}, мм	Геометрична характеристика: d_c, σ_d
Лазер з продувкою	Лицьова сторона		dy_{max} = 0,6649 dx_{max} =0,7606 d_{min} = 0,5718	d_c = 0,6662 σ_d = 0,0945	Вода + лазер з продувкою	Лицьова сторона		dy_{max} = 0,8535 dx_{max} =0,9382 d_{min} = 0,6597	d_c = 0,799 σ_d = 0,1392
	Тильна сторона		dy_{max} = 0,7548 dx_{max} =0,7541 d_{min} = 0,4035	d_c = 0,5792 σ_d = 0,1758		Тильна сторона		dy_{max} = 0,984 dx_{max} =0,8751 d_{min} = 0,6373	d_c = 0,8107 σ_d = 0,1734
Лазер без продувки	Лицьова сторона		dy_{max} = 0,716 dx_{max} =0,7135 d_{min} = 0,3699	d_c = 0,543 σ_d = 0,1731	Струминно-лазерне прошивання	Лицьова сторона		dy_{max} = 0,81 dx_{max} =0,7552 d_{min} = 0,5985	d_c = 0,7043 σ_d = 0,1059
	Тильна сторона		dy_{max} = 0,6356 dx_{max} =0,7101 d_{min} = 0,3452	d_c = 0,5277 σ_d = 0,1824		Тильна сторона		dy_{max} = 0,7638 dx_{max} =0,8638 d_{min} = 0,4937	d_c = 0,6788 σ_d = 0,1851
Механічний метод (голкою)	Лицьова сторона		dy_{max} = 0,6437 dx_{max} =0,7709 d_{min} = 0,3167	d_c = 0,5438 σ_d = 0,2271	Примітка: $SS=\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_i}(y_{ij}-\bar{y}_{..})^2$ – сума квадратів відхилень усієї кількості N спостережень від їх загального середнього значення; $SS_A=\sum_{i=1}^{p}n_i(\bar{y}_{i.}-\bar{y}_{..})^2$ – сума квадратів відхилень середніх значень по рядкам від загального середнього значення; $SS_E=\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n_j}(y_{ij}-\bar{y}_{i.})^2$ – сума квадратів відхилень результатів дослідів від середнього значення відповідного спостереження, або остаточна сума квадратів; ступені свободи становлять $f=N-1=\sum_{i=1}^{p}n_i-1$ для SS, $f_a=p-1$ для SS_A та $f_e=N-p=\sum_{i=1}^{p}n_i-p$ для SS_E				
	Тильна сторона		dy_{max} = 0,9287 dx_{max} =0,6413 d_{min} = 0,3409	d_c = 0,6348 σ_d = 0,294					

Оскільки номенклатура матеріалів які використовуються в конструкціях стільникових панелей аерокосмічних апаратів обмежена, з метою спрощення моделей додаткові параметри, теплоємкість, температуропровідність, коефіцієнт відбиття враховуватися не будуть, а моделі будуть отримані для конкретного матеріалу.

Мікроелектронне дослідження точності отримання форми отвору, величини зон термодеструкції і наявності концентраторів напружень показало наступне. Найбільш точно виконані отвори саме струминно-лазерним методом (табл. 1): при заданому діаметрі 0,070 мм реально отриманий розмір коливався в межах 0,067-0,071 мм, що є досить точним і відтвореним результатом. З інших способів одержання отворів видно, що отвори отримуються з великим розкидом значень в межах 0,63-0,75 мм. Найбільш неточними можна вважати отвори, отримані механічним проколюванням, – усереднений діаметр змінюється в межах від 0,64 мм до 0,97 мм.

Для аналізованих параметрів N (кількість імпульсів), Q (витрата рідини, см^3/с), d (діаметр струменя на поверхні натікання, мм) отримано регресійні рівняння для визначення h, мм, Δ, *мм,* T_d, мм:

$$h = -0{,}0858 + 0{,}0253 \cdot N + 0{,}4678 \cdot Q + 0{,}3757 \cdot d - 3{,}6619 \cdot 10^{-5} \cdot N^2 - 0{,}0283 \cdot N \cdot Q - 0{,}0104 \cdot N \cdot d - 12{,}1375 \cdot Q^2 + 1{,}8125 \cdot Q \cdot d - 0{,}3167 \cdot d^2 \quad (7)$$

$$\Delta = 1{,}4744 - 0{,}0475 \cdot N - 4{,}5277 \cdot Q - 1{,}424 \cdot d + 1{,}2291 \cdot 10^{-3} \cdot N^2 + 0{,}02 \cdot N \cdot Q - 0{,}01 \cdot N \cdot d + 14{,}7141 \cdot Q^2 + 0{,}5 \cdot Q \cdot d + 0{,}8754 \cdot d^2 \quad (8)$$

$$Td = 0{,}5569 - 0{,}0193 \cdot N - 1{,}9069 \cdot Q - 0{,}4481 \cdot d + 6{,}7611 \cdot 10^{-4} \cdot N^2 + 0{,}0133 \cdot N \cdot Q - 0{,}0117 \cdot N \cdot d + 6{,}7271 \cdot Q^2 + 0{,}0 \cdot Q \cdot d + 0{,}3762 \cdot d^2 \quad (9)$$

Також встановлено, що отримані механічним способом (МС) отвори мають значні розриви, нерідко перевищують діаметр самого отвору, а кромки деформовані. Таким чином, при механічному проколюванні отворів ширина деструктивної зони може досягати 0,45–0,55 мм.

Таким чином, проведені дослідження показали, що найбільш точно і з мінімальним відхиленням від заданої форми вдається відтворити отвори струминно-лазерним методом, який також дозволяє виключити значний оплавлений шар на торці і мікротріщини, присутні в шарі при реалізації інших методів обробки.

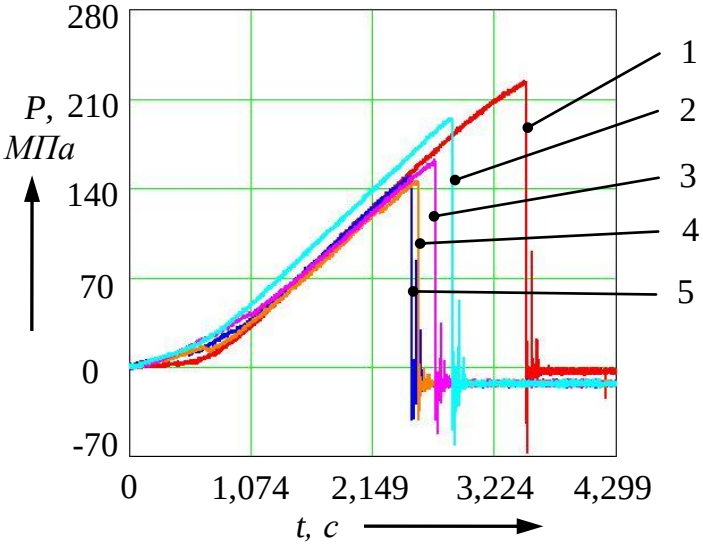


Рис. 11. Результати експериментів по розриву зразків з фольги АМг2-Н. Методи виконання перфорації: 1 – струминно-лазерний (СЛП); 2 – механічним проколюванням (МС); 3 – лазером через шар води (ЛПВ); 4 – лазером з продувкою (ЛП); 5 – лазером без продувки (Л)

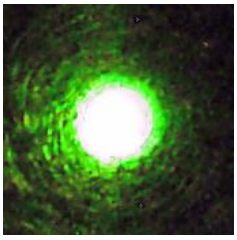
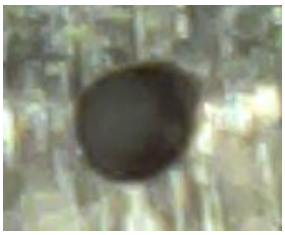
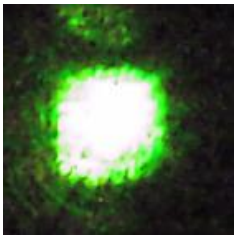
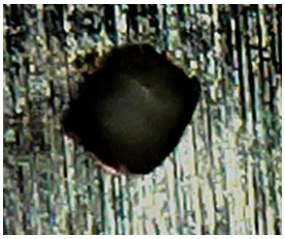
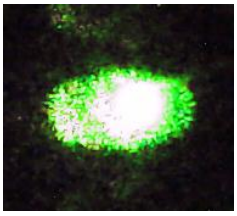
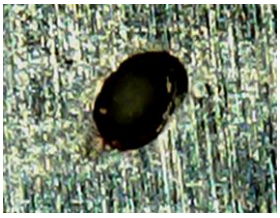
Аналіз результатів залежності часу до руйнування зразка від прикладеного навантаження по перфораційній лінії показав наступне (рис. 11). Зразок з алюміній-магнієвої фольги, оброблений СЛП (струминно-лазерна перфорація), витримує навантаження на розтягнення, більші на 12% в порівнянні зі зразками, отриманими МС і на 20-35% – іншими способами (ЛП, ЛПВ, Л).

Встановлено, що тривалість опору зразка, отриманого СЛП, діючому навантаженню (з моменту початку зростання напружень до

моменту руйнування) значно перевищує аналогічні показники інших зразків (для окремих зразків – на третину), що свідчить про практично незмінну плинність зразка до і після перфорування. Отримані результати володіли статистичною значимістю, контрольовані параметри підпорядковувалися кривій Гауса. Це дало можливість встановити усереднене критичне напруження, при якому відбувалося руйнування зразків, а також визначити відносне подовження зразка до руйнування. Так, відносне видовження перфорованого зразка склало 14%, а межа міцності при цьому знизилася менш ніж 36,5 МПа і склала 228,5 МПа.

Становлять особливий інтерес також і результати профілювання струменя з метою отримання отворів форм, відмінних від круглих (табл. 2). Показано, що чим більше режим руху рідини відповідає ламінарному, тим краще якість одержуваного отвору, менші дефекти поверхневих шарів і менше відхилення від очікуваної форми. Однак такі отвори потребують профілювання за кілька імпульсів ОКГ.

Таблиця 2 – Порівняння картин розподілу випромінювання по перетину і отриманих отворів на дослідних зразках

№	Тип профілю, розміри плями	Мікрофотографія	Отвір, отриманий на ЛСК-400-5
1	Окружність, D_0=2,25 мм Dn=2,55…2,67 мм		
2	Квадрат, $L\times B$ 2,5×2,5 мм Dn=2,65×2,71 мм		
3	Еліпс, $A\times B$ 2,5×3,5 мм Dn=2,6×3,4 мм		

В результаті проведених досліджень обґрунтовано доцільність застосування струминно-лазерного методу для перфорування листових заготовок і обґрунтована ефективність застосування запатентованої системи формування струминно-лазерного потоку. Проведення досліджень з використанням стенду для оцінки розподілу інтенсивності випромінювання по перетину струменя дозволило встановити можливість отримання профільних отворів малого діаметру (до 2,0 мм) за рахунок зміни форми струменя, що важливо при виконанні перфорації наповнювача в малорозмірних стільникових системах. Отримані результати були покладені в основу створення спеціальних струменевих насадок для виконання операцій на діючому

обладнанні лазером з довжиною хвилі 1062 нм. Крім того, проведені дослідження дозволили порівняти температурні поля, що формуються різними способами впливу на оброблювану заготовку (Л, ЛП, СЛП, ЛПВ). Використання засобів растрової електронної мікроскопії дало можливість провести детальне вивчення мікрогеометричних параметрів одержуваних отворів і зв'язати показники якості отворів (в тому числі, і зону оплавлення торця) з режимами обробки.

Застосування аналого-цифрових перетворювачів типу m-DAQ дозволило в режимі реального часу провести випробування зразків з отриманою перфорацією і визначити показники міцності і відносного подовження з мінімальною похибкою.

Отже, можна вважати, що представлений комплекс експериментального обладнання дозволяє максимально точно і з мінімальними витратами часу довести теоретичні положення про доцільність застосування СЛП у виробництві і визначити шляхи подальшого вдосконалення процесу.

В **п'ятому розділі** представлена розробка нового технічного пристрою для струминно-лазерного перфорування. В основу розробленої моделі головки для струминно-лазерної обробки закладено використання кільцевого сопла. Одним з основних елементів даної конструкції є використання механізму, збудованому за принципом роботи щілинного золотника кільцевого типу, що дозволяє регулювати кількість рідини, яка витікає з сопла, та впливати на течію потоку при формуванні струменя. При подачі рідини до кільцевого сопла можливо вибрати один з шести варіантів підводу рідини.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення важливої науково-технічної задачі з отримання отворів перфорації в стільникових конструкціях засобами струминно-лазерного впливу, направлене на підвищення точності форми отворів, зменшення дефектного шару і зниження концентраторів напружень при перфоруванні тонколистових заготовок. Розв'язок цієї задачі базується на аналізі процесів взаємодії двох потоків – струминного і лазерного та на виявленні умов забезпечення мінімальної деструкції шарів оброблюваного матеріалу. На основі функціонального підходу запропоновано нове технічне рішення пристрою для виконання отворів у тонколистових заготовках токопровідної групи наповнювача стільникових панелей.

За результатами дисертаційної роботи сформульовано такі висновки:

1. Розроблено фізичну та математичну модель взаємодії струминно-лазерного потоку з тонколистовою заготовкою та показано, що задовільну точність розв'язку теплової задачі можна отримати на основі врахування точкового тепловідведення у зоні термічного впливу за умови, що розподіл інтенсивності підведення тепла за перерізом струменя наближається до рівномірного, незалежно від форми перетину.

2. В результаті математичного моделювання течії рідини в сопловому насадку визначено розподіл інтенсивності випромінювання і температурні поля на оброблюваній поверхні, що дозволило зробити висновок про можливість отримання профільних отворів (діаметром до 2,0 мм) за рахунок зміни перерізу потоку рідини.

3. Показано, що існує певна відстань від зрізу сопла до поверхні обробки, де втрати потужності є мінімальними, і, відповідно, продуктивність обробки буде найбільшою. Для отворів сопла 0,5-2,0 мм ця відстань становить 25-40 мм, тобто 50-60 d_s, що збігається із довжиною компактної частини струменя. У цьому перетині зміна положення осей потоку і променя найменше позначаються на зміні гістограми.

Крім того, встановлено, що за вказаним критичним перетином відбувається вирівнювання інтенсивності випромінювання по струменю до 85-90%, незважаючи на часткову втрату потужності променя ОКГ.

4. Запропоновано оригінальний безвіконний пристрій для сполучення променя оптичного квантового генератора (ОКГ) із струменем рідини, показано, що використання кільцевих сопел із змиканням потоку в за сопловому просторі знімає обмеження щодо рівня тиску рідини у камері струминно-променевого пристрою, у той же час режим течії рідини безпосередньо впливає на розподіл інтенсивності випромінювання за перетином струменя, тобто на рівномірність випромінювання впливає число Рейнольдса *Re* сформованого потоку.

5. Розроблено оригінальну методику дослідження явищ сполучення променя ОКГ із струменем рідини, що базується на використанні низькопотужного лазеру з модовістю, яка відповідає модовості потужного промислового ОКГ. Зняття картин розподілу випромінювання здійснене за допомогою ПЗС-пристроїв із автоматичною фіксацією картин за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП).

6. Встановлено, що точність форми отримуваного отвору визначається як кількістю імпульсів впливу, так і витратою рідини та діаметром струминного пристрою, причому вплив цих чинників є нелінійним; найбільш точно та з мінімальним деструктивним шаром у тонких фольгах (до 100 мкм) отвір формується за 5-7 імпульсів, причому більша відмінність отвору від кругу обумовлює більшу кількість імпульсів, а енергія імпульсів складає до 25 Дж. Форма отвору за перетином матеріалу функціонально обумовлюється режимами течії струминного потоку, і для діаметрів не більше 2,0 мм залишається сталою на глибині до 0,8 мм.

7. Отримано регресійні рівняння залежності розсіювання випромінювання залежно від довжини струменя, його форми, режимів витікання рідини із соплового насадку та показано, що вплив зазначених параметрів при формуванні отворів методом копіювання, на товщину дефектного шару є нелінійним, із вираженим екстремумом, що пояснюється умовами сполучення променя зі струминним потоком.

8. Проведено мікроелектронне дослідження форми і дефектів одержуваних отворів, виконано механічне випробування зразків і показано, що зразки з перфорацією, що отримані за допомогою СЛП, мають максимальну міцність на розрив, дещо меншу в порівнянні з міцністю вихідного матеріалу (265 МПа). У порівнянні з традиційно використовуваним в промисловості МС міцність вище на 14% і обумовлюється локалізованою дефектною зоною і відсутністю інших концентраторів напружень. Інші лазерні методи, зокрема, Л, ЛПВ, ЛП показали нижчу міцність зразків (на 20 – 35%), що пояснюється більш широкою зоною ушкодження як наслідку явищ у пограничних шарах.

9. Розроблено інженерну методику розрахунку режимів ведення обробки, надані рекомендації щодо використання струминно-променевих головок із сопловими пристроями кільцевого типу, розроблене нове технічне рішення головки із регульованою протоковою частиною, що дозволяє використовувати сопла діаметром 0,1 – 2,4 мм, забезпечуючи при цьому режим руху рідини в межах числа Рейнольдса Re 500 – 2500.

10. Впровадження методу струминно-лазерного прошивання дренажних отворів стільникових панелей не тільки сприяє підвищенню якості виробів, але й сприяє підвищенню конкурентоздатності виробів для яких вони призначаються. Розрахункова економічна ефективність при виготовленні перфорації запропонованним струминно-лазерним методом для 1000 м^2 фольги складатиме 321 тис. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Холодный В.Ю. Применение струйно-лазерного метода обработки для перфорирования сотового заполнителя авиационных сендвич-панелей / В.Ю. Холодный, А.Ф. Саленко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий / Вып. 1/5 (79). – Харьков, 2016. – С. 19-30. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59870 *(входить до міжнародних наукометричних баз «SCOPUS», «Ulrich's Periodicals Directory», «DRIVER», «Bielefeld Academic Search Engine» (BASE), «Index Copernicus», «WorldCat», «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), «Directory of Open Access Journals» (DOAJ), «EBSCO», «ResearchBib», «American Chemical Society», «Electronic Journals Library», «CrossRef», «Open Academic Journals Index» (OAJI), «Sherpa/Romeo»).*

2. Саленко О.Ф. Підвищення ефективності процесу лазерно-струминного перфорування листових заготовок профільним потоком / О.Ф. Саленко, В.Ю. Холодний, С.Н. Коваленко, Ю.О. Павлюченко // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідравліка і пневматика»./ Вип. №3(49). – Вінниця: Вінницький національний аграрний університет, Асоціація спеціалістів промислової гідравліки і пневматики, 2015. – С. 44-53. (*входить до міжнародних наукометричних баз Referativnyi Zhurnal VINITI, «ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY»*).

3. Salenko A.F. Removal of the defective layer and stresses hubs during microprocessing of of rolled thin sheet specimens of metal cellular panels / A.F. Salenko, V.Y. Kholodnyi, G.V. Gabuzian // Journal of the Technical University of Gabrovo./ Vol. 52. – Gabrovo: Университетско издателство Габрово, 2015. – pp. 8-12.

4. Salenko A. Changing the spot of local destruction of samples at water jet guided laser processing with appropriate profiling jet / A. Salenko, V. Kholodnyi // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія "Машинобудування"./ Вип. №73. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – С. 57-64. (*входить до міжнародних наукометричних баз «Google Scholar», «РІНЦ», «DOAJ», «CiteFactor»*).

5. Холодний В.Ю. О формировании профильной зоны термо-гидродинамического разрушения поверхности образца при струйно-лазерной обработке кольцевым соплом / В.Ю. Холодний // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського./ Вип. 1 частина 2 (90). – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 105-110. (*входить до міжнародних наукометричних баз «Ulrich's Web Global Serials Directory», «eLIBRARY», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services»*).

6. Саленко О.Ф. Отримання тестових різів у виробах із надміцних матеріалів «холодним» і «гарячим» методами / О.Ф. Саленко, В.О. Дудюк, О.М. Мана, С.В. Шкель, Є.С. Коваль, В.Ю. Холодний, Є.Є. Лашко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського./ Вип. 6 (89). – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 86-95. (*входить до міжнародних наукометричних баз «Ulrich's Web Global Serials Directory», «eLIBRARY», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services»*).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Саленко О.Ф. Можливості зміни форми зони різу струминно-лазерними засобами / О.Ф. Саленко, В.Ю. Холодний, Г.В. Габузян // International Scientific-Methodological Conference «How to teach material sciences: new approaches and experiences from the MMATENG project». – Krakow: Politechnika Krakowska, 2015. – P. 177-181.

8. Холодний В.Ю. Вплив умов витікання струменя на розсіювання потужності випромінювання у плямі на поверхні обробки / В.Ю. Холодний, Є.С. Коваль, О.Ф. Саленко // XX Міжнародна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Матеріали конференції. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015 р. – С. 37-39.

9. Дем'яненко О.І. Застосування прототипування в виготовленні елементів обладнання для струминно-променевого різання / О.І. Дем'яненко, В.Ю. Холодний, В.Т. Щетинін // XXII Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства». Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 104-105.

10. Холодний В.Ю. Перспективи використання лазерно-струминного методу для прошивання отворів у звукопоглинаючих панелях / В.Ю. Холодний, Є.С. Коваль, А.О. Нестеренко, В.М. Орел // XV Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта». Матеріали конференції. – Київ: 2014 р. – С. 130-131.

11. Холодный В.Ю. О предварительных результатах анализа исследований профильных отверстий малого размера для процесса струйно-лазерной обработки материалов нетокопроводящей группы / В.Ю. Холодный, А.А. Нестеренко // XXI Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства». Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 126-127.

12. Холодний В.Ю. Про можливості отримання отворів в матеріалах нетокопровідної групи / В.Ю. Холодний // XXII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Тези доповідей. Ч. II – Харків, НТУ «ХПІ», 2014. – С. 62.

13. Саленко А. Особенности методики исследования профильных отверстий малого размера для процесса лазено-струйной обработки материалов / А. Саленко, В. Холодный // Unitex – 2013: International scientific conference 22-23 november 2013. – Gabrovo, 2013. – P. III-139 – III-145.

14. Саленко А.Ф. Особености создания насадков с соплами различных конфигураций для экспериментальной установки с целью исследования струйно-лазерного метода обработки материалов / А.Ф. Саленко, В.Ю. Холодный // Міжнародна науково-технічна конференція "Машинобудування – очима молодих". Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2013. – С. 104-107.

15. Холодный В.Ю. Устранение погрешности метода и инструментальной ошибки в исследовании струйно-лазерного метода обработки / В.Ю. Холодный, А.Ф. Саленко // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта». Матеріали конференції. Ч. 1.– Киев: 2013 г.– С. 131-134.

16. Холодный В.Ю. Устранение инструментальной ошибки в исследовании струйно-лазерного метода обработки / В.Ю. Холодный, А.Ю. Лещук, А.Ф. Саленко // XX Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих

учених „Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства”. Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2013.– С. 187-188.

17. Холодный В.Ю. Особенности компоновки лабораторной установки, предназначенной для исследования луча лазера, направленного коаксиально к струе жидкости / В.Ю. Холодный // XI Міжнародна науково-технічна конференція „Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”. Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2012. – С. 190-191.

18. Холодний В.Ю. Лазерно-струйный метод получения профильных отверстий малого размера. Особенности конструкции имитационной установки / В.Ю. Холодний, О.Ф. Саленко // XII Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція „Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво”. Тези доповідей. – Київ: НТУУ „КПІ”, 2012. – С. 115-116.

19. Холодний В.Ю. Можливості лазерно-струминної обробки та формування профільного струминно-променевого потоку / В.Ю. Холодний, О.Ф. Саленко // XVIII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Тези доповідей. – Кременчук: КрНУ, 2011. – С. 369.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

20. Холодный В.Ю. Повышение эффективности процесса струйно-лазерного перфорирования листовых заготовок профилированным потоком / В.Ю. Холодный, С.В. Коваленко, Ю.А. Павлюченко, Г.В. Габузян, А.Ф. Саленко // Вісник двигунобудування./ Вип. 1. – Запоріжжя: АТ «Мотор Січ», 2015. – С. 106-113. (*входить до міжнародних наукометричних баз «INSPEC», «Index Copernicus»*).

21. Пат. 63732 U Україна, МПК B24B 41/00. Пристрій для виконання струминно-променевої обробки матеріалів / Саленко О. Ф., Дудюк В. О., Холодний В. Ю.; заявник і патентотримач Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. u 201015758; заявл. 27.10.2010; опубл. 25.10.2011, бюл. №20, 2011 р.

АНОТАЦІЯ

Холодний В.Ю. Отримання отворів перфорації в стільникових конструкціях засобами струминно-лазерного впливу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки, Кіровоградський національний технічний університет, Кропивницький, 2016 р.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі отримання отворів перфорації малого діаметра (d = 0,1–2,0 мм) циліндричної або профільної форми струминно-лазерним методом. Науково обґрунтована гіпотеза щодо можливості отримання методом копіювання отворів потрібної форми у тонких заготовках за рахунок зміни перетину струменя. Розроблено математичні моделі формування високоенергетичного потоку зі сполученим лазерним променем з довжиною хвилі 1062 нм. Отримано картини розподілу інтенсивності випромінювання в площині оброблюваної поверхні. Показана залежність перерозподілу епюри інтенсивності випромінювання за перетином струменя від умов витікання рідини із соплового насадку.

Запропонована принципово нова конструкція струминно-лазерної головки, яка дозволяє сполучати промінь лазеру за допомогою кільцевого сопла, тим самим

знімаючи обмеження щодо тиску рідини та необхідності використання спеціального прозорого вікна у головці.

Проаналізовано варіанти виконання перфорації в алюміній-магнієвій фользі АМг2-Н товщиною 55 мкм, що використовується для гофронабора авіаційно-космічних стільникових панелей. Показано переваги запропонованого методу в порівнянні з механічним або термічним отриманням отворів. Зроблено аналіз дефектного шару в отворах тонколистових заготовок з визначенням впливу режимів обробки на його формування.

В результаті проведених досліджень також установлено функціональну обумовленість точності форми отримуваних отворів параметрами струминної системи, зокрема, відхиленням точки сполучення променя зі струменем від осі струменя, зміщення фокальної площини відносно центру змикання потоку. дані рекомендації за призначенням режимів перфорування.

Ключові слова: *струминно-лазерний метод, перфорація, дефектний шар, отвір, високоенергетичний потік.*

АННОТАЦИЯ

Холодный В.Ю. Получение отверстий в сотовых конструкциях средствами струйно-лазерного воздействия. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.07. – Процессы физико-технической обработки. Кировоградский национальный технический университет, Кропивницкий, 2016 г.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи получения отверстий перфорации малого диаметра (d=0,1–2,0 мм) цилиндрической или профильной формы струйно-лазерным методом. Научно обоснована гипотеза о целесообразности использования струйно-лазерного потока для получения профильных отверстий в материалах различных типов и толщины. Разработана математическая модель потока жидкости в смесительной камере и сопловом насадке, как некоторого изотропного тела представляющего собой световод для пучка лазерного излучения с длиной волны 1062 нм. Данная модель учитывает влияния геометрических погрешностей изготовления струйно-лазерной головки и формы среза сопла. Получены картины распределения интенсивности излучения на срезе обрабатываемой поверхности, в том числе для заготовок малой толщины (при d>>h). Сделаны выводы о возможности получения профильных отверстий (диаметром до 2,0 мм) за счет изменения сечения потока жидкости. Показано, что существует определенное расстояние от среза сопла до поверхности обработки, где потери мощности будут минимальными, и, соответственно, продуктивность обработки будет наибольшей. В этом пересечении смена положения осей потока и луча менее всего влияют на изменение гистограммы. Кроме того, определено, что за указанным критическим сечением происходит выравнивание интенсивности излучения по струе, независимо на потерю мощности.

Проанализированы варианты выполнения перфорации в алюминий-магниевой фольге АМг2-Н толщиной 55 мкм, используемой для гофронабора авиационно-космических сотовых панелей. Показаны преимущества предложенного метода по сравнению с механическим или термическим получением отверстия. Представлен анализ вариантов и показана целесообразность применения струйно-лазерного метода для перфорирования.

Произведен анализ дефектного слоя в отверстиях тонколистовых заготовок с

определением влияния режимов обработки на его формирование, что обуславливается толщиной дефектного слоя на полученных отверстиях, и определения прочности перфорированного материала заготовок, полученных различными технологическими способами, через испытания образцов на разрыв.

Рациональным подбором частоты следования импульсов и расхода жидкости снижено ширину дефектного слоя на 20-50% и доведено его до толщины 0,035 мм. Интенсивное охлаждение зоны прошивки позволяет также исключить трещинообразование на кромках, тем самым повысить прочность на разрыв до 229 МПА, что приближается к значению прочности материала в состоянии поставки. При этом относительное удлинение остается практически без изменений.

В результате проведенных исследований установлено, что минимизировать отклонение формы прошиваемого отверстия от окружности можно путем юстирования положения точки введения луча струйно-лазерной головки относительно центра смыкания потока, т.е. совмещением осей луча лазера и струи жидкости. Также показано, что использование насадок с профильным срезом (в виде прямоугольника со скругленными углами, овала, треугольника) позволяет получать соответствующие формы отверстий, что весьма важно для изготовления сотовых панелей с апериодическим криволинейным заполнением гофронабором. Даны рекомендации по назначению режимов перфорирования. Обосновано положение о возможности выполнения отверстий различной формы.

Ключевые слова: *струйно-лазерный метод, перфорация, дефектный слой, отверстие, высокоэнергетический поток.*

ANNOTATION

Kholodnyi V.Y. Getting punching holes in cellular constructions by means of water jet guided laser method. – Manuscript.

Dissertation for candidate's of technical science in specialty 05.03.07 – Processes of physical technical processing, Kirovograd National Technical University, Kropivnitskiy, 2016.

Dissertation is devoted to solving actual scientific and technical problem of obtaining perforation holes of small diameter (d = 0,1-2,0 mm) of cylindrical or shape profile using water jet guided laser method. It is scientifically proved the hypothesis about the possibility of getting by copying the desired shape holes in thin workpieces by changing the cross section of the jet. There have been developed mathematical models of forming the high-energy flow with paired laser beam with a wavelength of 1062 nm. It is received the picture of the distribution of radiation intensity in the plane of the workpiece. It is shown the dependence of diagram redistributing of radiation intensity by the intersection of the jet from the conditions of fluid leak from nozzle cap.

Is proposed radically new design of water jet guided laser head, which allows to combine the laser beam using a ring nozzle, thereby removing the restrictions on fluid pressure and necessity of using special transparent window in the head.

It is shown the analysis of options for punching of aluminum foil AMg2-H with thickness of 55 microns, which is used to corrugated set of aerospace cellular panels. There are given the advantages of the proposed method in comparison with mechanical or thermal holes receiving. It was made the analysis of the defect layer in the openings of thin sheet workpieces with determining the influence of processing modes on its formation.

As a result of conducted research it is also established a functional conditionality of form accuracy of received openings by water jet system parameters, including point

deflection of beam connections with jet of the jet axis, displacement of the focal plane relative to the center of the flow closing. It is given the recommendations for mode perforation intention.

Keywords: *water jet guided laser method, perforation, defective layer, hole, a high-energy stream.*

Підписано до друку 7.11.2016. Формат 60×90/16. Папір друкарський.
Гарнітура Times New Roman Cyr. Друк плоский.
Ум. друк. арк. 1.13. Тираж 100 прим. Замовлення № 16409.

Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20 мм. Кременчук, 39600