

УДК 621.115.001

О.Ф. Саленко, д-р техн. наук,
О.В. Фомовська, канд. техн. наук,
В.О. Дулюк,
О.М. Мана

Кременчуцький державний університет ім. М.Остроградського

ПРО ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЛАЗЕРНО-СТРУМИННОГО ВПЛИВУ НА ПОВЕРХНЮ ТВЕРДИХ ТІЛ

Приводятся результаты некоторых исследований струйно-лучевого резания твердых тел с использованием Nd:YAG лазера мощностью 400 Вт с широким диапазоном регулирования длительности импульса и его энергии. Детально проанализировано состояние вопроса, показано влияние высокоскоростного потока жидкости малого диаметра на условия охлаждения в зоне резания. Предложена схема технологической наладки, исключающая использование дорогостоящих струйно-лучевых устройств, показана его эффективность для выполнения операций раскроя листовых заготовок.

In article results of some researches of water-jet guided laser beam cutting of firm bodies with use Nd:YAG laser by capacity 400 W with a wide range of regulation of duration impulse and its energy are resulted. The question condition is in details analyzed; influence of a high-speed stream of a liquid of small diameter on cooling conditions in a cutting zone is shown. The scheme of technological adjustment excluding uses of expensive water-jet guided laser beam devices is offered; its efficiency for performance of operations of cutting sheet preparations is shown.

Вступ

Лазерно-струминна обробка матеріалів — порівняно молодий, недостатньо досліджений, однак перспективний метод керування локального термічно-гідродинамічного впливу, внаслідок якого у поверхневих шарах оброблюваної заготовки відбуваються швидкоплинні процеси термічно-механічної деструкції. У крихких та квазікрихких матеріалах деструкція супроводжується розвитком внутрішніх дефектів та виникненням площин активного розвитку мікротріщин, що робить можливим виконання термічних скрайбувань та термосколювань листових заготовок; у пружних та пружно-пластичних матеріалах деструкція виявляється при виникненні високотемпературних областей зі швидкоплинним відведенням тепла, внаслідок чого матеріал диспергується у вигляді мікрогранул, (для металів — з одночасним фазовим перетворенням диспергованого шламу); деструкція високоеластичних матеріалів проявляється як сублімація з наступним утворенням твердої фази і частковим її розчиненням у охолоджуваній рідині.

Огляд напрацювань у галузі струминно-променевих технологій

Нині система-тизованих відомостей та єдиної теорії лазерно-струминної обробки не існує. Розрізнена інформація зустрічається у низці друкованих праць: [1] — [3], де висвітлюється питання принципу лазерно-струминної обробки (Water Jet-Guided Laser); [5] наведено результати досліджень із можливостей розмірного різання; [7] — обробка пластинок з кремнію; [9] — [12] — різні аспекти використання методу при різанні радіоелектронних матеріалів; [14] — можливості різання надтвердих матеріалів, у

тому числі, кубічного нітриду бору; [16] — принципи та машини, в яких ці принципи реалізовані. Ці роботи не мають фундаментального характеру і не наводять задовільного опису явищ, що відбуваються за такої обробки. Однак наведені у [4], [8] результати дають підстави стверджувати, що даний вид обробки є найбільш перспективним при різанні або при поверхневій обробці ряду матеріалів, для яких інші методи неефективні або неприйнятні взагалі. Особливої актуальності набувають дослідження лазерно-струминної обробки нових конструкційних та інструментальних матеріалів — композитів, функціональних орієнтованих яких вимагає розробки відповідних високоефективних функціонально орієнтованих методів.

Питаннями лазерно-струминної обробки активно займається фірма — науково-дослідницьке підприємство Synova (Synova S.A., Switzerland) [1], [2], [14]. Створенню першої лазерно-струминної системи передували результати дослідів з так званого «світлового фонтаном», демонстрованим у Парижі у 1841 році, який наочно довів можливість руху світла у ламінарному (точніше, близькому до ламінарного) потоці рідини при його відхиленнях внаслідок дії сили земного тяжіння. Дослід був досить простий (рисунок 1). У світлонепроникній камері знаходилася рідина (вода), яка вільно витікала із сонцевого насадку, встановленого у нижній частині камери. У протилежній стінці камери було виконано отвір закритий склом, крізь яке до камери надходило світло. У затемненій кімнаті можна було чітко спостерігати, що, не зважаючи на принципи лінійності розповсюдження променів світла, світлова пляма була саме на екрані кювети, в яку рідина стікала, тобто промінь «згинався» і прямував співосно до руху рідини у струмені, на який діяла сила тяжіння. Власне кажучи, струмінь рідини виявився першим світловодом, у

якому поширення світла відбувалося внаслідок багатократного переломлення та віддзеркалення від оболонки потоку світла.

Повертаючись до цієї ідеї, розробники устаткування для лазерно-струминного різання запропонували систему, яка складалася з таких елементів [5] (рисунок 2а): фокусоючої системи, струминної камери з вікном для введення променя лазера, сопла, генератора когерентного випромінювання (лазера) та системи робочої подачі заготовки. Фокусування випромінювання на зрізі сопла дозволяє уникнути існуючої перетяжки каустики у сфокусованому промені, тобто замість кількох міліметрів робочої зони у лазерній системі мова йде про значно більшу робочу ділянку (рисунок 2б). Отже, різання матеріалу значної товщини тепер не стикатиметься із складнощами, оскільки не виникатиме підрізання променя, інших порушень сталості процесу термічного різання

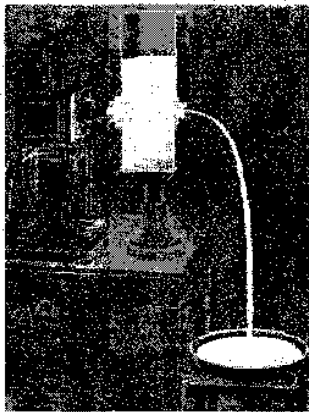


Рисунок 1. Світловий фонтан, демонстрований у Парижі у 1841 р.

Суттєвим недоліком даного способу є те, що струминна камера повинна мати прозоре вікно, до якого підводилося випромінювання лазера. З одного боку, це значно обмежує тиск рідини, з іншого — зменшує енергетичну ефективність самої системи, оскільки будь-яке вікно частково відбиває випромінювання, а гідродинамічні явища у системі «струминна камера — сопло» чинять втрати потужності променя ще більшими.

Нині Sypova S.A., Switzerland пропонує споживачам кілька типорозмірів обладнання для лазерно-струминного різання (рисунок 3) [6]: з робочою зоною від 50x50 мм до 250x250 мм. Переважну більшість таких машин призначено для виконання точного різання пластинок зі скла, кремнію, селену, твердих та надтвердих матеріалів. Фірма активно впроваджує цей метод у радіоелектронну галузь; нині робить спроби освоїти новий сектор ринку — аерокосмічну промисловість, яка потребує розкrojовання та обробки матеріалів теплового захисту космічного корабля (різного роду наповнених теплових екранів) та ін.

За даними [16], метод лазерно-струминного впливу з успіхом використовується і для операцій прецизійного

полірування, зварювання елементів. Однак детальної інформації стосовно режимів ведення обробки нами не виявлено. Відсутнє також і теоретичне підґрунтя, основні розрахункові залежності і математичні моделі, які б дозволили виконувати подальші дослідження у даному напрямку.

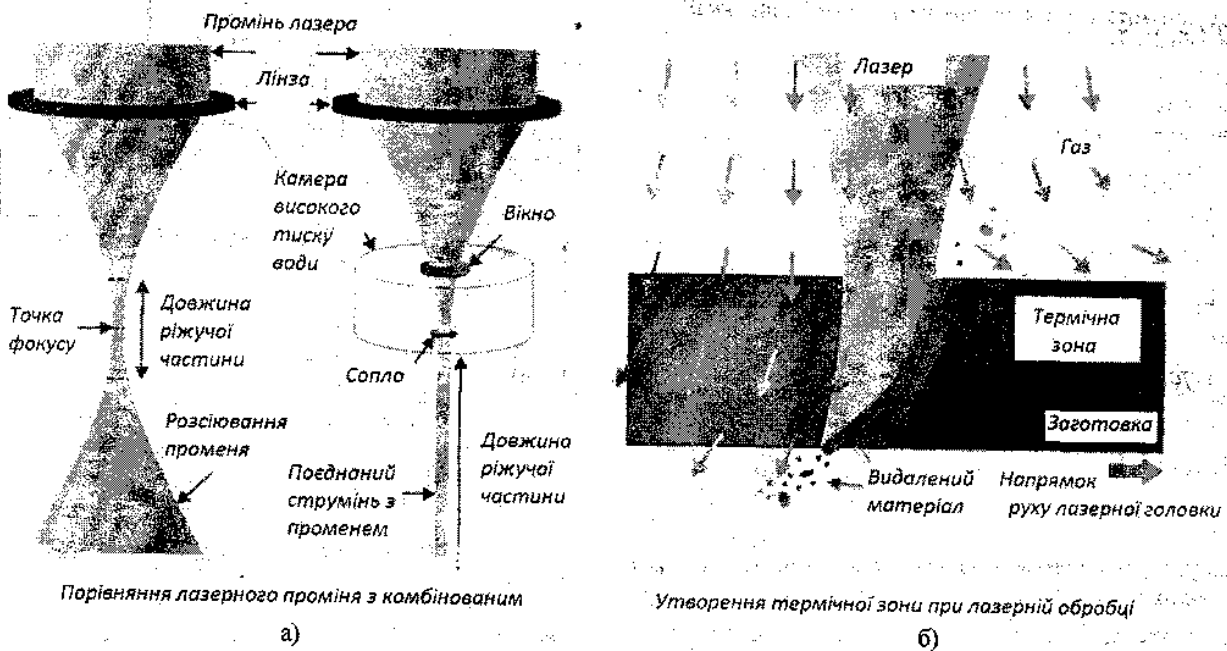
Таким чином, підводячи певні підсумки, можна констатувати, що лазерно-струминна обробка є високоефективним і перспективним методом керованого впливу на матеріали будь-якої структури і складу; високоградієнтне локальне термічне навантаження, залежно від схеми впливу, здатне виконувати як фазово-хімічні перетворення, так і диспергацію матеріалу, локалізовані у мікрообсягах оброблюваного тіла. Однак нині відсутні систематизовані відомості стосовно раціональних умов ведення обробки різних матеріалів, меж ефективного використання даного методу, а також ефектів, на базі яких можливе створення новітніх інтегрованих технологій. Окрім того, виникають питання і щодо пошуку раціональних схем технологічного налагодження, елементів струминно-променевих пристроїв, які б забезпечували подібні ефекти, але при використанні інших елементів (підставою є отримані результати досліджень, проведених нами і висвітлених у роботі [18], де надані окремі варіанти реалізації сполучень струменя рідини з променем лазера.

Мета досліджень: оцінити ефекти керованого лазерно-струминного впливу на поверхні твердих тіл при сполученні струменя рідини високого тиску із променем лазера без складних оптично-струминних пристроїв, виявити можливості зазначених ефектів для реалізації промислових технологій різання.

Основний зміст роботи

Кафедрою процесів і обладнання механічної та фізико-технічної обробки Кременчуцького державного університету у співпраці із Національним технічним університетом України «КПІ» розпочато системні дослідження даного методу на створеному на вітчизняній технічній базі п'ятикоординатному лазерно-струминному комплексі ЛСК-400-5, який дозволяє виконувати операції гідрорізання, гідроабразивного або лазерного розкrojовання, а також виконувати лазерно-струминну обробку оригінальними лазерно-струминними головками.

При розробці принципів струминно-променевого впливу виходили з того, що ефективність лазерно-струминного різання, а також товщина шару активного поливання випромінювання із наступною деструкцією залежать від тиску та умов витікання рідини. Насправді, розглянемо рівняння теплової задачі для випадку натікання рідини із випромінюванням на нормально орієнтовану поверхню при підведенні хладагента безпосередньо до зони лазерного впливу згідно схеми, показаної на рисунку 4. Рівнянням, запропонованим у [17], можна визначити температурні поля у випадку, коли охолоджувач — рідина надвисокого тиску не подається:



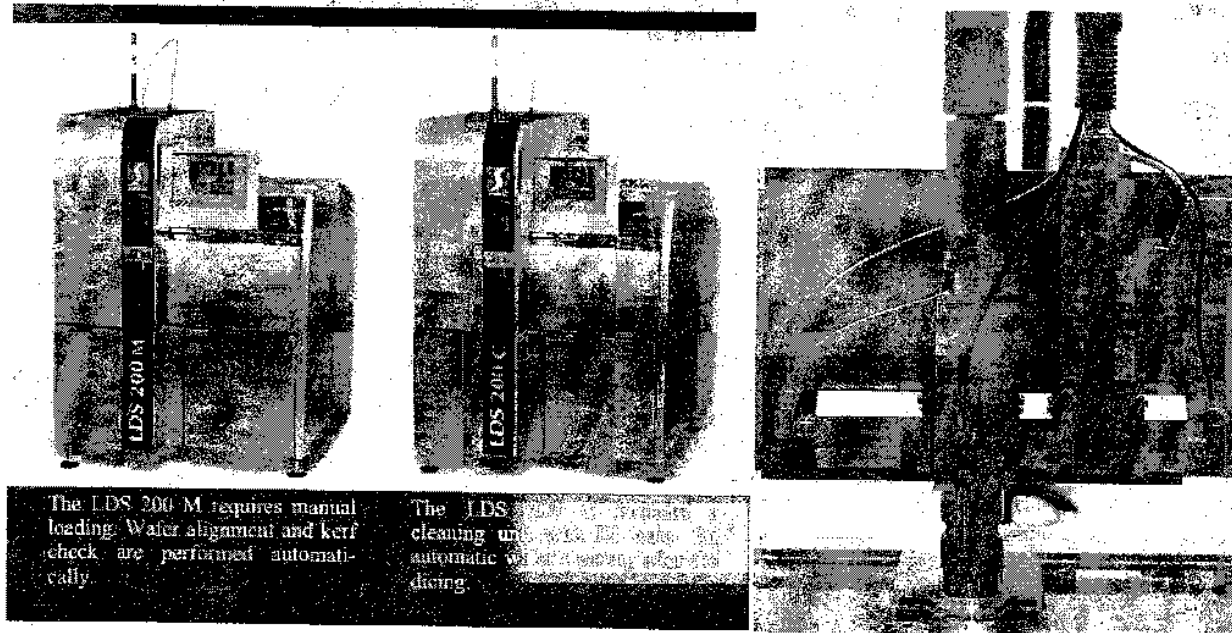
Порівняння лазерного променя з комбінованим

а)

Утворення термічної зони при лазерній обробці

б)

Рисунок 2 — Відмінність традиційного лазерного променя від лазерно-струминного потоку. Струмінь рідини — світловід, який також виконує функцію активного хладагента (за [5]).



The LDS 200 M requires manual loading. Water alignment and kerf check are performed automatically.

The LDS 200 C features automatic water alignment and kerf check.

Рисунок 3 — Типоряд (лінійка) машин для лазерно-струминного різання напівпровідникових пластин [6] та загальний вигляд струминно-променевої головки, яка встановлюється на подані машини. Діаметр отвору струминного сопла — 0,08-0,25 мм, тиск технологічної деіонізованої рідини — 450 бар (біля 42 МПа), потужність променя — 400 Вт, довжина хвилі — 1062 нм, випромінювач — твердотільний Nd:Yag з оптоволоконним підведенням до змішувальної камери.

$$T(x, y, z, t) = \frac{P}{\pi^{\frac{3}{2}} \rho c} \int_0^l \frac{e^{-\frac{(x-v(t-\tau))^2 + y^2}{4a\tau + A^2} - \frac{y^2}{4a\tau + B^2}}}{[(4a\tau + A^2)(4a\tau + B^2)a\tau]^{1/2}} \cdot \left[e^{-\frac{z^2}{4a\tau} - h(\pi a \tau)^{\frac{1}{2}}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2(a\tau)^{\frac{1}{2}}} + h(a\tau)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot e^{hz + h^2 a \tau} \right] d\tau$$

де ρ, c, λ — щільність, питома теплоємність та коефіцієнт теплопровідності матеріалу відповідно; $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ — температуропровідність матеріалу; h — коефіцієнт тепловіддачі з поверхні; A та B — більша та менша напіввісі еліптичного променя; $P = q\pi AB$ — потужність лазерного випромінювача.

Подача рідини надвисокого тиску вимагає врахування крайових умов

$$\rho c \frac{dT}{dt} - \lambda \Delta T = \frac{(1 - R_0)kP}{\pi AB} \exp \left[-2 \left(\frac{(x-v)^2}{a^2} + \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right) \right] \cdot \exp(-kz);$$

$$\lambda \frac{dT}{dz} \Big|_{z=0} = \alpha(T)(T - T_p); T(x, y, z, t) = T_0$$

при апроксимації зростання коефіцієнта тепловіддачі залежністю виду [18]

$$h(T) = h_m \exp \left(-\frac{(T - T_m)^2}{\Delta T^2} \right),$$

що при виконанні числового розв'язку рівняння (1), дасть зону I (рисунок 5) різкого спадання температури у місці підведення охолоджувальної рідини, причому, залежно від витрати охолоджувача та ефективності тепловідведення розподіл температурних полів може мати суттєві відмінності (зона II). Подана ілюстрація дає наочну картину відмінностей у розподілі ізотерм перерізу, паралельному тому, що проходить через вісь променя у напрямку руху робочої рідини.

Оскільки крок побудови становить 0,005 мм, локалізація температури (на ізотермі $T = 600^\circ\text{C}$) може знаходитися у межах 0,04 мм, що для перепаду $\Delta T = 1500^\circ\text{C}$ охопить зону не більшу за 0,1 мм.

Причому збільшення інтенсивності тепловідведення призводить до більшого зниження температури, а отже, і до зменшення розмірів ділянки, охопленої термічним впливом.

Таким чином, лазерно-струминне руйнування матеріалу відбуватиметься у локальній (не більше за 0,1–0,15 мм) зоні, що значно менше як за зону гідродинамічного, так і термічного впливів [18].

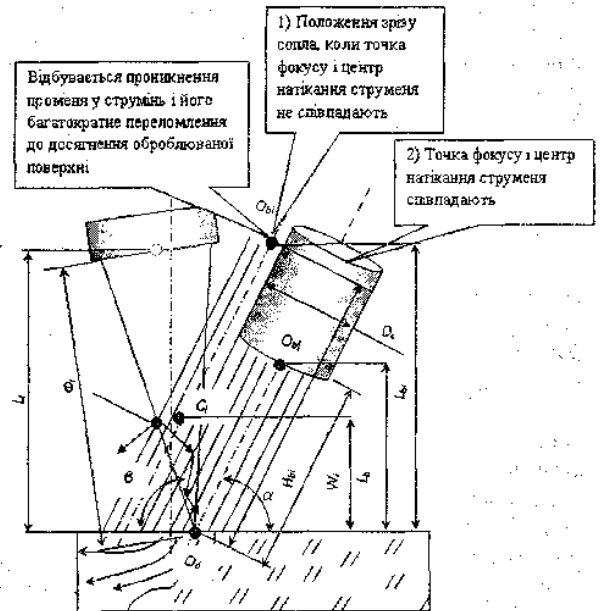


Рисунок 4 — Взвездія лазерно-струминного потоку з дослідним зразком при боковому введенні променя.

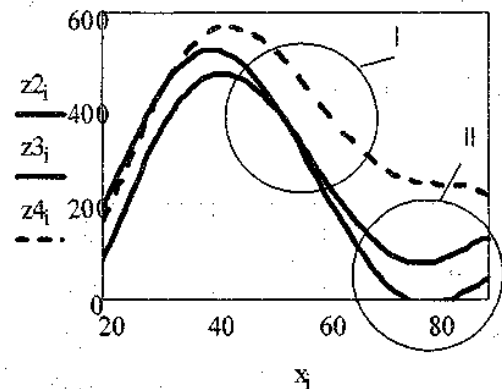
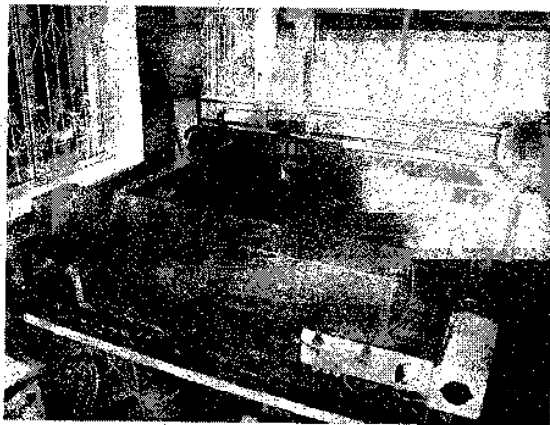
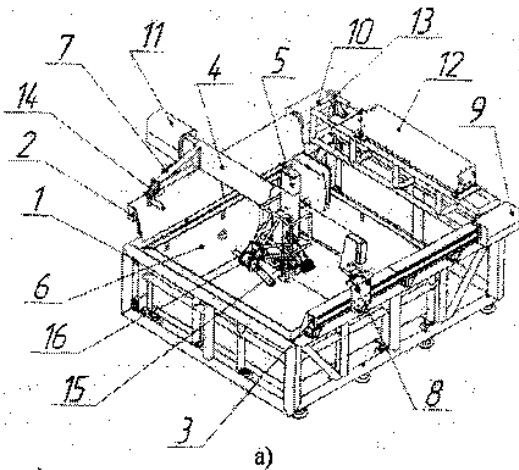


Рисунок 5 — Гіпотетичний розподіл температури $T(x, z)$ за перетином, паралельним осі лазера та таким, що знаходиться на відстані $l = 1,5d_0$; z_2 — робота із тиском до 50 МПа; z_3 — збільшення тиску витікання рідини до 100 МПа непряме натикання струменя; z_4 — без надання хладагенту.

Оскільки бокове введення променя у швидкоплинний струмінь є найпростішим і не вимагає спеціального коштовного устаткування, а окремі роботи [20, 21] свідчать і про керованість циклів термічного навантаження поверхні навіть на відстані 3–5 d_0 , на етапі попередніх досліджень саме ця схема була обрана за базу. При цьому з метою вивчення ступеня впливу параметрів технологічної системи на параметри борозенки різа напрям подачі завдавали перпендикулярним до площини, яку утворювали осі променя і струменя.



б)

Рисунок 6 — Компонування дослідницького обладнання ЛСК-400-5 (а) та його фото (б): 1 — несуча система; 2,3 — балки поздовжнього переміщення (Y-координати); 4 — балка поперечного переміщення (X-координати); 5 — балка вертикального переміщення (Z-координати); 6 — водоприймач; 7 — система «летючої оптики» твердотільного лазера; 8 — каретка силового привода; 9,10,11 — кожухи приводів; 12 — випромінювач лазера; 13,14,16 — вузли повороту променя; 15 — обертова головка (з додатковими обертовими координатами В та С).

Звичайно, бокове введення променя у струмінь викликає певні зміни у розподілі інтенсивності випромінювання за перетином [19], однак для вивчення окремих явищ це не суттєво. Припускалося, що промінь лазера може подаватися у струмінь як у точку його контакту з поверхнею, так і у довільну точку на осі струменя. Зважаючи на міркування, висвітлені в [9], відбиття променя в оболонці струменя (на кут біля 47° для когерентного пучка з довжиною хвилі 1062 нм) дозволить забезпечити прямування променя всередині оболонки струменя. Конструктивно це виконати досить просто, адже досліджуваній комплекс ЛСК-400-5 (рисунок 6) дозволяє зробити технологічне налагодження без суттєвих ускладнень.

Тестовий різ виконували на пластинці зі сталі 40Х завтовшки $3,5 \text{ мм}$ на таких режимах (таблиця 1): потужність — 300 Вт , частота імпульсів — 75 Гц , продування зони різку стисненим повітрям тиском $0,35 \text{ МПа}$, швидкість робочої подачі — 12 мм/с . У результаті було отримано звичайний торець шорсткістю $Ra 3,2 \text{ мкм}$, зоною термічного впливу біля $1,2-1,5 \text{ мм}$. Детальне електронно-мікроскопічне дослідження довело наявність окремих фазових перетворень у прилеглий до торця ділянки, зі зміною розмірів зерен тіла зразка.

Далі встановили під кутом $\alpha = 15^\circ$ сопловий насадок і виконали суміщення сфокусованого пучка лазера з теоретичним центром натікання струменя на поверхню. При цьому суміщення фокусу з віссю струменя забезпечували за умови, що струмінь залишатиметься компактним, тобто $L_{hi} < H_{bi} \cos(\alpha)$. Також припускали, що перетяжка каустики в існуючій оптичній системі мала, а умова суміщення променя лазера з віссю струменя виконується, коли $W_i = L_{hi} - \Phi \sin(\beta) = 0$ (рисунок 4), Φ — фокусна відстань об'єктиву оптичної лазерної системи.

Зважаючи на те, що використовували сопло с отвором на зрізі $0,25 \text{ мм}$, тобто таке, що забезпечує компактне ядро довжиною $20-25 \text{ мм}$, із конструктивних параметрів нахил тубусу лазера встановили $\beta = 30^\circ$, отримавши, відповідно, відстані $L_i = 52 \text{ мм}$ та $L_o = 21 \text{ мм}$. Проведення пробного різку на швидкості подачі $s = 12 \text{ мм/с}$ показало, що процес лазерно-струминної ерозії продуктивніший за традиційний і отримати картину самого різку в перетині досить складно. Тому швидкість подачі підвищили до $s = 35 \text{ мм/с}$, отримавши борозенку глибиною $2,1-2,2 \text{ мм}$. Порівняння картин різання (рисунок 7) дало наступне.

При використанні найпростішої схеми введення променя у струмінь вдалося отримати високоякісний скрайб на поверхні металевої пластинки зі сталі 40Х. Порівняно з традиційними методами гідроабразивного або лазерного впливу борозенка виявилася глибшою, з рівними торцями, без шару термодеструкції. У поперечному перетині борозенка несиметрична, її вісь наближається до осі струменя, тобто збільшення кута α викликає пропорційне збільшення несиметричності. На несиметричність також впливає і напрямок подачі, що очевидно, оскільки наближення напрямку руху до площини, в якій знаходяться осі струменя і променя, впливає лише на форму фронту борозенки різання, і торці борозенки стають практично симетричними.

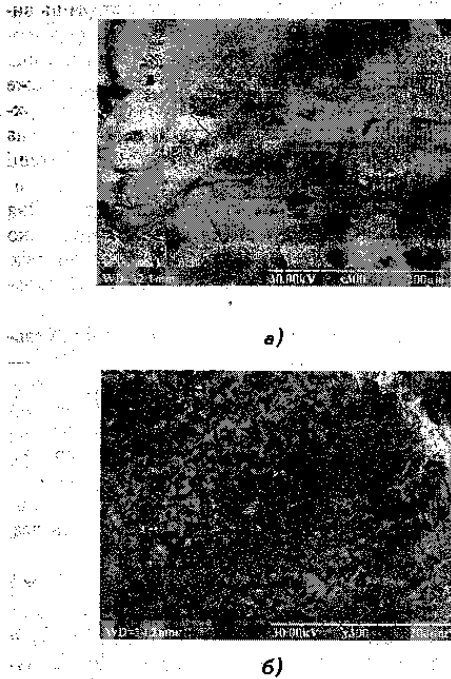


Рисунок 7 — Зразки торців на заготовці зі сталі 40Х, отримані лазерним (а) та струминно-лазерним (б) різанням.

Зміна точки введення променя при збільшенні відстані $L_{в}$ призводить до виникнення суміжної борозенки (рисунок 8, таблиця, останній рядок), на певній відстані від пер-

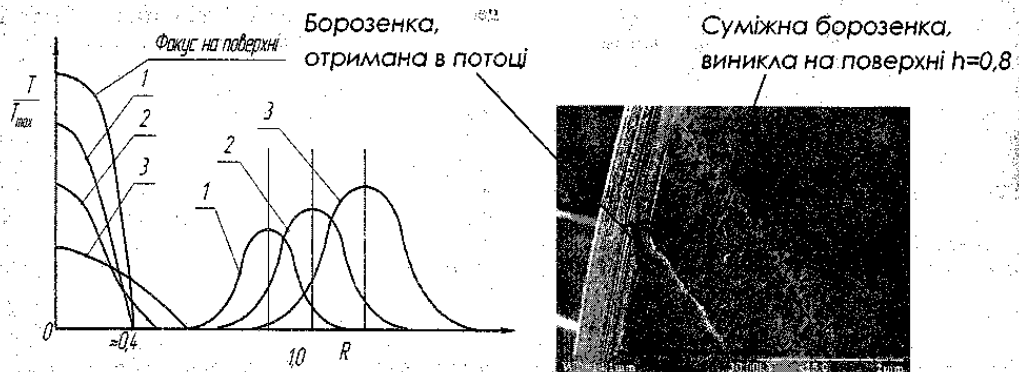


Рисунок 8 — Розподіл відносної температури (T/T_{max}) на поверхні у функції параметру W : 1 — $W=0,2$; 2 — $W=0,4$; 3 — $W=0,6$.

шої. Очевидно, поява цієї борозенки є результатом пропалвання поверхні променем, що подолав обложку струменя або оминув її внаслідок неточності юстировки і після просвічування з переломленням потрапив на поверхню. Змінюючи контрольовану відстань $L_{в}$, встановили розподіл інтенсивності випромінювання і отримали ряд епюр зміни температури по поверхні (у безрозмірному вигляді)

залежно від параметру $\Phi = \frac{W_i}{d_c}$, W_i — зміщення точки фокусування на поверхні, (рисунок 7).

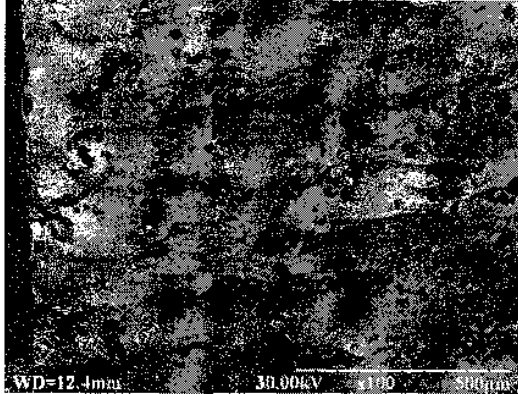
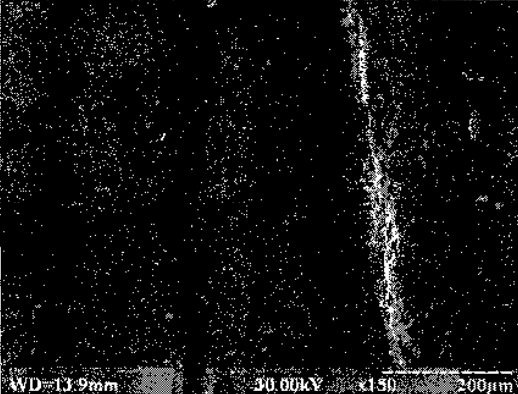
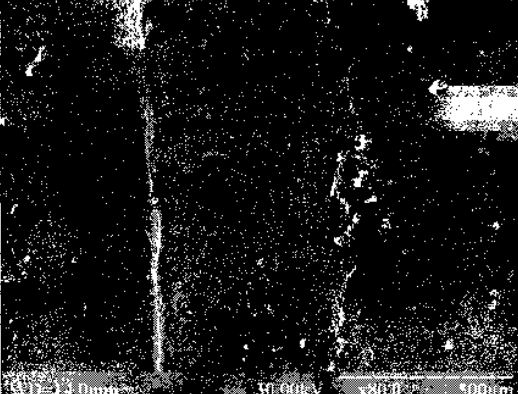
Отже, сполучаючи струмінь рідини високого тиску із променем лазера, вдалося отримати результати, тотожні тим, що висвітлені в роботі [7], однак при досить простій реалізації процесу. Бокове введення променя у струмінь викликає несиметричний різ у разі, коли систему зорієнтовано перпендикулярно або під значними кутами до напрямку подачі і практично симетричний коли осі променя, струменя і напрямку подачі утворюють одну площину. Допуск на ширину борозенки не гірший за IT8-IT9.

Вивчали також і вплив діаметра сопла D_c (а відтак і витрати рідини q_p при постійному тиску p_p) на продуктивність процесу, виражену через глибину борозенки різа. Використовували сопла діаметрами D_c 0,1 мм, 0,22 мм, 0,3 мм, 0,38 мм та 0,5 мм.

Результати вимірів глибини борозенки різа при подачі $s=35$ мм/с та інших параметрах, поданих у таблиці, показані на рисунку 9. Встановлено, що зростання діаметра струменя при збільшенні отвору сопла призводить до нерівномірного зростання глибини борозенки; для досліджуваного тиску 100 МПа використання сопел з отвором понад 0,4 мм веде до того, що глибина лунки починає зменшуватися, при одночасному випереджаючому зростанні ширини борозенки. Сам перетин стає більш заокруглим. При перерахунку обсягу вилученого матеріалу q_w за час

Таблиця 1

Електронні мікрофотографії дослідних зразків, отриманих під час досліджень (матеріал — сталь 40Х)

Режими виконання обробки	Електронна мікрофотографія	Примітки
<p>1. Лазерне різання</p> <p>$p_e=0,35$ МПа; $S=12$ мм/с; $P=300$W; $F=75$ Hz</p>	 <p>WD=12.4mm 30.00kV x100 500um</p>	<p>Спостерігаються поверхневі мікротріщини, поверхня має чітко виражені борозенки стікання расплаву оброблюваного металу</p>
<p>2. Лазерно-струминне з фокусуванням на поверхні</p> <p>$p_e=0,35$ МПа; $S=35$ мм/с; $P=300$W; $F=75$ Hz $P_p=100$ МПа; $D_e=0,25$мм, кут нахилу струменя $\alpha=15^\circ$, фокус оптичної системи — 80 мм</p>	 <p>WD=13.9mm 30.00kV x150 200um</p>	<p>Поверхня однорідна, шорсткість за параметром $Ra=1,6-0,8$ мкм, Ванна расплаву має залишки частинок металу у формі кульок $d_k=10-50$ мкм. Різ несиметричний, кут нахилу гіпотетичного центру відповідає нахилу струменя</p>
<p>3. Лазерно-струминне з фокусуванням у тілі струменя</p> <p>$p_e=0,35$ МПа; $S=35$ мм/с; $P=300$W; $F=75$ Hz $P_p=100$ МПа; $D_e=0,25$мм, кут нахилу струменя $\alpha=15^\circ$, фокус оптичної системи — 80 мм</p>	 <p>WD=13.0mm 30.00kV x800 100um</p>	<p>Спостерігається одна борозенка від лазерів струминного впливу і друга на відстані біля 500-600 мкм, виникла внаслідок просвічування променем лазеру струменя рідини. Нерівномірність подачі рідини призводить до виникнення каверн більшої глибини</p>

t , що визначається поперечним перетином борозенки f_b , як $q_w = f_b \cdot s \cdot t$, маємо, що цей параметр зростає пропорційно. При порівнянні глибини борозенки, отриманої авторами [7], маємо, що підвищення тиску рідини з 50 до 100 МПа за інших рівних умов викликало збільшення глибини в 1,8 рази.

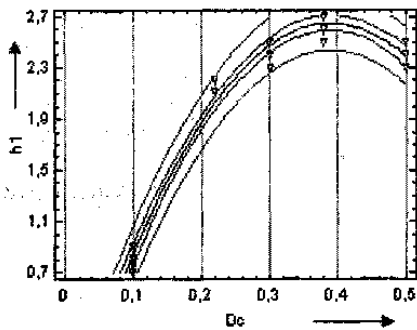


Рисунок 9. Зміна глибини борозенки різа h_1 у функції діаметра струменя, D_c .

Можна припустити, що подальше збільшення діаметра отвору сопла призводитиме до значного зменшення глибини борозенки різа, тобто за певних умов можливе досягнення ефекту поверхневого полірування (зняття мікрodefektів), про що зазначалося в роботі [1]. На наступному етапі здійснювали випробування кільцевого сопла, що формує коаксіальний потік діаметра 1,5–2,0 мм. При цьому виконували технологічне налагоджування струмінно-променевої системи так, щоб фокусування променя лазера відбувалося у точці змикання потоку рідини, яка витікає із кільцевого сопла з параметрами: $D=1,05$, $d=0,55$, профіль симетричний, кут нахилу профілю (обмежуваний фокусною відстанню використовуваної оптики) становить 27° . Перевіряли залежність глибини різання h на пластинках різних матеріалів (металевих та неметалевих композитів, а також надміцного матеріалу залежно від тиску технологічної рідини p , частоти слідування імпульсів f (змінювали ступінчасто: 50; 75; 100; 150; 500 Гц) та тривалості імпульсу $t=2$ мс; 5 мс; 10 мс; 50 мс

Досліджувався набір матеріалів:

- 1) склопластик СВА;
- 2) вуглепластик «Карбон С-49»;
- 3) сталь 40Х;
- 4) твердий сплав групи ТК;
- 5) надтвердий матеріал — кубічний нітрид бору СВН

Експерименти проводили для зазначеної групи матеріалів, дублюючи досліді по 10 разів. Контроль здійснювали по 7 точкам у всьому діапазоні зміни впливового чинника. Отримання контрольних різів показало, що результати моделювання із використанням розробленої авторами узагальненої моделі розвитку ерозії в анізотропному середовищі при струмінно-променевому впливі в цілому задовільно узгоджуються із експериментами. Макси-

мальна відмінність очікуваної глибини різа (при порівнянні з реальною деструкцією матеріалу) спостерігається для матеріалів із армуванням скляними волокнами, що можна пояснити ефектом вторинного термічного руйнування матриці за рахунок світлопровідних властивостей наповнювача. Ефект проявляється сильніше при зменшенні швидкості руху робочої подачі.

Аналіз картин мікроруйнування показав, що тривалістю дії струмінно-променевого потоку можна регулювати глибину пропалювання і утворення умовної лунки, яка не зважаючи на наближення його форми до циліндроїду, не є абсолютно симетричною. Регулюючи тривалість імпульсу лазера та швидкість переміщення по поверхні можна формувати ступінчасту структуру поверхні із забезпеченням розмірів «пікселю» на рівні 0,1 мм (при окремих реалізаціях дослідів вдалося досягти розміру 0,05 мм).

Аналіз мікрофотографій лазерно-струмінного різання волокнистих композитів доводить, що використання рідини дозволяє попереджувати виникнення водонасиченого шару, забезпечує задовільну якість торця та низький рівень шорсткості.

Висновки

Підсумовуючи, можна зазначити, що процес лазерно-струмінного різання є перспективним високоефективним та універсальним при обробці широкої гами матеріалів. Процес реалізується за різними схемами сполучення променя лазера зі струменем рідини високого тиску, а запропонований спосіб введення променя дозволяє отримати ті самі ефекти, що і заявлені світовим лідером у галузі струмінно-лазерних технологій. За запропонованою схемою можна отримувати лінійні різи. Використання більш високого тиску дозволяє підвищити продуктивність процесу при очікуваному зменшенні ширини деструктивної зони, однак це питання потребує подальших досліджень.

Література

1. Richerzhagen, B. Solid state technol., 44, (2001), S.25—S28.
2. High-speed singulation of electronic packages using a frequency doubled Nd:YAG laser in a water-jet and realization of a 200 W green laser /Frank R. Wagner, Wentao Hu, Akos Spiegel, Nandor Vago, Bernold Richerzhagen //SPIE 4637 LASE 01, San Jose, CA, 2003.
3. Pauchard, A., Spiegel, A., Richerzhagen, B. Dicing of HB-LED devices embedded in copper or copper tungsten substrates /ICALEO 2008 conference proceedings, 2008.
4. Kuhnlein, G. A Design and Manufacturing solution for high reliable non-leaded CSP's like QFN, Electronics, Component and Technology Conference (ECTC), Orlando, Florida, 2001.
5. Kickelhain, J. LPKF Laser & Electronics AG, Mikroschneiden von SMD-Schablonen für den Lotpastendruck, LEF 2000 Symposium, Erlangen, Germany.
6. Sugimoto A., Ochi, H., Fujimura S. et. al Flexible OLED displays using plastic substrates, IEEE laser power for a test using a 120µm nozzle. Journal of selected topics in quantum electronics, 2004, Vol. 10, № 1.

7. F.R. Wagner, A. Spiegel, N. Vago and B. Richerzhagen, "Water-jet guided laser: possibilities and potential for singulation of electronic packages," SPIE 4637 LASE 01, San Jose, CA, 2001.

8. Manufacturing of 4th Generation OLED Masks with the Laser MicroJet Technology / Tuan Anh Mai, Bernold Richerzhagen//Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2007, Munich, June 2007.

9. New process for cutting 4th generation OLED masks: Laser MicroJet® technology/T. A. Mai, B. Richerzhagen// Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2007, Munich, June 2007

10. A.M. Sterling and C.A. Sleicher: J. Fluid Mech., 68, (1975), 477-495.

11. B.S. Yilbas, K. Danisman and Z. Yilbas: Meas. Sci. Technol., 2, (1991), 668-672.

12. B. Richerzhagen: J. Appl. Phys., 74, (1993) 1119.

13. B. Richerzhagen, G. Delacretaz, R.P. Salathu. Complete Model to Simulate the Thermal Defocusing of a Laser Beam Focused in Water, Optical Engineering, vol. 35, No. 7, pp. 2058—2066, 1996.

14. Recent developments in the cutting of ultra hard materials using water jet-guided laser technology / A. Pauchard, M. Di Marco, B. Carron, G. Suruceanu, B. Richerzhagen, A. Brulu, Notker Kling//ALAC 2008 conference proceedings, 2008.

15. New CBN Machining Possibilities with the Water Jet-Guided Laser / L. Mayor, R. Romanowicz// Journal of the Industrial Diamond Association of America #6, 2003. — p.160-162.

16. Precise thin metal cutting using the Laser MicroJet / A. Pauchard//Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik, Tagungsband: LEF 2009

17. Саленко О.Ф., Фомовська О.В., Дудюк В.О. Формування деструктивного шару на краях оболонкових виробів із неметалевих композитів при гідро- та гідро абразивному різанні//Вісник НТУУ «КПІ», 2009, № 58. — с.104-109.

18. Salenko A., Mana a., Dudiuk V. About effects of stream-beam influence on a surface of firm bodies and prospect of use of jet-Beam technologies // Transactions of Kremenchug Mykhaylo Ostrogradskiy State University. — #6, 2009. — p. 62-75

19. Kondratenko, V., Tchernykh S. ets. Laser thermal-cleaving technology for precise cut of silicon and sapphire wafers //Abstract of Market Seminar SEMI Expo CIS 2003/ Moscow, September 29, 2003.

20. Кондратенко, В.С., Гиндин, П.Д., Черных, С.П., Наумов, А.С. Лазерное управляемое термоскалывание приборных пластин на основе кремния и арсенида галлия // Фотоэлектроника и приборы ночного видения: XVIII Международн. Научн.-техн. конференция. — Москва, 2004.

Надійшла 16.05.2011 р.