УДК 621.115.001.

О.Ф.Саленко, д-р техн.наук, проф., О.В.Фомовська, канд.техн.наук, В.О.Дудюк, О.М.Мана, асп.
Кременчуцький державний університет ім. М.Остроградського, Кременчук, Україна

ПРО ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СТРУМИННО ЛАЗЕРНОГО-ВПЛИВУ НА ПОВЕРХНЮ ТВЕРДИХ ТІЛ

В статье 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 использования 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 керованого локального термічно-гідродинамічного впливу, внаслідок якого в поверхневих шарах оброблюваної заготовки відбуваються швидкоплинні процеси термічно-механічної деструкції. В 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; в пружних та пружно-пластичних матеріалах деструкція проявляється у 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 систематизованих відомостей та єдиної теорії лазерно-струминної обробки не існує. Розрізнена інформація зустрічається у ряді друкованих праць: [1-3] – висвітлює питання принципу лазерно-струминної обробки (Water Jet-Guided Laser), [5] – 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 під час 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 таких матеріалів, для яких інші методи неефективні або неприйнятні взагалі. Особливої актуальності набувають дослідження лазерно-струминної обробки нових конструкційних та інструментальних матеріалів – композитів, функціональна орієнтованість яких вимагає розробки відповідних високоефективних функціонально орієнтованих методів.

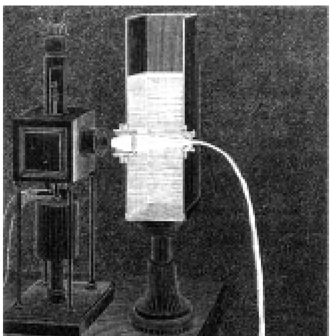


Рис. 1. Світловий фонтан, демонстрований у Парижі у 1841 р.

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 досліду з так званим «світловим фонтаном», демонстрованим у Парижі у 1841 році, який наочно довів можливості руху світла у ламінарному (точніше, близькому до ламінарного) потоці рідини при його відхиленнях внаслідок дії сили земного тяжіння. Дослід був досить простий (рис.1.). У світлонепроникній камері знаходилася рідина (вода), яка вільно витікала із соплового насадку, встановленого в нижній частині камери. У протилежній стінці камери було виконано отвір з установленим склом, крізь яке до камери надходило світло. В затемненій кімнаті глядачі могли 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 співвісно до руху рідини у струмені, на який діяла сила тяжіння. Власне кажучи, струмінь рідини виявився першим світловодом, в якому поширення світла відбувалося внаслідок багатократного переломлення та відзеркалення від оболонки потоку світла.

Повертаючись до цієї ідеї, розробники устаткування для лазерно-струминного різання запропонували систему, яка складалася з таких елементів [5] (рис. 2,а): фокусуючої системи, струминної камери з вікном для введення променя лазеру, сопла, генератора когерентного випромінювання (лазеру) 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 існуючій лазерній системі мова йде про значно більшу робочу ділянку (рис. 2,б). Отже, різання матеріалі значної товщини тепер не буде стикатися із складностями, оскільки не виникатиме підрізання променя, інших порушень сталості процесу термічного різання.

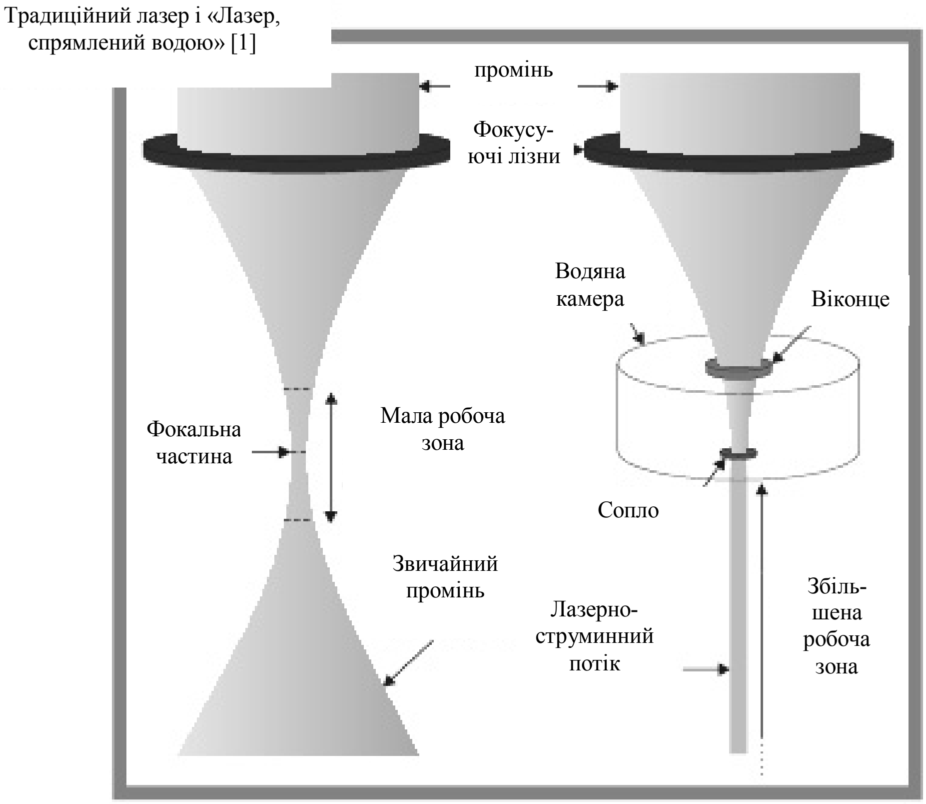


Рис. 2. Відмінність традиційного лазерного променя від лазерно-струминного потоку. Струмінь рідини–світловод, який також виконує функцію активного хладагента (за [5])

Суттєвим недоліком даного способу є те, що струминна камера повинна була мати прозоре вікно, до якого підводилося випромінювання лазеру. З одного боку, це суттєво 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» роблять втрати потужності променя ще більшими.

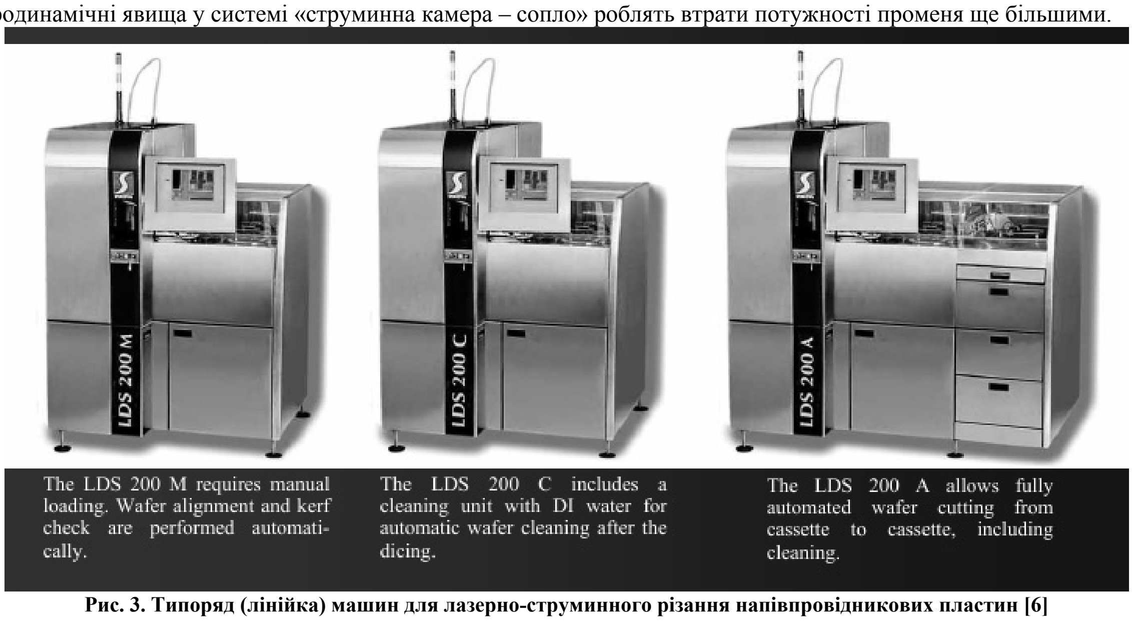


Рис. 3. Типоряд (лінійка) машин для лазерно-струминного різання напівпровідникових пластин [6]

Нині Synova S.A., Switzerland пропонує споживачам кілька типорозмірів обладнання для лазерно-струминного різання (рис. 3) [6]: з робочою зоною від 50х50 мм до 250х250 мм. Переважна більшість таких машин призначена для виконання точного різання пластинок зі скла, кремнію, селену, твердих та надтвердих матеріалів. Фірма активно впроваджує даний метод у радіоелектронну галузь; нині робить спроби освоїти новий сектор ринку – аерокосмічну промисловість, яка потребує розкроювання 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 підґрунття, 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 в роботі [18], де подані окремі варіанти реалізації сполучень струменя рідини з променем лазеру.

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. Нині 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 операцій гідрорізання, гідроабразивного або лазерного розкроювання, 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 поглинання випромінювання із наступною деструкцією, залежить 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, рис.4. Рівнянням,запропонованим [17] можна визначити температурні поля у випадку, коли охолоджувач – рідина надвисокого тиску не подається:

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

$$\cdot\left[e^{-\frac{z^2}{4a\tau}}-h(\pi a\tau)^{\frac{1}{2}}erfc\left(\frac{z}{2(a\tau)^{\frac{1}{2}}}+h(a\tau)^{\frac{1}{2}}\right)\cdot e^{hz+h^2a\tau}\right]d\tau \tag{1}$$

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

Подавання рідини надвисокого тиску вимагає врахування крайових умов

$$c\rho\frac{dT}{dt}-\lambda\Delta T=\frac{(1-R_0)kP}{\pi AB}\exp\left[-2\left(\frac{(x-\nu t)^2}{a^2}+\left(\frac{y}{b}\right)^2\right)\right]\cdot\exp(-kz);\ \lambda\left.\frac{dT}{dz}\right|_{z=0}=\alpha(T)(T-T_p);$$

$T(x,y,z,t)=T_0$ при апроксимації зростання коефіцієнта тепловіддачі залежністю виду [18] $h(T)=h_m\exp\left(-\dfrac{(T-T_m)^2}{\Delta T^2}\right)$ що при виконанні числового розв’язку рівняння (1), дасть зони (I) різкого спадання температури у місці підведення охолоджувальної рідини, причому, залежно від витрати охолоджувача та ефективності тепловідведення розподіл температурних полів може мати суттєві відмінності (рис. 5, (II)). Подана ілюстрація дає наочну картину відмінностей у розподілі ізотерм перерізу, паралельному тому, що проходить через вісь променя у напрямку руху робочої подачі.

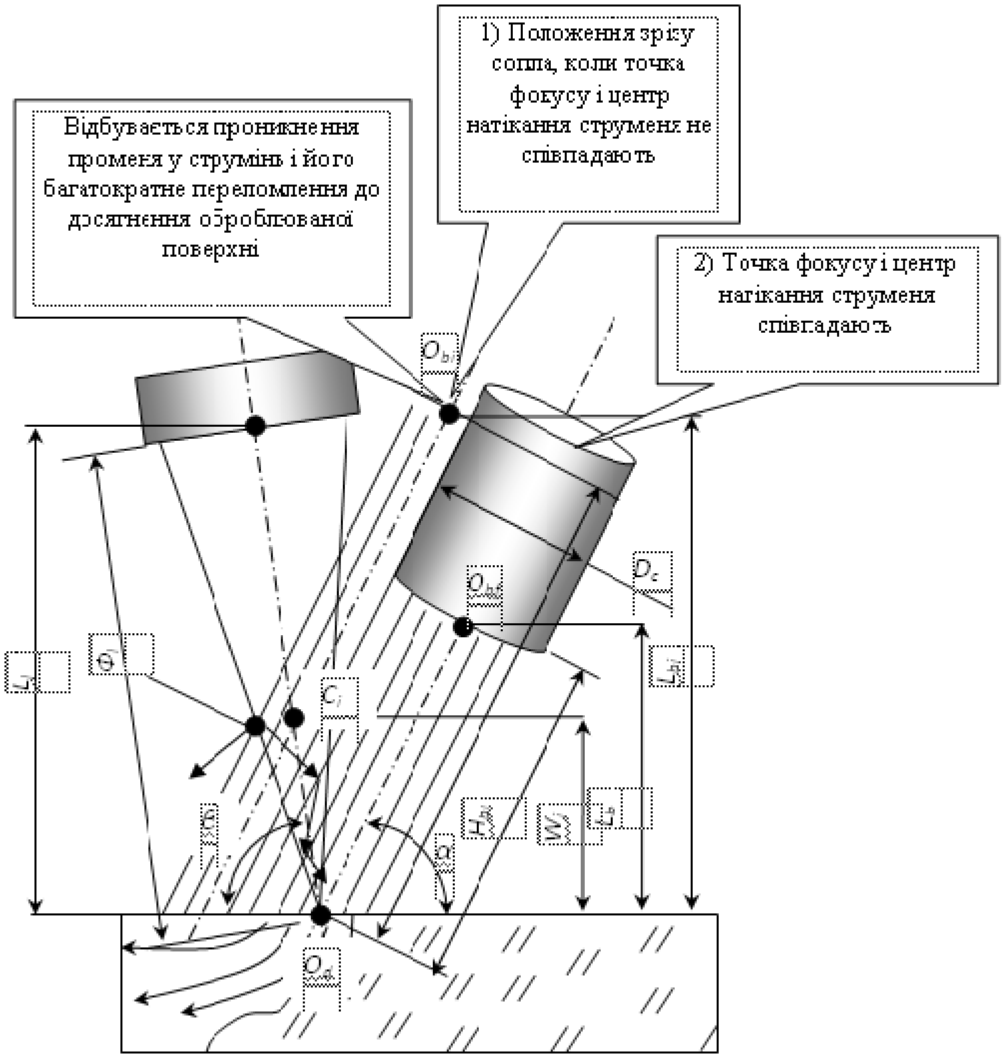


Рис. 4. Взаємодія лазерно-струминного потоку з дослідним зразком при боковому введені променя

Оскільки крок побудови становить 0,005 мм, локалізація температури (на ізотермі T=600^{0}С) може знаходитися в межах 0,04 мм, що для перепаду ΔT=1500^{0}С охопить зону не більшу за 0,1 мм. Причому, збільшення інтенсивності тепловідведення призводить до більшого падіння 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].

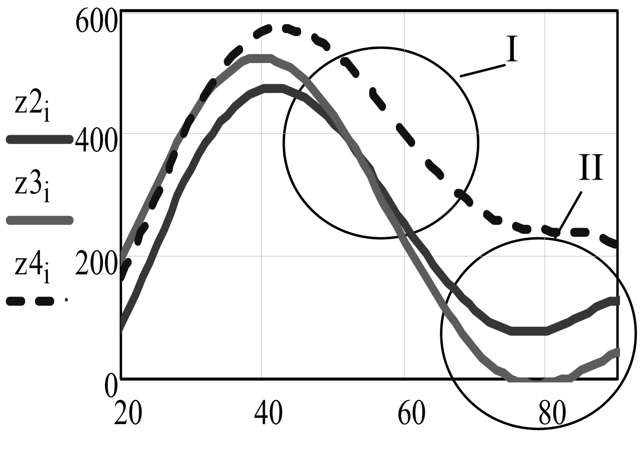
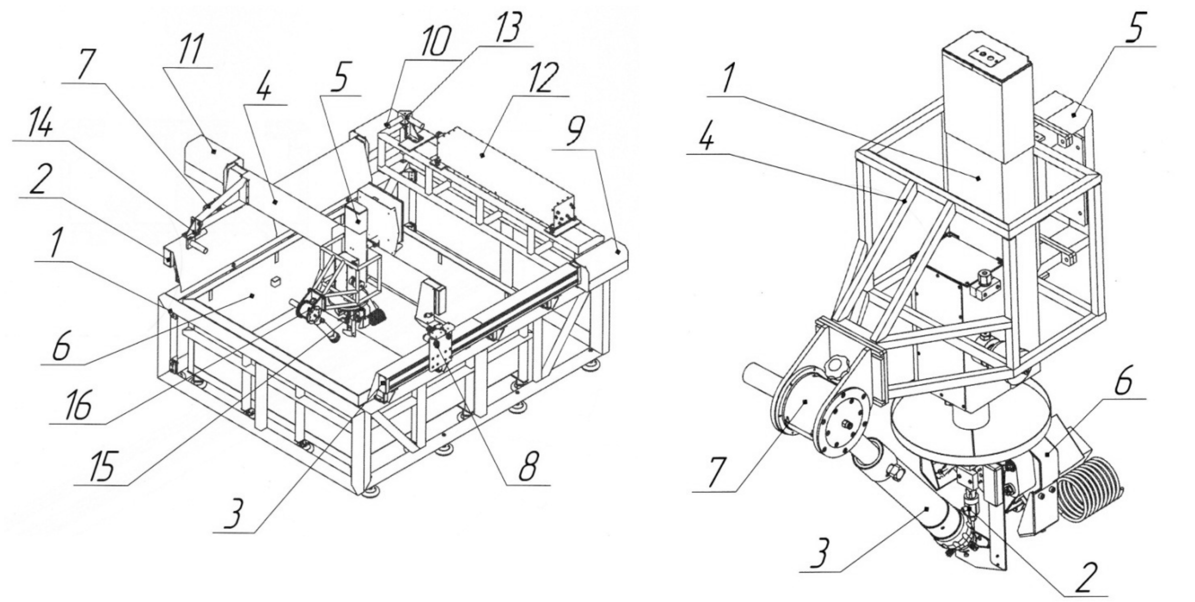


Рис. 5. Гіпотетичний розподіл температури $T(x,z)$ за перетином, паралельним осі лазеру та таким, що знаходиться на відстані l=1,5d_c: z2 – робота із тиском до 50 МПа; z3 - збільшення тиску витікання рідини до 100 МПа непряме натікання струменя; z4 - без подавання хладагенту

Оскільки бокове введення променя у швидкоплинний струмінь є найбільш простим 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_c, на етапі попередніх досліджень саме ця схема була обрана за базову. При цьому з метою вивчення ступеня впливу параметрів технологічної системи на параметри борозенки різа напрям подачі задавали перпендикулярно до площини, яку утворювали вісі променя і струменя.

Звичайно, бокове введення променя у струмінь викликає певні зміни у розподілі інтенсивності випромінювання за перетином [19], однак для вивчення окремих явищ це не є суттєвим. Припускалося, що промінь лазеру 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 47^0 для когерентного пучку з довжиною хвилі 1062 нм) дозволить забезпечити прямування променя всередині оболонки струменя. Конструктивно це виконати досить просто, адже досліджуваний комплекс ЛСК-400-5 (рис. 6) дозволяє зробити технологічне налагодження без суттєвих ускладнень.

Тестовий різ виконували на пластинці зі сталі 40Х товщиною 3,5 мм на таких режимах (див. таблицю): потужність - 300 Вт, частота імпульсів – 75 Гц, продування зони різу стисненим повітрям тиском 0,35 МПа, швидкість робочої подачі – 12 мм/с. В результаті було отримано звичайну крайку шорсткістю *Ra* 3,2 мкм, зоною термічного впливу біля 1,2-1,5 мм. Детальне електронно-мікроскопічне дослідження довело наявність окремих фазових перетворень у прилеглій до крайки ділянки, зі зміною розмірів зерен тіла зразка.



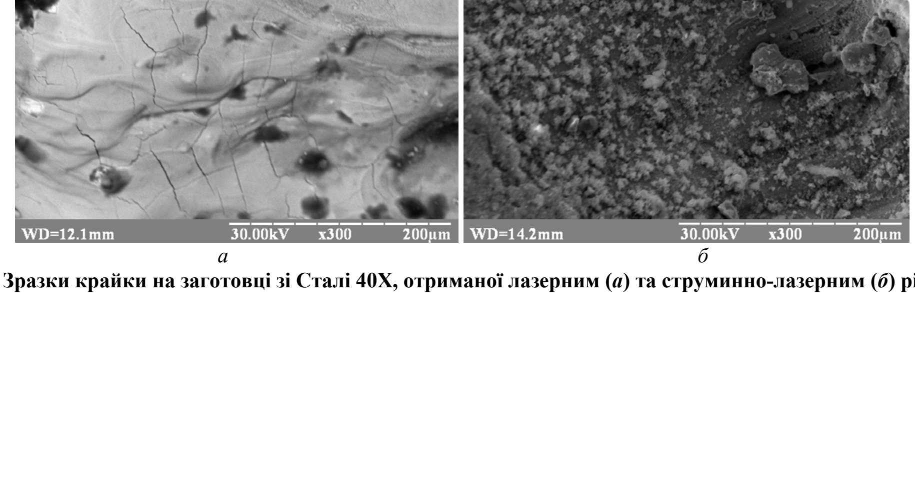
а *б*

Рис. 6. Елементи дослідницького обладнання ЛСК-400-5 (а) та робочого органу (б)

1 – несуча система; 2,3 – балки поздовжнього переміщення (Y-координати); 4 – балка поперечного переміщення (Х-координати); 5 – балка вертикального переміщення (Z- координати); 6 – водоприймач; 7 – система «летючої оптики» твердотілького лазеру; 8 – каретка силового приводу; 9,10,11– кожухи приводів; 12- випромінювач лазеру; 13,14,16 – вузли повороту променя; 15 – обертова головка (з додатковими обертовими координатами В та С)

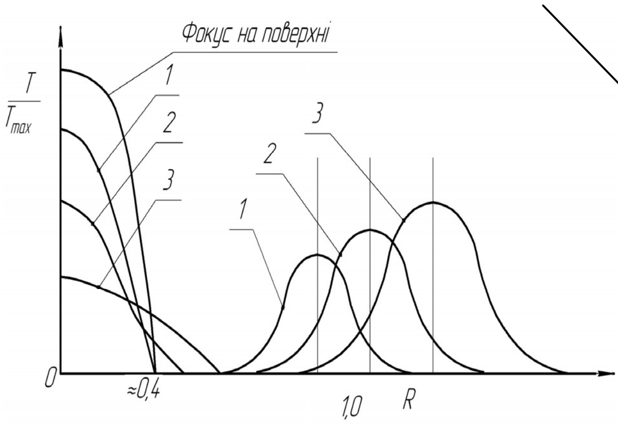
1 – балка вертикального переміщення робочого органу; 2 – струминний пристрій; фокусуючий тубус лазеру із системою автоматичного підналагодження у фокальній площині по вертикальній координаті (координаті Z); 4 – несуча система тубусу; 5 – каретка поперечного переміщення (Х-координати); 6 – шарнір високого тиску для забезпечення обертових переміщень струменеформуючого органу; 7 – шарнір повороту тубусу для введення променя у швидкоплинний потік

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



а *б*

Рис. 7. Зразки крайки на заготовці зі Сталі 40Х, отриманої лазерним (*а*) та струминно-лазерним (*б*) різанням



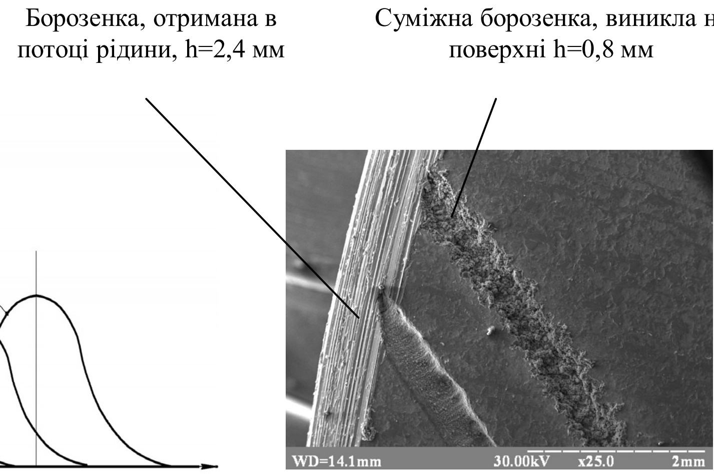
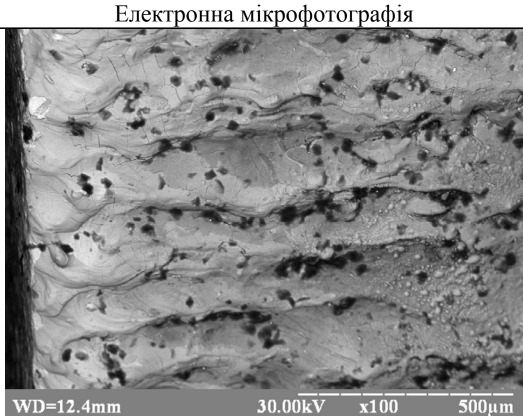
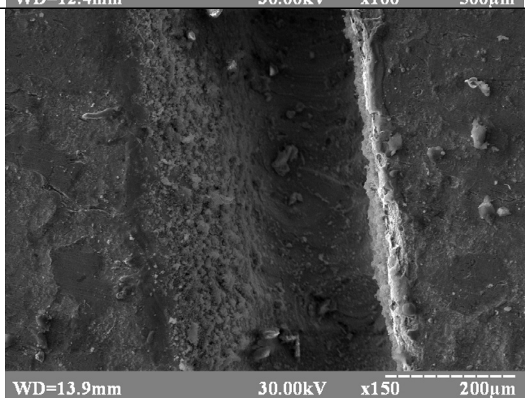
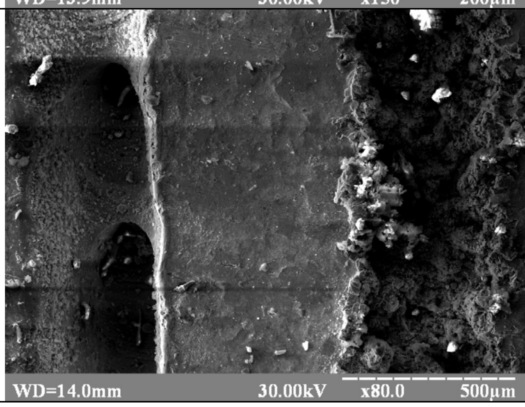


Рис. 8. Розподіл відносної температури (*T*/*T*$_{max}$) на поверхні у функції параметру *W*:
1 – W=0,2; 2 – W=0,4; 3 – W=0,6

Таблиця

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

	Електронна мікрофотографія	Примітки
1. Лазерне різання $p_в$=0,35 МПа; S=12 мм/с; P=300W; F=75 Hz		Спостерігаються поверхневі мікротріщини, поверхня має чітко виражені борозенки стікання расплаву оброблюваного металу
2. Лазерно-струминне з фокусуванням на поверхні $p_в$=0,35 МПа; S=35 мм/с; P=300W; F=75 Hz P_p=100 МПа; D_c=0,25мм, кут нахилу струменя α=15^0, фокус оптичної системи – 80 мм		Поверхня однорідна, шорсткість за параметром Ra=1,6-0,8 мкм, Ванна розплаву має залишки частинок металу у формі кульок d_k=10-50 мкм. Різ несиметричний, кут нахилу гіпотетичного центру відповідає нахилу струменя
3. Лазерно-струминне з фокусуванням у тілі струменя $p_в$=0,35 МПа; S=35 мм/с; P=300W; F=75 Hz P_p=100 МПа; D_c=0,25мм, кут нахилу струменя α=15^0, фокус оптичної системи – 80 мм		Спостерігається одна борозенка від лазень 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

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

При використанні найбільш простої 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 більш глибокою, з рівними крайками, без шару термодеструкцій. 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, якій знаходяться вісі струменя і променя, впливає лише на форму фронту борозенки різа, і крайки борозенки стають практично симетричними.

Зміна точки введення променя при збільшенні відстані L_{bi} призводить до виникнення суміжної борозенки (рис.8, таблиця, останній рядок), на певній відстані від першої. Очевидно, поява цієї борозенки є результатом проплавляння поверхні променем, що подолав облонку струменя або оминув її внаслідок неточності юстировки і після просвічування з переломленням потрапив на поверхню. Змінюючи контрольовану відстань L_{bi}, встановили розподіл інтенсивності випромінювання і отримали ряд епюр зміни температури по поверхні (у безрозмірному вигляді) залежно від параметру $\Phi = \dfrac{W_i}{d_c}$, W_i – зміщення точки фокусування на поверхні, (рис.7).

Отже, сполучаючи струмінь рідини високого тиску із променем лазеру 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 система орієнтована перпендикулярно або під значними кутами до напряму 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, відтоді, і витрати рідини q_p при постійному тиску p_b) 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 табл., показані на рис.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, пори одночасному випередо-жаючому зростанні ширини борозенки. Сам перетин стає більш заокруглим. При перера-хунку обсягу вилученого матеріалу q_w за час 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.

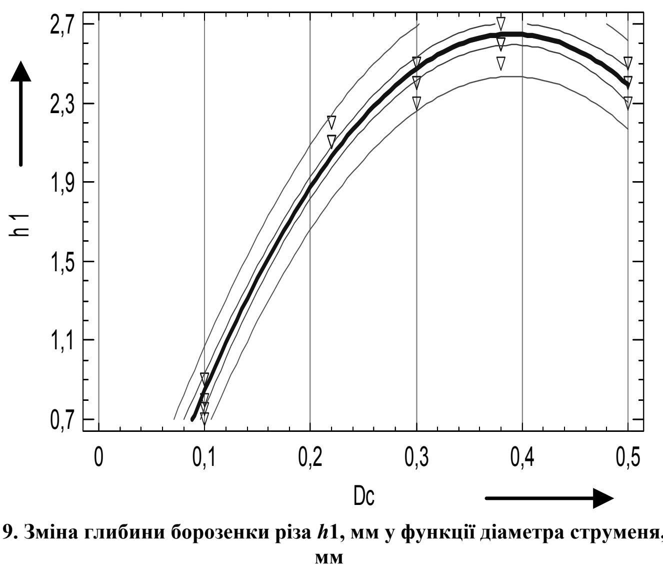


Рис. 9. Зміна глибини борозенки різа *h*1, мм у функції діаметра струменя, *Dc*, мм

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 мікродефектів), про що зазначалося в роботі [1].

Висновки. Підводячи підсумки, можна зазначити, що процес лазерно-струминного різання є перспективним високоефективним та універсальним при обробці широкої гами матеріалів. Процес реалізується за різними схемами сполучення променя лазеру зі струменем рідини високого тиску, а пропонований спосіб введення променя дозволяє отримати ті ж ефекти, що і заявлені світовим лідером у галузі струминно-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.

Список літератури

1. B. Richerzhagen: Solid state technol., 44, (2001), S25-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. A. Pauchard, A.Spiegel, B. Richerzhagen, Dicing of HB-LED devices embedded in copper or copper tungsten substrates / ICALEO 2008 conference proceedings, 2008.
4. G. Kuhnlein, “A Design and Manufacturing solution for high reliable non-leaded CSP's like QFN,” Electronics,Component and Technology Conference (ECTC), Orlando, Florida, 2001.
5. J. Kickelhain, LPKF Laser & Electronics AG, Mikroschneiden von SMD-Schablonen fur den Lotpastendruck, LEF 2000 Symposium, Erlangen, Germany.
6. Sugimoto Akira; Ochi Hideo; Fujimura Soh; 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, No1.
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. Delacrйtaz, 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. Гиндин П.Д., Бельский А.Б., Ковалев С.В., Савченко А.М., Соболев В.П. Лазерные наноматериалы и технологии: Монография. – М.: МГТУ им. Н.Баумана, 2006. – 221 с.
18. Саленко О.Ф., Фомовська О.В., Дудюк В.О. Формування деструктивного шару на крайках оболонкових виробів із неметалевих композитів при гідро- та гідро абразивному різанні//Вісник НТУУ «КПІ», 2009, № 58. – с.104-109.
19. 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
20. 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.
21. 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 Междунар. Научн.-техн. конференция. – Москва, 2004.