

**Yanling Liao¹, Fenglin Zhang^{1,*}, Peng Wang¹,
Xiaozhu Xie¹, Yumei Zhou², Delong Xie³**

¹School of Mechanical and Electronic Engineering, Guangdong
University of Technology, Guangzhou, P. R. China

²School of Mechanical and Electronic Engineering, Zhongkai
University of Agriculture and Engineering, Guangzhou, P. R. China

³Guangxi Key Laboratory of Superhard Materials, Guilin, P. R. China
*zhangfl@gdut.edu.cn

Експериментальне дослідження з виготовлення масивів мікроотворів на CVD алмазній плівці з використанням імпульсного лазера наносекундної тривалості

Досліджено вплив на форму, розмір та морфологію мікроотворів решітки, просвердлених на CVD алмазній плівці за допомогою наносекундного імпульсного лазера його параметрів, таких як ширина імпульсу, швидкість сканування та час сканування. Було отримано масиви мікроотворів діаметром входу 49,1–56,3 мкм, діаметром виходу 4,6–10,6 мкм і кутом конусності менше 18,5° і встановлено, що ширина імпульсу лазера мало впливає на діаметр входу, однак зі збільшенням ширини імпульсу діаметр і глибина виходу мікроотвору збільшуються, тоді як кут конусності зменшується. Зі збільшенням швидкості лазерного сканування діаметр вхідного отвору мікроотвору децю зменшився, а діаметр виходу та кут конусності мало змінився. Встановлено, що час сканування мало впливає на вхідний діаметр мікроотвору, але зі збільшенням часу сканування діаметр виходу мікроотвору збільшився, а кут конусності зменшився.

Ключові слова: лазерна обробка, мікроотворні решітки, наносекундний імпульсний лазер, CVD алмазна плівка, мікрообробка.

ВСТУП

Тенденція мініатюризації виробництва різних пристроїв та попит на мікродеталі швидко зростають у таких галузях, як медична, електронна, аерокосмічна та різних галузях промисловості [1, 2]. Мікроотвір зазвичай визначають як отвір діаметром від 1 мкм до 1 мм [3]. Мікроотвори широко використовують у дизельних форсунках, друкованих платах, біомедичних мікроприладах, мікрорідинних каналах, вентиляційних отворах для газових турбін, мініатюрних масляних розпилювачах, прядках і струменевих головках [4–6]. Традиційна обробка мікроотворів за допомогою мікросвердла має декілька вад, таких як недостатня жорсткість, сильний знос інструментів, велика генерація тепла і задирки на виході отворів [3, 7, 8]. Нетрадиційні методи, такі як електрохімічна мікрообробка (ECM), обробка електричним розрядом (EDM), літографічна гальванообробка (LIGA), ультразвукова обробка (USM) та обробка лазерним променем (LBM) [9], широко застосовуються

для свердління мікроотворів з високою точністю та малим діаметром. При ЕСМ обробці мікроотвори утворюються на металевих матеріалах за допомогою електрохімічної реакції розчинення, і тому можна отримати високоякісну поверхню [10]. При EDM обробці мікроотвори можуть утворюватися ерозією завдяки впливу електричних іскор, що виникають між електродом та провідними заготовками незалежно від їх твердості та в'язкості [11]. За допомогою LIGA можна адекватно обробляти двовимірні мікроструктури, у яких, як правило, використовується нікель, мідь та сплави зі зв'язками [12]. При USM обробці мікроотвори утворюються ерозією абразивною суспензією, що рухається під дією ультразвуку [13]. LBM використовують в автомобільній, напівпровідниковій та біомедичній промисловості для свердління мікроотворів на важкообробних матеріалах з високою ефективністю і високою точністю [14, 15].

Завдяки надзвичайно високій твердості та надзвичайним фізико-хімічним властивостям, таким як низький коефіцієнт тертя, висока швидкість поздовжньої хвилі, висока теплопровідність і широкий діапазон пропускання, алмаз широко застосовують у багатьох галузях [16–18]. Хімічне осадження з парової фази (CVD), включаючи CVD гарячими нитками (HFCVD) та CVD плазми НВЧ (MPCVD), використовують для синтезу великого розміру полікристалічних і монокристалічних алмазних плівок під дією низького тиску [19–21]. Алмазні CVD плівки широко використовують у різаних інструментах [22], радіаторах [23], оптичних вікнах [24], електромагнітних випромінювачах та напівпровідникових підкладках для електроніки [25]. Для виготовлення певних прецизійних приладів з використанням алмазних CVD плівок зазвичай потрібна мікрообробка, така як різання, травлення і свердління.

При обробці CVD алмазу лазерними променями видалення матеріалу розглядається як двоступеневий процес, що включає перетворення алмазу в графіт та сублімацію графіту [26–30]. При LBM обробці алмазів температура сублімації становить близько 3700 К [31]. Алмази можна обробляти різними лазерами з різними довжиною хвилі та шириною імпульсу. Guo та ін. [32] використовували ультрафіолетовий (УФ) наносекундний імпульсний лазер для обробки масивів мікропазів на грубозернистих алмазних кругах, що зменшувало як шорсткість поверхні, так і глибину поверхневих пошкоджень при шліфуванні оптичного скла ВК7. Кононенко та ін. [33, 34] свердлили CVD алмази з використанням наносекундного імпульсного лазера з довжиною хвилі від глибокого ультрафіолету до інфрачервоного та виявили, що швидкість абляції матеріалу не залежить від довжини хвилі лазера, але пов'язана з глибиною обробленого отвору. Otake та ін. порівнювали здатність лазерної обробки нанополікристалічного алмазу (NPD) з монокристалічним алмазом (SCD) і виявили що NPD має нижчий поріг абляції та краще поглинає енергію лазера, ніж SCD [35].

Виготовлення мікроотворів на алмазних CVD плівках з використанням LBM має потенційне застосування в різних областях. Лише у декількох роботах досліджували вплив параметрів обробки на розміри і морфологію масивів мікроотворів на CVD алмазних плівках. У даній роботі досліджено вплив параметрів наносекундної імпульсної лазерної обробки на форму, розмір і мікроструктуру мікроотворів, виготовлених на CVD алмазній плівці.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Використовували лазер з довжиною хвилі 1064 нм, максимальною потужністю 20 Вт, шириною імпульсу від 4 до 200 нс і частотою повторення від 10 до 5000 кГц (Zhongshan Hantong Laser Equipment Co., Ltd.). В якості заготов-

ки було використано CVD алмазну плівку розміром 10×5×0,2 мм (Diamond Innovations Co. Ltd). До лазерного свердління алмазні CVD плівки очищали ультразвуком у спиртовій ванні протягом 5 хв і сушили на повітрі, після свердління плівки знову очищали за тією ж процедурою. Після висихання плівок використовували скануючий електронний мікроскоп (SEM, S-3400N, HITACHI) для спостереження за морфологією просвердлених мікроотворів на вході та виході.

При свердлінні алмазних CVD плівок було обрано масиви мікроотворів, які було просвердлено наносекундним лазером із частотою повторення 20 кГц, з різними значеннями параметрів ширини імпульсу, швидкості сканування та часу сканування (таблиця). Час сканування визначали як кількість кіл, що проходить цятка лазера навколо центру мікроотвору.

Параметри лазера, що використовували при свердлінні CVD алмазних плівок

Ширина імпульсу T , нс	Швидкість сканування v , мм·с ⁻¹	Час сканування N
14, 20, 30, 50, 100	300	600
50	100, 200, 300, 400, 500	600
50	300	200, 400, 600, 800, 1000

Шлях лазерної обробки було розроблено в AutoCAD і імпортовано в операційну платформу лазера. Як видно на рис. 1, *а, б*, мікроотвори було виготовлено скануванням лазерної цятки навколо центру мікроотвору протягом різного часу. Лазерний промінь було сфокусовано на поверхні CVD алмазної плівки з діаметром цятки 35 мкм, тоді як мікроотвір формували круговим сканом радіусом 10 мкм. На рис. 1, *в* показано масиви мікроотворів на CVD алмазній плівці, отримані лазерним скануванням. Враховуючи похибку округлості мікроотвору, діаметр мікроотвору на вході та виході становить d_a , що визначається наступним рівнянням:

$$d_a = \sum_{i=1}^n \frac{d_{i\max} + d_{i\min}}{2n}, \quad (1)$$

де $d_{i\max}$ – вимірний максимальний діаметр одного мікроотвору, $d_{i\min}$ – вимірний мінімальний діаметр, а n – загальна кількість мікроотворів, виготовлених за певним параметром лазера. У цьому дослідженні n становило 50, а

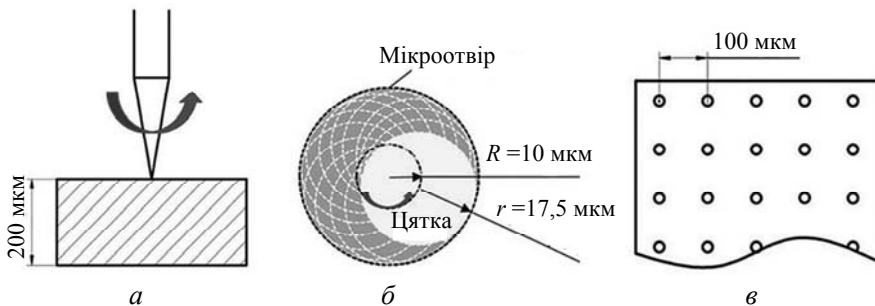


Рис. 1. Принципова схема обробки масивів мікроотворів: *а* – лазерний промінь, сфокусований на поверхні CVD алмазної плівки; *б* – обробка мікроотворів; *в* – масиви мікроотворів після обробки.

діаметри вимірювали за допомогою SEM. Для того, щоб спостерігати за деталями мікроотворів, отримали поперечний переріз масивів мікроотворів, розбиваючи CVD плівку вручну вздовж центрального масиву мікроотворів (рис. 2).

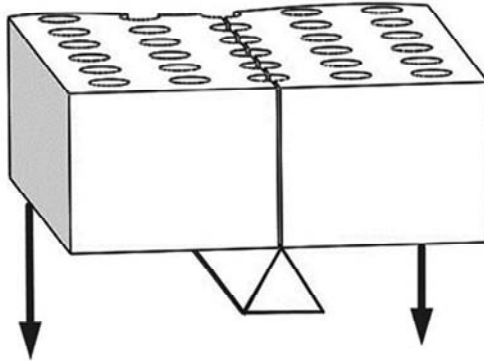


Рис. 2. Принципова схема розлому плівки вздовж центрального масиву мікроотворів для отримання перерізу.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Ефект свердління наносекундного лазера на CVD алмазній плівці

На рис. 3 представлено верхню (а) і нижню (б) морфології необробленої поверхні CVD алмазної плівки. Верхня поверхня (поверхня покриття) CVD алмазної плівки мала грубу морфологію із зернами у вигляді пірамід, характерною для її полікристалічної природи, тоді як нижня поверхня (поверхня підкладки) була відносно рівною та гладкою. На рис. 3, в і д показано масиви мікроотворів, просвердлені наносекундним лазером з імпульсом 50 нс, швидкістю сканування 400 мм/с та часом сканування 600. Видно, що було отримано матриці мікроотворів з діаметром входу ~ 54 мкм і діаметром виходу ~ 6 мкм. На рис. 3, з видно, що поперечний переріз мікроотвору мав форму рогу з великим верхнім кінцем. Крім того, діаметр мікроотворів швидко зменшувався від середини до дна, а поверхня стіни була відносно гладкою.

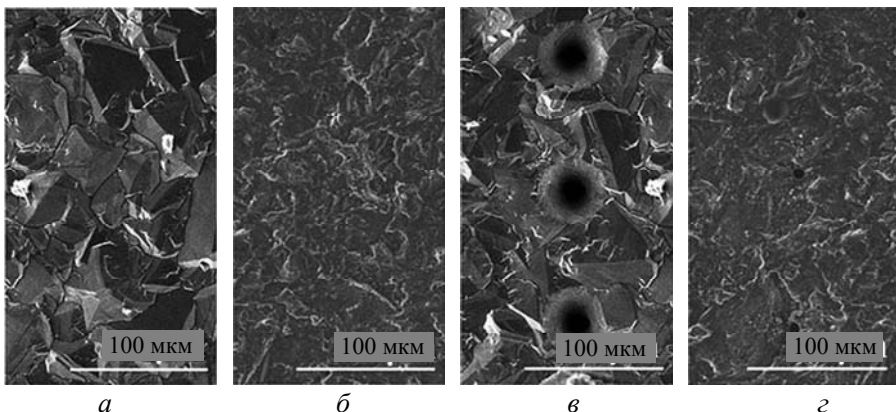
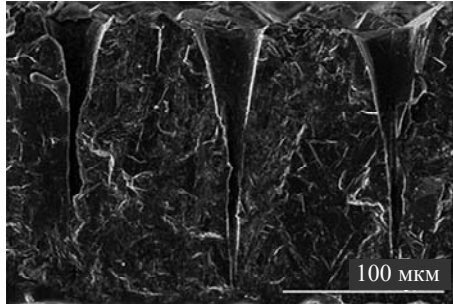


Рис. 3. Морфологія верхньої (а) і нижньої (б) необробленої поверхні алмазної CVD плівки, зображення просвердлених мікроотворів на вході на верхній поверхні (в) та на виході на нижній поверхні (д), зображення поперечного перерізу мікроотворів (з).



д

Рис. 3. (Продовження).

Для того, щоб визначити, як параметри лазера впливають на свердління мікроотворів на CVD алмазній плівці досліджували вплив ширини імпульсу, швидкості сканування та часу сканування на розміри та структуру отриманих мікроотворів.

Вплив ширини лазерного імпульсу на мікроотвори

Морфологію поперечного перерізу мікроотворів при різній ширині імпульсу представлено на рис. 4. Видно, що мікроотвори мали форму рогу з більшим верхнім кінцем, який швидко зменшувався з середини знизу. Це можна пояснити меншою енергією лазерного променя на дні мікроотвору та зменшенням швидкості абляції вздовж глибини мікроотвору [36]. Зі збільшенням ширини імпульсу глибина отворів збільшувалась, діаметр від середини до кінця отвору збільшувався, а форма змінювалася. Коли ширина імпульсу досягала 50 нс, наносекундний лазер проникав у CVD алмазну плівку. Вплив ширини імпульсу на глибину мікроотвору показано на рис. 5.

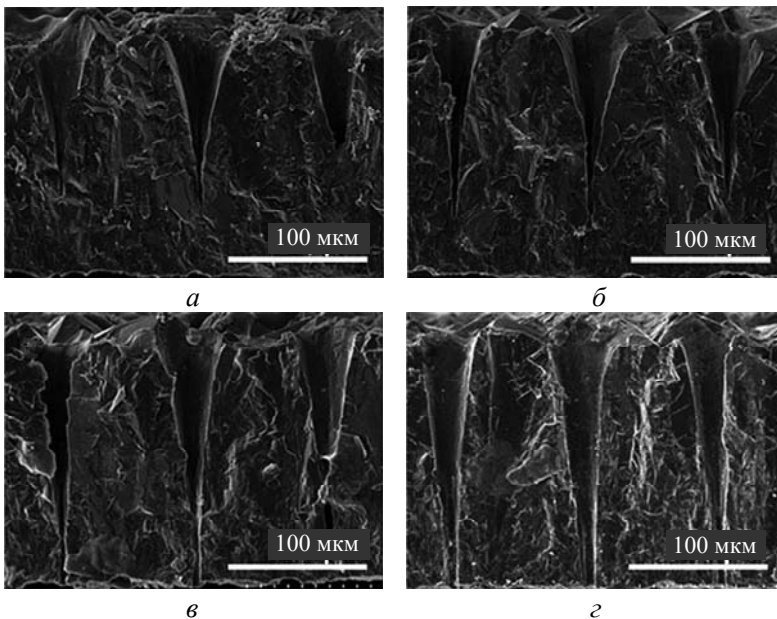


Рис. 4. Морфологія поперечного перерізу мікроотворів при різній довжині лазерного імпульсу: 20 (а), 30 (б), 50 (в) і 100 (г) нс.

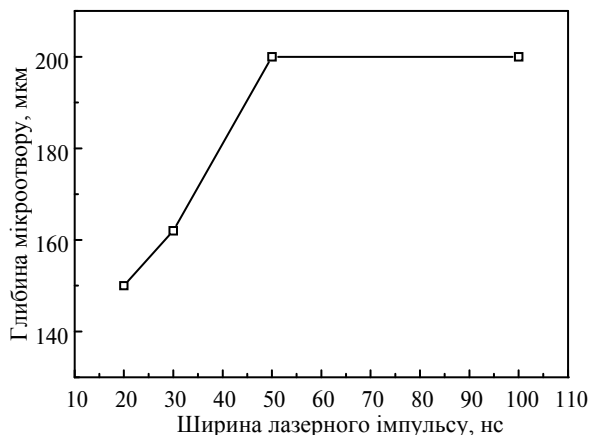


Рис. 5. Вплив ширини лазерного імпульсу на глибину мікроотвору.

Зв'язок між енергією імпульсу E та шириною імпульсу T можна обчислити за наступним рівнянням [37]:

$$P_{pk} = \frac{E}{T}, \quad (2)$$

де P_{pk} – пікова потужність лазера. Енергія імпульсу зростає зі збільшенням ширини імпульсу, постійно підтримуючи пікову потужність лазера [38]. Таким чином, збільшення ширини імпульсу означає, що чим вища енергія, яка використовується для свердління CVD алмазної плівки [15, 39], тим швидше алмазний матеріал може бути протравлений і видалений ще до утворення мікроотвору в плівці.

Залежність морфології та діаметра вхідного мікроотвору від ширини імпульсу представлено на рис. 6 і 7. Зі збільшенням ширини імпульсу форма входу мікроотвору змінилася з круглої на хвилясту, що може бути спричинено полікристалічною природою CVD алмазної плівки. Як уже зазначалося, необроблена поверхня CVD алмазної плівки була шорсткою і складалась з грубих пірамідальних зерен різної орієнтації, що могло призвести до різниці в швидкості видалення матеріалу. Середній діаметр вхідного отвору мікроотвору коливався між 51,2 і 53 мкм, що суттєво не вплинуло на ширину імпульсу. На вході в мікроотвори були видно гофровані шаруваті структури. Оскільки мікроотвори утворюються за допомогою наносекундного імпульсного лазерного сканування протягом сотень разів сканування за заданими траєкторіями, поверхня стінки мікроотвору характеризується пошаровим видаленням матеріалу [26].

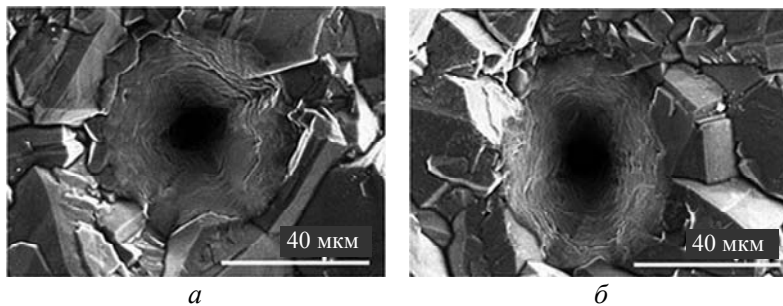


Рис. 6. Морфологія вхідних отворів мікроотворів при різній довжині лазерного імпульсу: 14 (а), 20 (б), 30 (в), 50 (д) і 100 (е) нс.

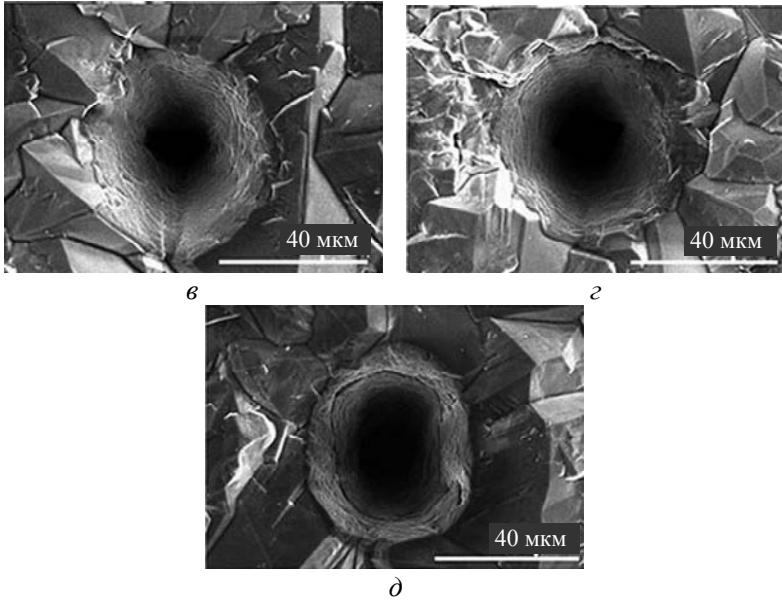


Рис. 6. (Продовження).

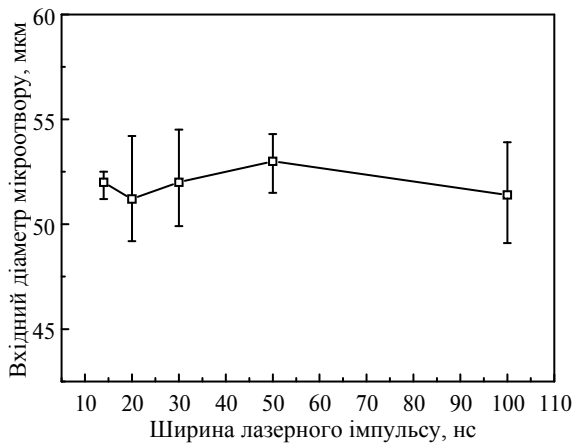


Рис. 7. Вплив ширини лазерного імпульсу на вхідний діаметр мікроотвору.

На рис. 8 показано морфологію виходу мікроотвору при ширині імпульсу 50 і 100 нс. Коли ширина імпульсу становила 50 і 100 нс, діаметр виходу мік

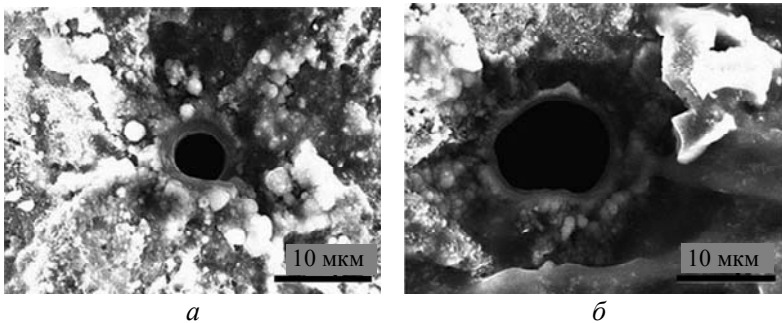


Рис. 8. Морфологія виходу мікроотворів при різній довжині лазерного імпульсу: 50 (а) і 100 (б) нс.

роотвору був 5,7 і 10,6 мкм відповідно. Таким чином, це вказує на те, що велика ширина імпульсу з високою його енергією створює на CVD алмазній плівці вихідні мікроотвори з великим діаметром, що узгоджується з результатами, представленими на рис. 4 і 5.

Як правило, розподіл енергії в цятки лазерного променя є гауссовим [40], інтенсивність лазера поступово зростає від краю до центру, як показано на рис. 9, а. Крім того, утворились мікроотвори, що мають великий верхній отвір і малий нижній отвір, завдяки чому на поверхню стінки впливає нерівномірна ерозія розплавленого матеріалу, а інтенсивність лазерного променя змінюється по глибині мікроотвору [41]. На початковій стадії процесу лазерної абляції алмазу взаємодія лазерного променя і алмазної плівки утворює графіт під час пошарового зростання [26] (див. рис. 9, б). Через великий градієнт температури від поверхні до внутрішньої частини алмазної плівки, аблятований графіт і подальше випаровування утворюють велику кількість газоподібного вуглецю, як це чітко видно на рис. 9, в. Потім газоподібний вуглець окислюється киснем у повітрі, утворюючи оксид вуглецю та діоксид вуглецю, або частина його швидко охолоджується, утворюючи графітові наночастинки, які агрегуються на стінці після припинення дії лазерного променя. Крім того, зі збільшенням глибини отвору та збільшення кількості видаленого матеріалу атоми вуглецю, що випаровуються, поглинають частину енергії лазера і зменшують його енергію, що досягає мінімуму [42]. Отже,

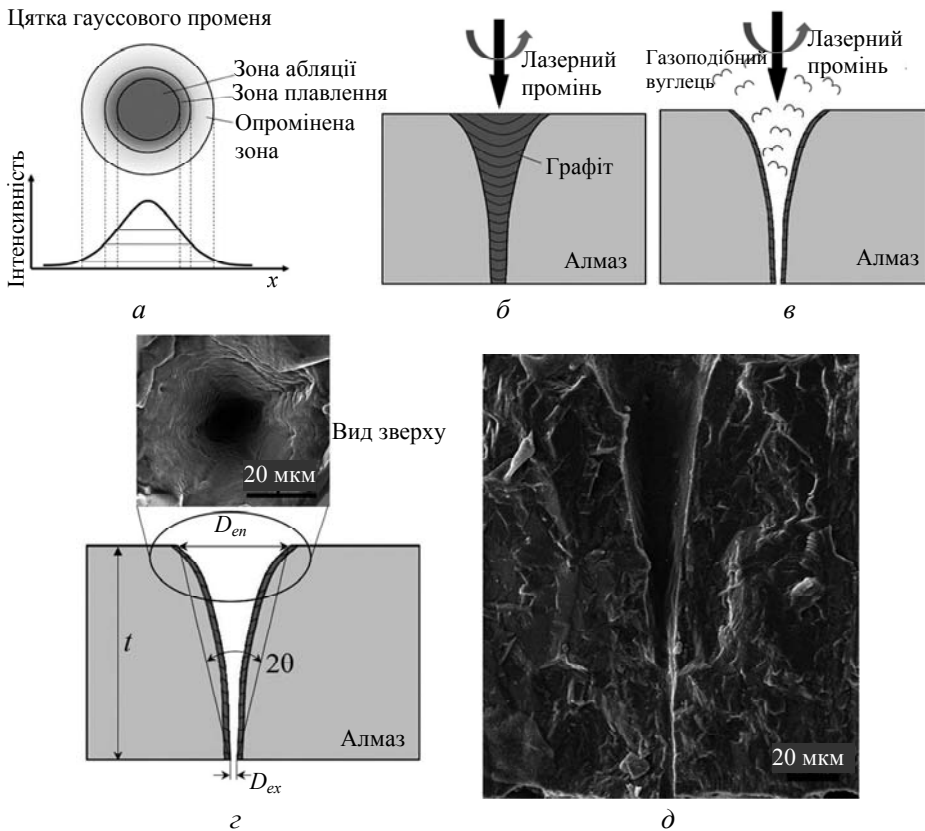


Рис. 9. Принципова схема процесу лазерної абляції: а – гауссова модель розподілу енергії лазерного променя; б – графітізація алмазу, індукована лазером; в – газоподібний вуглець, що утворюється через випаровування графіту; г – конічний отвір, сформований у формі рогу; д – морфологія поперечного перерізу мікроотвору, отримана лазерною обробкою.

тенденція до збільшення обсягу видаленого матеріалу вниз отвору поступово сповільнюється, далі стабілізується і утворюється конічний отвір у формі рогу, як показано на рис. 9, δ і z . Враховуючи вид алмазної плівки зверху, наведений на рис. 9, δ , можна визначити пошаровий режим видалення на стінці мікроотвору. Для того, щоб визначити звуження мікроотвору, можна використати таке рівняння [43]:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{D_{en} - D_{ex}}{2t}, \quad (3)$$

де θ – кут конусності; D_{en} – діаметр вхідного отвору мікроотвору; D_{ex} – діаметр виходу мікроотвору; t – глибина мікроотвору. На рис. 10 можна помітити, що ширина імпульсу суттєво впливає на кут конусності, що зменшувався зі збільшенням ширини імпульсу. Про подібні результати також повідомляють Mishra і Yadava [39].

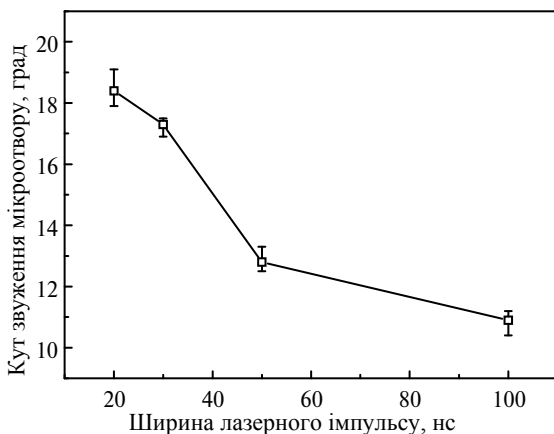


Рис. 10. Вплив ширини лазерного імпульсу на кут звуження мікроотвору.

Вплив швидкості лазерного сканування на мікроотвори

На рис. 11 показано морфологію поперечного перерізу мікроотворів при різних швидкостях лазерного сканування. Зі збільшенням швидкості сканування форма поперечного перерізу не зазнала значного впливу. Коли ширина лазерного імпульсу становила 50 нс, а час сканування – 600, перерізи мікроотворів мали типову форму рогу. При низькій (50 нс) ширині імпульсу діаметр мікроотвору в середній і нижній частинах був невеликим при різних швидкостях сканування. Поверхня мікроотворів була відносно гладкою, не спостерігали повторно нанесених осаджених частинок графіту, особливо на у верхній частині. Стінки поверхні всіх мікроотворів були досить схожі між собою.

Зміна швидкості лазерного сканування мало впливає на форму входу в мікроотвір, і на їх стінці можна спостерігати шарувату структуру, сформовану імпульсним лазером, подібну до тієї, що зображена на рис. 6. Діаметр вхідного отвору для мікроотворів дещо зменшився зі збільшенням швидкості лазерного сканування (рис. 12). Збільшення швидкості лазерного сканування зменшує коефіцієнт перекриття цяток і кількість імпульсів під час обробки, збільшує поріг абляції алмазної плівки і зменшує площу лазерної абляції [44].

Морфологію виходу мікроотвору представлено на рис. 13. Деякі частинки агрегуються на виході з мікроотвору, що могло бути спричинено осадженими частинками графіту, утвореними з алмазу під час лазерної обробки. Під час

обробки лазерним променем випаровування поверхневого шару та графітизація дна відбувається одночасно [36], отже, можна зробити висновок, що при отриманні наскрізних мікроотворів матеріал навколо виходу мікроотвору є графітизованим. Однак цей механізм потребує подальшого детального вивчення.

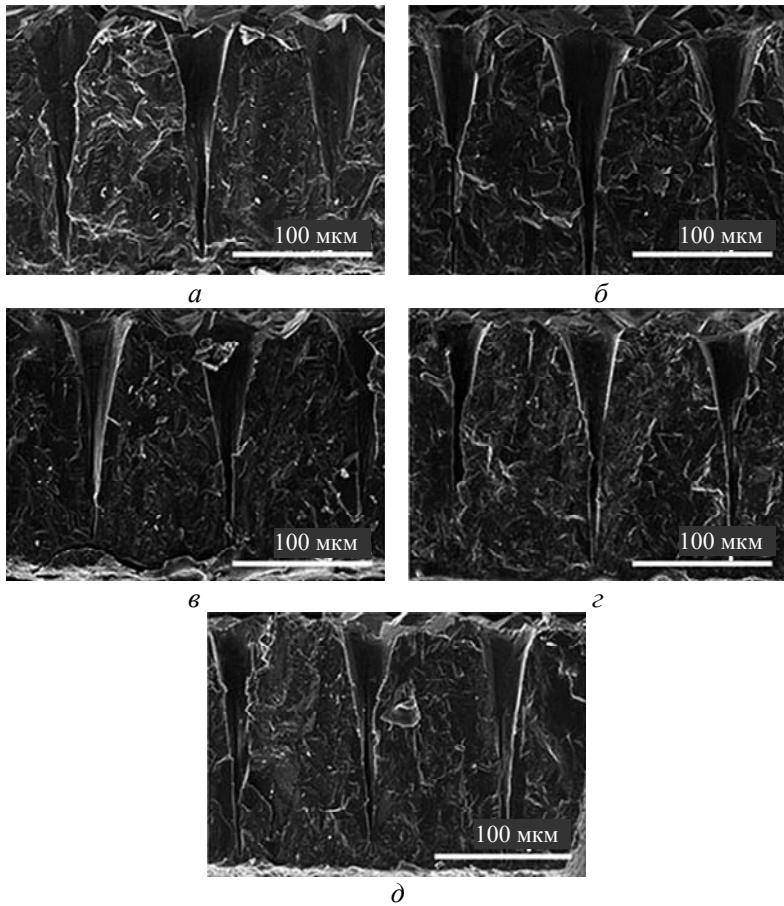


Рис. 11. Морфологія поперечного перерізу мікроотворів при різних швидкостях лазерного сканування: 100 (а), 200 (б), 300 (в), 400 (г) і 500 (д) мм/с.

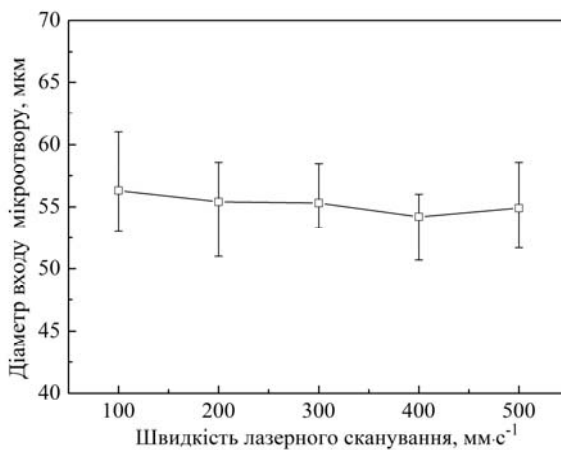


Рис. 12. Вплив швидкості лазерного сканування на вхідний діаметр мікроотвору.

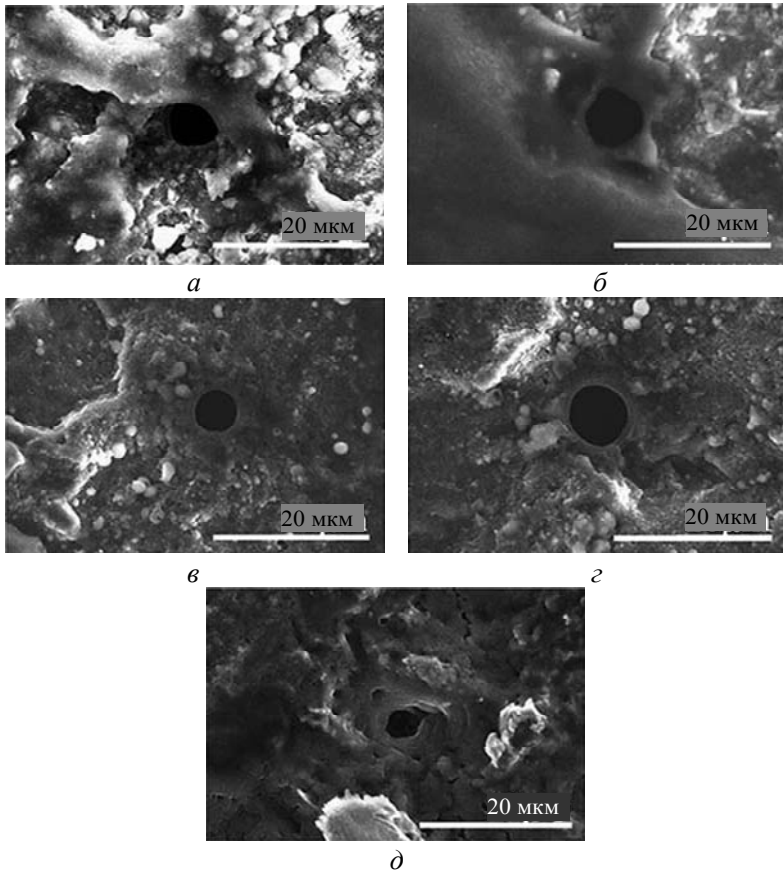


Рис. 13. Морфологія виходу мікроотворів при різних швидкостях лазерного сканування: 100 (а), 200 (б), 300 (в), 400 (г), 500 (д).

На рис. 14 представлено вплив швидкості лазерного сканування на діаметр виходу мікроотвору. Видно, що є незначна залежність між швидкістю лазерного сканування та діаметром виходу. Через те, що CVD алмазна плівка є полікристалічним матеріалом, випадкова орієнтація зерен та розподіл зерен на межі можуть призвести до випадкової зміни швидкості видалення матеріалу на виході з мікроотвору.

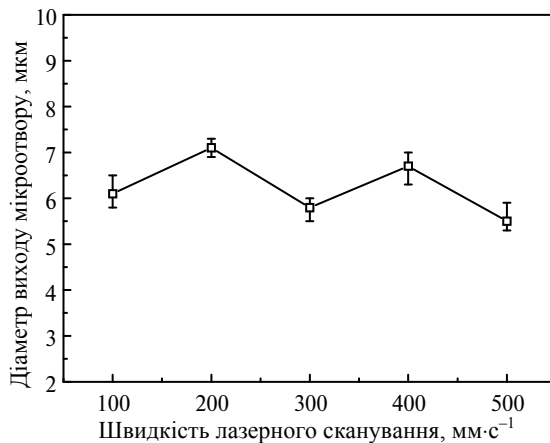


Рис. 14. Вплив швидкості лазерного сканування на діаметр виходу мікроотвору.

Вплив швидкості лазерного сканування на кут конусності мікроотвору представлено на рис. 15. Видно, що отриманий кут конусності мало змінюється зі збільшенням швидкості сканування в діапазоні від $6,8^\circ$ до $7,2^\circ$.

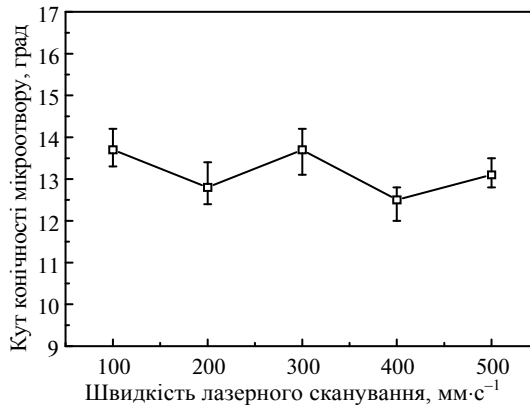


Рис. 15. Вплив швидкості лазерного сканування на кут звуження мікроотвору.

Вплив часу лазерного сканування на параметри мікроотворів

На рис. 16 показано морфологію поперечного перерізу мікроотвору з часом сканування 200, 600 і 1000, коли ширина імпульсу і швидкість сканування **ж** дорівнювали 50 нс і 300 мм/с відповідно. Зі збільшенням часу сканування форма мікроотвору змінилася з форми рогу на конічний отвір. На рис. 16, *a* не видно нижню частину мікроотвору. Це пов'язано з тим, що коли CVD алмазну плівку розломали на дві частини, деякі мікроотвори було розділено не вздовж центральної лінії мікроотвору.

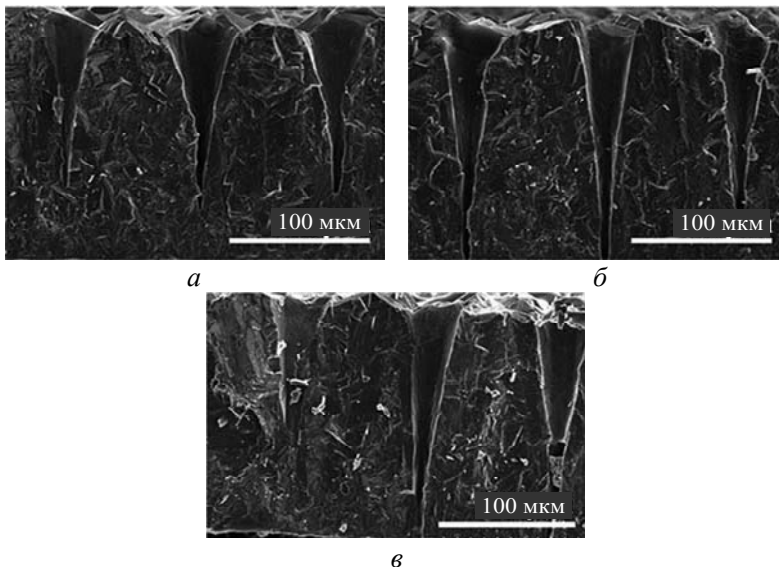


Рис. 16. Морфологія поперечного перерізу мікроотвору при різному часі лазерного сканування: 200 (*a*), 600 (*б*), 1000 (*в*) проходів.

Залежність діаметра входу мікроотвору при різному часі лазерного сканування показано на рис. 17. Встановлено, що час сканування мало впливав на

морфологію та діаметр входу мікроотвору, зокрема, діаметр входу мікроотвору дорівнював ~ 50 мкм.

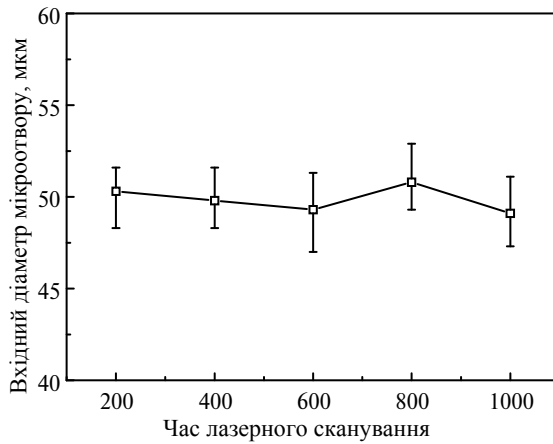


Рис. 17. Вплив часу лазерного сканування на вхідний діаметр мікроотвору.

Діаметр виходу мікроотвору значно збільшився зі збільшенням часу сканування (рис. 18), він змінювався від 4,6 до 8,1 мкм, коли час сканування збільшувався з 200 до 1000 проходів. Zhang та ін. [42] повідомляли, що монокристалічний алмаз аблятувався наносекундним лазером, ширина і глибина канавок збільшувались зі збільшенням часу лазерного сканування, а це означає, що збільшення часу лазерного сканування збільшує накопичення енергії лазера на дні мікроотвору. Збільшення часу сканування – це збільшення кількості імпульсів, що опромінюють алмазну плівку під час її обробки. Збільшення кількості імпульсів спричиняє збільшення загальної енергії, яка подається до матеріалу [45], що приводить до збільшення діаметрів виходу та випромінювання отворів.

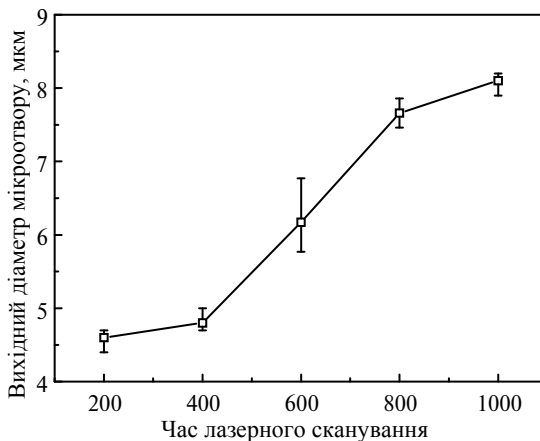


Рис. 18. Вплив часу лазерного сканування на діаметр виходу мікроотвору.

На рис. 19 показано вплив часу сканування на кут конусності мікроотвору, що зменшується зі збільшенням часу сканування. Це пов'язано зі збільшенням діаметра виходу мікроотвору. Кут конусності мікроотвору, отриманий за

1000 проходів під час сканування, був менше на $\sim 2^\circ$, ніж отриманий за 200 проходів.

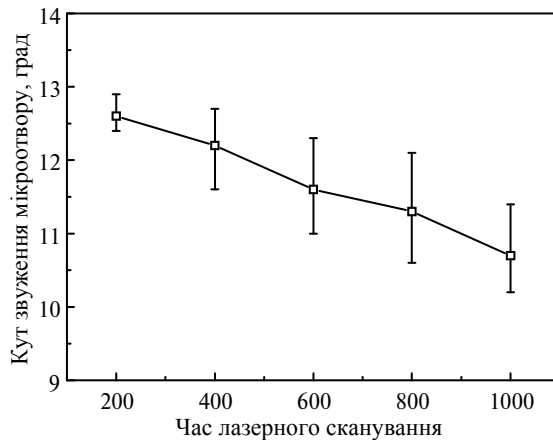


Рис. 19. Вплив часу лазерного сканування на кут звуження мікроотворів.

ВИСНОВКИ

Дослідження впливу параметрів лазерного променя (ширини імпульсу, швидкості та часу лазерного сканування) на форму та морфологію мікроотворів на CVD алмазній плівці показало наступне.

Конічні наскрізні мікроотвори з діаметром входу від 49,1 до 56,3 мкм, діаметром виходу від 4,6 до 10,6 мкм і кутом конусності менше $18,5^\circ$ було отримано за допомогою наносекундного імпульсного лазера, ширина імпульсу була більше 50 нс.

Коли ширина імпульсу була менше 50 нс, глибина глухого отвору збільшувалась зі збільшенням ширини імпульсу. Діаметр виходу мікроотвору суттєво збільшився зі збільшенням ширини імпульсу, тоді як кут конусності мікроотвору зменшився.

Зі збільшенням швидкості лазерного сканування діаметр вхідного отвору мікроотвору дещо зменшився, і було виявлено незначні зміни у вихідному діаметрі та куті конусності.

Зі збільшенням часу сканування діаметр виходу мікроотвору значно збільшився, тоді як кут конусності мікроотвору дещо зменшився.

ФІНАНСУВАННЯ

Автори вдячні за фінансову підтримку Національному фонду природничих наук Китаю (NSFC) за номерами грантів 51775118 та 51275096.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що конфлікту інтересів немає.

Yanling Liao¹, Fenglin Zhang¹, Peng Wang¹, Xiaozhu Xie¹,
Yumei Zhou², Delong Xie³

¹School of Mechanical and Electronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, P. R. China

²School of Mechanical and Electronic Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, P. R. China

The increasing demand for micro-parts and miniaturization of devices has led to development of manufacturing micro-holes on different materials. In this study, micro-hole arrays were drilled on a CVD diamond film using a nanosecond pulsed laser. The effect of laser processing parameters, such as pulse width, scanning speed, and scanning times on the shape, size, and morphology of micro-holes was investigated. The entrance, exit, and cross-sectional dimensions and morphology of the micro-holes were examined. The results demonstrated that micro-hole arrays with an entrance diameter of 49.1–56.3 μm , exit diameter of 4.6–10.6 μm , and taper angle of less than 18.5° can be obtained using a nanosecond pulsed laser. It was found that pulse width has little effect on entrance diameter, however, with the increase of pulse width, the micro-hole exit diameter and depth increased, while the taper angle decreased. With the increase of laser scanning speed, the micro-hole entrance diameter decreased slightly, and there is little variation in micro-hole exit diameter and taper angle. The scanning times were found to have little effect on micro-hole entrance diameter. However, with the increase of scanning times, the micro-hole exit diameter increased and the taper angle decreased.

Keywords: laser beam processing, micro-hole arrays, nanosecond pulsed laser, CVD diamond film, micromachining.

1. Fu Y., Miyamoto T., Natsu W., Zhao W., Yu Z. Study on influence of electrode material on hole drilling in micro-EDM. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 42. P. 516–520.
2. Reddy S., He L., Ramakrishana S. Miniaturized-electro-neurostimulators and self-powered/rechargeable implanted devices for electrical-stimulation therapy. *Biomed. Signal. Proces.* 2018 Vol. 41. P. 255–263.
3. Hasan M., Zhao J., Jiang Z. A review of modern advancements in micro drilling techniques. *J. Manuf. Process.* 2017. Vol. 29. P. 343–375.
4. Zhang L., Tong H., Li Y. Precision machining of micro tool electrodes in micro EDM for drilling array micro holes. *Precis. Eng.* 2015. Vol. 39. P. 100–106.
5. Ren Z.H., Zheng X.H., An Q.L., Wang C.Y. Chen M. Tool breakage feature extraction in PCB micro-hole drilling using vibration signals. *Adv. Mater.* 2012. Vol. 497. P. 126–131.
6. Rahman Z., Das A.K., Chattopadhyaya S., Microhole drilling through electrochemical processes: A review. *Mater. Manuf. Processes.* 2008. Vol. 33. no. 13. P. 1379–1405.
7. Aziz M., Ohnishi O., Onikura H., Novel micro deep drilling using micro long flat drill with ultrasonic vibration. *Precis. Eng.* 2012. Vol. 36, no. 1. P. 168–174.
8. Ahn Y., Lee S.H. Classification and prediction of burr formation in micro drilling of ductile metals. *J. Prod. Res.*, 2017. Vol. 55, no. 17. P. 4833–4846.
9. Zhang R., Li W., Liu Y., Wang C., Wang J., Yang X., Cheng L. Machining parameter optimization of C/SiC composites using high power picosecond laser, *Appl. Surf. Sci.*, 2015, Vol. 330. P. 321–331.
10. Saxena K.K., Qian J., and Reynaerts D., A review on process capabilities of electrochemical micromachining and its hybrid variants. *Int. J. Mach. Tool. Manu.* 2018. Vol. 127. P. 28–56.
11. Elsiti N.M., Noordin M.Y., and Alkali A.U., Fabrication of high aspect ratio micro electrode by using EDM. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016. Vol. 114, no. 1. P. 012046.
12. Nitta K., Inazawa S., Okada K., Nakajima H., Nohira T., Hagiwara R. Analysis of tungsten film electrodeposited from a ZnCl₂–NaCl–KCl melt. *Electrochimica Acta.* 2017. Vol. 53, no. 1. P. 20–23.
13. He J.F., Guo Z.N., Lian H.S., Liu J.W., Yao Z., and Deng Y., Experiments and simulations of micro-hole manufacturing by electrophoresis-assisted micro-ultrasonic machining. *J. Mater. Process. Tech.* 2019, Vol. 264. P. 10–20.
14. Meijer, J., Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities. *J. Mater. Process. Tech.* 2004. Vol.149. no.1–3. P. 2–17.
15. Mishra S., Yadava V. Laser beam micromachining (LBMM)—a review. *Opt. Laser Eng.* 2015. Vol. 73. P. 89–122.
16. Sui T.Y., Cui Y.X., Lin B., Zhang D.W. Influence of nanosecond laser processed surface textures on the tribological characteristics of diamond films sliding against zirconia bio-ceramic. *Ceram. Int.* 2018. Vol. 44, no. 18. P. 23137–23144.

17. Ito S., Nagai M., Matsumoto T., Inokuma T., Tokuda N. Self-separation of freestanding diamond films using graphite interlayers precipitated from C-dissolved Ni substrates. *J. Cryst. Growth*. 2017. Vol. 470. P. 104–107.
18. Feng W., Lu W., Zhou H., Yang B., Zuo D. Surface characterization of diamond film tool grinding on the monocrystal sapphire under different liquid environments. *Appl. Surf. Sci.* 2016, Vol. 387. P. 784–789.
19. Badzian A. Diamond challenged by hard materials: A reflection on developments in the last decades. *Mater. Chem. Phys.* 2001, Vol. 72. P. 110–113.
20. Jia X., Huang N., Guo Y., Liu L., Li P., Zhai Z., Yang B., Yuan Z., Shi D., Jiang X. Growth behavior of CVD diamond films with enhanced electron field emission properties over a wide range of experimental parameters. *J. Mater. Sci. Technol.* 2018. Vol. 34, no. 12. P. 2398–2406.
21. Xu H., Zang J., Tian P., Wang Y., Yu Y., Lu J., Xu X., Zhang P. Rapid grinding CVD diamond films using corundum grinding wheels containing iron. *Int. J. Refract. Met. H.* 2018. Vol. 71. P. 147–152.
22. Sun F.H., Zhang Z.M., Chen M., Shen H.S. Fabrication and application of high quality diamond-coated tools. *J. Mater. Process. Tech.* 2002. Vol. 129, no. 1–3. P. 435–440.
23. Nazari M., Hancock, B.L., Anderson J., Hobart, K.D., Feygelson T.I., Tadjer, M.J., Pate B.B., Anderson T.J., Piner, E.L., Holtz M.W. Optical characterization and thermal properties of CVD diamond films for integration with power electronics. *Solid-State Electron.* 2017. Vol. 136. P. 12–17.
24. Yan X., Wei J., An K., Zhao Y., Liu J., Chen L., Hei L., Li C. Quantitative study on graphitization and optical absorption of CVD diamond films after rapid heating treatment. *Diam. Relat. Mater.* 2018. Vol. 87. P. 267–273.
25. Luo D., Nakata K., Fujishima A., Liu S., Photochemistry and photo-electrochemistry on synthetic semiconducting diamond. *J. Photoch. Photobio. C.*, 2017, Vol. 31. P. 139–152.
26. Ohfujii H., Okuchi T., Odake S., Kagi H., Sumiya H., Irifune T. Micro-/nanostructural investigation of laser-cut surfaces of single- and polycrystalline diamonds. *Diam. Relat. Mater.* 2010, Vol. 19, no. 7–9. P. 1040–1051.
27. Windholz R., Molian P. A. Nanosecond pulsed excimer laser machining of chemically vapour-deposited diamond and graphite: Part II Analysis and modeling. *J. Mater. Sci.* 1998. Vol. 33, no. 2. P. 523–528.
28. Strelakov V.N., Konov V.I., Kononenko V.V., Pimenov S.M. Early stages of laser graphitization of diamond. *Appl. Phys. A. Mater.* 2003. Vol. 76, no. 4. P. 603–607.
29. Picollo F., Rubanov S., Tomba C., Battiato A., Enrico E., Perrat-Mabilon A., Peaucelle C., Tran Thi T.N., Boarino L., Gheeraert E., Olivero P., Effects of high-power laser irradiation on sub-superficial graphitic layers in single-crystal diamond. *Acta Mater.* 2016. Vol. 103. P. 665–671.
30. Butler-Smith P.W., Axinte D.A., Pacella M., Fay M.W. Micro/nanometric investigations of the effects of laser ablation in the generation of micro-tools from solid CVD diamond structures. *J. Mater. Process. Tech.* 2013. Vol. 213, no. 2. P. 194–200.
31. Lin J.F., Lin J.W., Wei P.J. Thermal analysis for graphitization and ablation depths of diamond films. *Diam. Relat. Mater.* 2006. Vol. 15. no. 1. P. 1–9.
32. Guo B., Zhao Q., Fang X. Precision grinding of optical glass with laser micro-structured coarse-grained diamond wheels. *J. Mater. Process. Tech.* 2014. Vol. 214, no. 5. P. 1045–1051.
33. Kononenko T. V., Ralchenko V.G., Vlasov I.I., Garnov S.V., Konov V.I., Ablation of CVD diamond with nanosecond laser pulses of UV–IR range. *Diam. Relat. Mater.*, 1998, Vol. 7, no. 11–12. P. 1623–1627.
34. Kononenko T.V., Komlenok, M.S., Pashinin V.P., Pimenov S.M., Konov V.I., Neff M., Romano V., Lüthy W. Femtosecond laser microstructuring in the bulk of diamond. *Diam. Relat. Mater.* 2009. Vol. 18 no. 2–3. P. 196–199.
35. Odake S., Ohfujii H., Okuchi T., Kagi H., Sumiya H., Irifune T. Pulsed laser processing of nano-polycrystalline diamond: A comparative study with single crystal diamond. *Diam. Relat. Mater.* 2009. Vol.18, no. 5–8. P. 877–880.
36. Kononenko T.V., Konov V.I., Garnov S.V., Klimentov S.M., Dausinger F. Dynamics of deep short pulse laser drilling: ablative stages and light propagation. *Laser Phys.* 2001. Vol. 11, no. 3. P. 343–351.

37. Marimuthu S., Dunleavy J., Liu Y., Smith B., Kiely A., Antar, M. Characteristics of hole formation during laser drilling of SiC reinforced aluminium metal matrix composites. *J. Mater. Process. Tech.* 2019. Vol. 271. P. 554–567.
38. Hanon M.M., Akman E., Oztoprak, B.G., Gunes M., Taha Z.A., Hajim, K.I., Kacar, E., Gundogdu O., Demir, A., Experimental and theoretical investigation of the drilling of alumina ceramic using Nd: YAG pulsed laser. *Opt. Laser Technol.* 2012. Vol. 44, no. 4. P. 913–922.
39. Mishra S., Yadava V., Modelling of hole taper and heat affected zone due to laser beam percussion drilling. *Mach. Sci. Technol.* 2013. Vol. 17, no. 2. P. 270–291.
40. Wu M., Guo B., Zhao Q., He P., Zeng Z., Zang J. The influence of the ionization regime on femtosecond laser beam machining mono-crystalline diamond. *Opt. Laser Technol.* 2018. Vol. 106. P. 34–39.
41. Li L., Low D.K.Y., Ghoreshi M., Crookall J.R. Hole taper characterisation and control in laser percussion drilling. *CIRP Ann. Manuf. Techn.* 2002. Vol. 51, no. 1. P. 153–156.
42. Zhang Z., Zhang Q., Wang Q., Su H., Fu Y., Xu J. Investigation on the material removal behavior of single crystal diamond by infrared nanosecond pulsed laser ablation. *Opt. Laser Technol.* 2020. Vol. 126. P. 106086
43. Das D.K., Pollock T.M. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy. *J. Mater. Process. Tech.* 2009, Vol. 209, no. 15–16. P. 5661–5668.
44. Dou J., Sun Y., Xu M., Cui J., Mei X., Wang W., Wang X. Process research on micro-machining diamond microgroove by femtosecond laser. *Integr. Ferroelectr.* 2019. Vol. 198, no. 1. P. 9–19.
45. Nawaz S., Awan M.B., Saeed B., Abbas N. Experimental investigation of taper angle during millisecond laser drilling of 18CrNi8 steel under multiple parameters and defocused plane. *Mater. Res. Express.* 2019. Vol. 6, no. 8. P. 086531.

Надійшла до редакції 13.08.20

Після доопрацювання 19.10.20

Прийнята до опублікування 21.10.20