

Jialin Liu^{1,2,*}, Zhibin Lin¹, Yongqian Chen¹, Shirui Guo^{1,2},
Yinghao Cui^{1,2}, Xiaolei Li^{1,2}, Bo Zheng^{1,2}, Yue Zhao^{1,2},
Lujun Cui^{1,2}, Shuai Wang³, Lei Wang⁴, Minghui Gu^{1,4},
Quanbin Du⁴, Xiaolu Wang⁵

¹School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, China

²Zhengzhou Key Laboratory of Laser Additive Manufacturing Technology, Zhengzhou, China

³Beijing Dynaflo Lab Solutions Co., Ltd, Beijing, China

⁴Henan Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment Integration for Superhard Materials, Zhengzhou, China

⁵Henan Key Laboratory of General Aviation Technology, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou, China

*liujialin60761@163.com

Механізм видалення матеріалу PcBN за допомогою фемтосекундного лазера

Здійснено порівняння механізмів видалення матеріалу і теплових ефектів нано- і фемтосекундних лазерів на полікристалічному кубічному нітриді бору (PcBN). З використанням наносекундного 35 кГц і фемтосекундного 800 кГц лазерів, проаналізовано морфологію поверхні та фазову еволюцію за допомогою РЕМ, ЕДС і РД. Результати показали, що фемтосекундні лазери переважно видаляють зв'язувальну речовину AlN за допомогою ультракоротких імпульсів – випаровування є переважачим за енергією імпульсу 0,5 Вт, тоді як руйнування cBN відбувається за 1,3 Вт. Наносекундні лазери індують фазовий перехід cBN в hBN і отримання шорсткуватої поверхні через накопичення тепла. За потужності 10 Вт фемтосекундного лазера виникають канавки, що мають гладкі стінки, тоді як наносекундні лазери утворюють тріщини і змінюють поверхневі шари. Рентгенографія підтвердила відсутність фази hBN у зонах, оброблених фемтосекундним лазером, але незначні піки hBN у зразках, оброблених наносекундним лазером. Фемтосекундні лазери з високою частотою повторення демонструють чудову продуктивність у мінімізації термічних пошкоджень і підвищенні якості обробки.

Ключові слова: лазерна абляція, фемтосекундний лазер, PcBN, морфологічний аналіз.

ВСТУП

Полікристалічний кубічний нітрид бору (PcBN) має унікальні фізичні властивості, такі як висока твердість, відмінна хімічна корозійна стійкість та високотемпературна міцність, через що його широко застосовують у прецизійній обробці, аерокосмічній та інших галузях [1, 2]. Дослідження композитів на основі cBN (наприклад, cBN–Si₃N₄–SiCw, cBN–VC–Al), де кубічний нітрид бору (cBN) слугує основним компонентом матеріалів PcBN, продемонстрували, що оптимізація складу (наприклад, включення вусів SiC

або добавок VC–Al) може ефективно підвищити ударну зносостійкість та стійкість до стирання матеріалів в умовах складного різання [3, 4]. Крім того, дослідження показали, що нанесення мікротекстури на поверхню інструменту сприяє збільшенню терміну служби інструменту та оптимізації продуктивності [5]. У [6] використовували текстуровані інструменти з PcBN для твердого сухого точіння підшипникової сталі та виявили, що мікротекстури, розташовані далі від кромки, з більшою відстанню та меншою глибиною, привели до значного зменшення сили різання та тертя. І навпаки, у [7] експериментально встановили, що інструменти з мікротекстурою демонструють підвищену силу різання порівняно з інструментами без текстури. Однак, завдяки широкому впровадженню лазерних технологій в останні роки, лазерна обробка поверхні матеріалів PcBN стала актуальною темою досліджень.

В останні роки для лазерної обробки поверхонь матеріалів PcBN переважно використовують нано- і пікосекундні лазери, водночас було досягнуто значного прогресу в дослідженнях різних взаємодій лазера з матеріалами [8]. У 2016 році в [9] досліджували вплив параметрів нано- і пікосекундних лазерів (енергії імпульсу та щільності енергії) на глибину абляції композитів PcBN з високим вмістом cBN. Слід зазначити, що надмірно низька енергія імпульсу негативно впливає на якість обробки, оскільки значне поглинання енергії лазера матеріалом-мішенню викликає накопичення тепла та термічне пошкодження. У [8] дослідили вплив параметрів обробки пікосекундним лазером на швидкість та ефективність об'ємної абляції, шорсткість поверхні та раманівські спектри вибраних зразків. Однак ці дослідження зосереджено переважно на обробці PcBN нано- і пікосекундними лазерами. З удосконаленням технології використання фемтосекундних лазерів в останні роки, їх стали застосовувати для обробки надтвердих матеріалів. Технологія обробки фемтосекундним лазером має унікальні переваги, зокрема надкороткий імпульс ($\sim 10^{-15}$ с) і надвисоку пікову потужність (зазвичай 10^9 – 10^{12} Вт/см²). У порівнянні з короткоімпульсними нано- і пікосекундними лазерами, надшвидкі фемтосекундні лазери забезпечують вищу пікову потужність, зменшують зони термічного впливу (ЗТВ) та забезпечують точні пороги абляції [10–12]. Додатково досліджували обробку фемтосекундним лазером та її вплив на морфологію і твердість PCD та PcBN [13, 14]. У [13] спостерігали, що в разі нижчих швидкостей подачі абляція стає більш вираженою в композитах PcBN із вмістом cBN, якій дорівнював 65 %, що значно збільшує шорсткість поверхні в оброблених ділянках.

Однак протягом останніх кількох років більшість досліджень з обробки матеріалів PcBN фемтосекундним лазером було зосереджено на впливі різних параметрів лазера на якість і морфологію поверхні, тоді як механізми взаємодії між фемтосекундними лазерами та PcBN залишаються недостатньо вивченими. У 2015 році досліджували вплив енергії фемтосекундних лазерних джерел на ефективність видалення матеріалів PcBN за допомогою спостереження фазового перетворення cBN з кубічної алотропної форми в гексагональний нітрид бору (hBN) в PcBN [15]. У 2020 році було проведено експерименти з використанням методу одноімпульсної абляції, щоб визначити поріг абляції матеріалів PcBN під час обробки фемтосекундним лазером [16]. Хоча ці дослідження сприяли з'ясуванню механізмів обробки матеріалів PcBN фемтосекундним лазером, у сучасних дослідженнях переважно використовують фемтосекундні лазери з низькою частотою повторення. Фемтосекундна лазерна обробка з високою частотою повторення все ще виявляє теплові ефе-

кти, і механізми видалення матеріалу в таких умовах залишаються недостатньо вивченими. Тому це дослідження має на меті усунути ці прогалини в дослідженнях фемтосекундної лазерної обробки за допомогою експериментальних досліджень.

У цьому дослідженні було використано 35-кілогерцову наносекундну і 800-кілогерцову фемтосекундну лазерні системи для дослідження морфології поверхні матеріалів PcBN в умовах низької та високої потужності за допомогою фемтосекундної лазерної обробки з високою частотою повторення. Нові способи видалення матеріалу під час обробки аналізували за допомогою растрового електронного мікроскопа (РЕМ), енергодисперсійної спектроскопії (ЕДС) та рентгенівської дифракції (РД). У порівнянні з матеріалами PcBN, обробленими наносекундним лазером, було з'ясовано відмінності між обробкою високочастотним фемтосекундним та наносекундним лазерами, що заклало основу для просування застосувань високочастотних фемтосекундних лазерних установок в обробці матеріалів PcBN.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗРАЗКИ

Підготовка матеріалів

Експериментальним матеріалом був полікристалічний кубічний нітрид бору (PcBN, марка PcBNФ1304Р), вироблений компанією “Henan Huanghe Whirlwind Co.”, Ltd. Він складається з частинок cBN, зв'язаних і заповнених керамічною зв'язувальною фазою AlN, виготовлених методом прокатки, із середнім розміром частинок cBN 6 мкм. Експериментальні зразки були розміром 4×4 мм, їхній зовнішній вигляд показано на рис. 1, а. Хімічний склад матеріалу PcBN наведено в таблиці.

Хімічний склад матеріалу PcBN

Елемент	B	N	Al	Co	W	O	Інше
Склад, % (за масою)	42,23	46,70	5,74	0,02	0,59	4,69	0,03

На рис. 1, а зображено морфологію експериментального зразка PcBN, отриману за допомогою РЕМ. Тріщини на поверхні зразка свідчать про відшарування зв'язувального матеріалу, водночас чітко видно частинки cBN. Відшарування металеві фази зв'язувального матеріалу також спостерігали на поверхні. На рис. 1, б представлено ЕДС картування поверхні зразка, яке демонструє, що поверхня переважно покрита Al, тоді як розподіл елемента В виявлено в порах. Це вказує на те, що поверхня зразка PcBN після спікання за високої температури та високого тиску складається переважно із зв'язувального матеріалу.

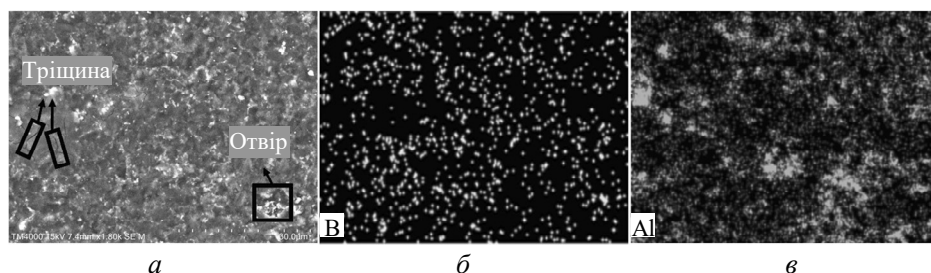
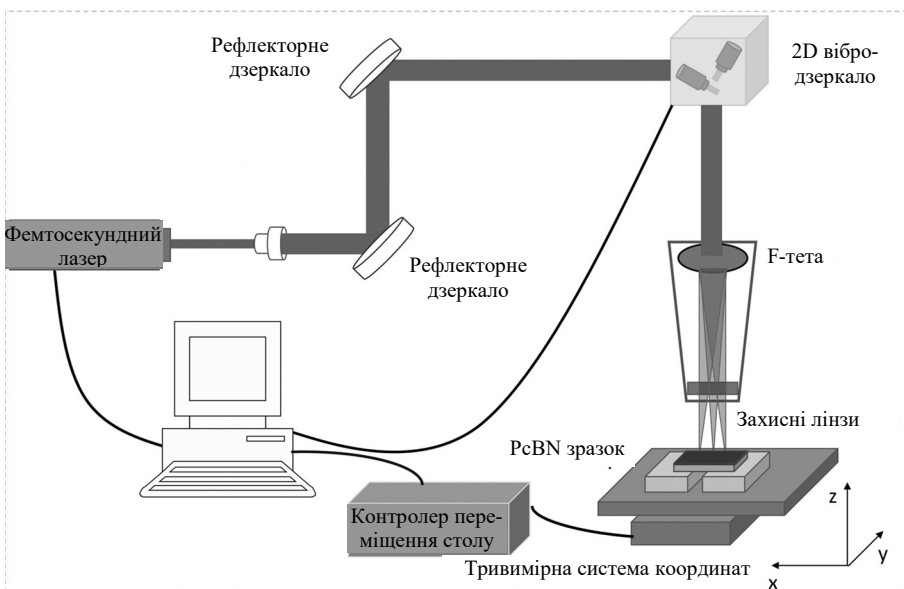


Рис. 1. Приклад блок-схеми перед експериментом (а); розподіл елементів В (б) і Al (в).

Метод лазерної обробки

Мікроканавки в РсBN в цьому експерименті були сформовані за допомогою наносекундного і високочастотного фемтосекундного лазерів. Рис. 2 ілюструє принципову схему експериментальної установки. В експерименті використовували фемтосекундний лазер Femot-50 (“Wuhan Huaray Precision Laser Co.”, Ltd, Китай) з тривалістю імпульсу 350 фс, середньою потужністю 40 Вт, якістю променя $M^2 \sim 1,3$, кута розбіжності променя $\sim 0,5$ мрад (повний кут), довжини хвилі 1034 нм, частоти повторення 800 кГц. Діаметр сфокусованої плями після F-тета лінзи становив 15 мкм. Для порівняння, у наносекундній системі лазерної обробки використовують довжину хвилі 1034 нм, тривалість імпульсу 85 нс, частоту повторення 35 кГц, максимальну потужність 11 Вт і діаметр сфокусованої плями 15 мкм. Лазерну обробку проводили на повітрі з подачею газу під високим тиском, щоб мінімізувати утворення переплавленого шару в канавках і зменшити погрішності обробки.



Авторами досліджено механізми видалення матеріалу під час фемтосекундної лазерної обробки матеріалів РсBN в умовах високої та низької частоти повторення, а швидкість сканування контролювали за допомогою 2D гальванометричного сканера. Щоб дослідити вплив високої частоти повторення на поверхневу абляцію РсBN, потужність лазера варіювали в діапазоні 0,5–10 Вт, швидкість сканування за такої умови становила 100 мм/с.

Характеристика мікроструктури та властивостей

Морфологію поверхні мікроканавок було проаналізовано за допомогою настільного сканувального електронного мікроскопа Hitachi (PEM, модель TM4000Plus), а елементний склад поверхні було охарактеризовано за допомогою програмного забезпечення для ЕДС аналізу від BRUKER. Фазовий склад матеріалу РсBN до і після лазерної обробки оцінено за допомогою рентгенівського дифрактометра (модель HAOYUAN-DX02700BH).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз морфології поверхні

Для дослідження механізмів видалення матеріалу нано- і фемтосекундними лазерами з високою частотою повторення на матеріалах РсBN в експерименті для обробки спочатку використовували фемтосекундний лазер з частотою 800 кГц. Матеріал РсBN обробляли за середньої потужності лазера 0,5 Вт. Результати експерименту показано на рис. 3.

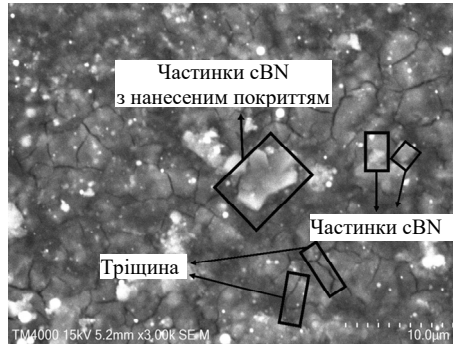


Рис. 3. РЕМ-зображення поверхні РсBN, обробленої лазером середньою потужністю 0,5 Вт.

Як показано на рис. 3, під час сканування поверхні РсBN з потужністю лазера 0,5 Вт спостерігали нерівномірні тріщини, що розходяться в різних напрямках. Ці тріщини виникають через невідповідність теплових властивостей зв'язувального матеріалу та частинок сBN [17]. Лазерний промінь багаторазово відбивається всередині тріщин, і видалення зв'язувального матеріалу відбувається за допомогою лазерної абляції [18]. Високотемпературне плавлення фази зв'язувального матеріалу, викликане великою потужністю лазера, залишає на обробленій поверхні об'єкта обробки крихлі, майже сферичні фрагменти переплавленого матеріалу, які пов'язані з повторним осадженням і рекристалізацією зв'язувального матеріалу, що призводить до нерівної і шорсткої морфології поверхні. На рис. 4 показано динамічний механізм цього процесу.

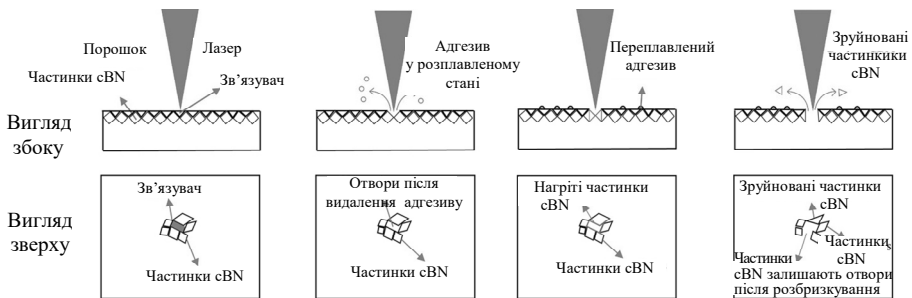


Рис. 4. Динамічний механізм фемтосекундного лазерного сканування РсBN.

Під час обробки фемтосекундним лазером, після видалення зв'язувальної фази, частинки сBN на поверхні матеріалу можуть відокремлюватися. Межі відокремлених частинок сBN не мають ознак пошкоджен-

ня, що вказує на те, що їхнє відокремлення відбувається природним способом після видалення зв'язувального матеріалу. На цьому етапі середня потужність лазера досягає порогу абляції зв'язувальної фази, але залишається нижчою за поріг абляції частинок cBN, і частинки cBN залишаються недоторканими. Результати експериментів показують, що обробка матеріалів PcBN фемтосекундним лазером з частотою 800 кГц відбувається у два етапи. По-перше, через значну різницю в порогах абляції між фазою зв'язувального матеріалу та частинками cBN (порог для зв'язувального матеріалу значно нижчий) фаза зв'язувального матеріалу під час обробки випаровується під дією тепла. Хоча обробка фемтосекундним лазером зазвичай класифікується як "холодний" процес, ультракороткі інтервали імпульсів за високої частоти повторення (коротші за час теплової релаксації зв'язувальної фази) викликають локальне накопичення тепла і підвищення температури. Надвисока пікова потужність фемтосекундного лазера миттєво випаровує матеріал з утворенням плазми з високою температурою і високим тиском. Розширення плазми створює ударні хвилі [19], які викидають розплавлені або неповністю випарені частинки зв'язувального матеріалу з утворенням сферичних фрагментів переплавленого матеріалу на поверхні PcBN [20]. Отже, на першій фазі обробки PcBN фемтосекундним лазером з високою частотою повторення переважає видалення зв'язувальної фази.

Для дослідження другої фази механізму видалення матеріалу під час високочастотної фемтосекундної лазерної обробки матеріалів PcBN в експерименті використовували лазер потужністю 1,3 Вт. Результати експерименту показано на рис. 5.

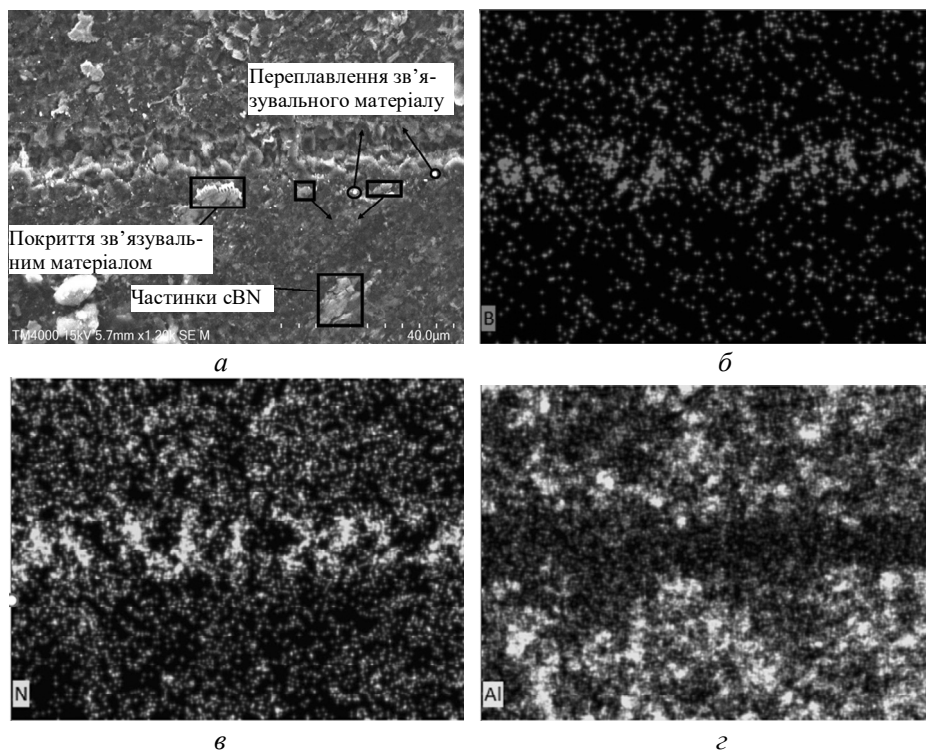


Рис. 5. Обробка мікроканалів фемтосекундним лазером потужністю 1,3 Вт: РЕМ-зображення зразка (а), розподіл елементів В (б), N (в) і Al (г).

На рис. 5, а показано мікроканавку, оброблену фемтосекундним лазером з частотою 800 кГц і середньою потужністю 1,3 Вт. У мікроканавці чітко видно переплавлений зв'язувальний матеріал, утворений в результаті абляції. Крім білого переплавленого матеріалу, спостерігали частинки cBN з чіткими краями і ознаками пошкодження меж. Частинки блоків, ідентифіковані як cBN за допомогою ЕДС аналізу та порівняння розмірів, розподілені навколо мікроканавки. Деякі частинки безпосередньо оголені, а інші залишаються частково інкапсульованими зв'язувальною фазою. На рис. 5, б і в видно, що Al переважно розподілений поза мікроканавкою, тоді як B зосереджений усередині мікроканавки. Це підтверджує, що внутрішня частина мікроканавки складається переважно з частинок cBN. Після першого етапу обробки PcBN видалення поверхневого зв'язувального матеріалу за допомогою плавлення та випаровування оголює частинки cBN. За теорією плазмового розпилення [19], іони, що падають на поверхню мішені, передають частину енергії атомам ґратки в поверхневому шарі. Атоми, що отримують достатню енергію, можуть подолати поверхневий потенційний бар'єр і розпилюватися безпосередньо, тоді як інші залишаються в поверхневому шарі і викликають локальні вібрації та підвищення температури. Атоми з високою енергією генерують первинні імпульси, які зміщують сусідні атоми та ініціюють каскадні зіткнення [19]. Ці зіткнення поширюються, поки деякі атоми не досягнуть поверхні і не зникнуть. Як показано на рис. 6, в обробленій мікроканавці спостерігають численні частинки cBN з неушкодженими краями і гострими кутовими особливостями. Це вказує на те, що частинки cBN під час обробки фемтосекундним лазером розриваються, а не плавляться.

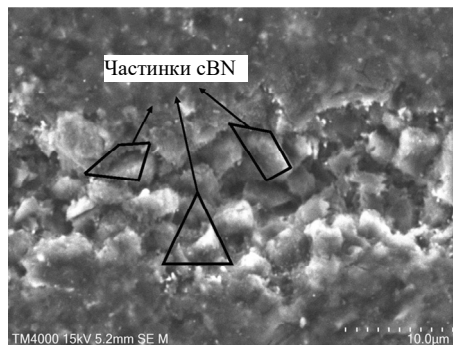


Рис. 6. Внутрішня морфологія частинок мікроканавок.

Отже, можна зробити висновок, що друга фаза фемтосекундної лазерної обробки PcBN з частотою 800 кГц за середньої потужності 1,3 Вт полягає у виштовхуванні частинок cBN з мікроканавок після видалення зв'язувального матеріалу. Зі збільшенням енергії одиночного імпульсу локальні температури на частинках cBN можуть перевищити поріг їхньої абляції. Поверхневі частинки cBN, які досягають цього порогу, руйнуються і згодом розбризкуються на поверхню матеріалу.

Порівняння результатів лазерної термічної обробки

Для дослідження теплового впливу лазера на результати обробки в цьому експерименті було використано дві конфігурації лазерної обробки із середньою потужністю 1,5 і 10 Вт для порівняльного аналізу матеріалів PcBN.

Було порівняно ефекти обробки нано- і фемтосекундними лазерами з високою частотою повторення у випадку різних середніх рівнів потужності. Зразок PcBN , оброблений наносекундним лазером потужністю 1,5 Вт, було досліджено за допомогою РЕМ за однакових умов (швидкість сканування – 100 мм/с, кількість сканувань – 1, потужність – середня). Як показано на рис. 7, у мікроканавці видно чіткі частинки cBN , а навколо і всередині канавки спостерігали численні фрагменти переплавленого матеріалу сферичної форми розміром в мікрони. Припускають, що центральні пори в сканованій області є результатом відшарування частинок cBN після видалення зв'язувального матеріалу. Це вказує на те, що обробка наносекундним лазером із середньою потужністю 1,5 Вт має спільну першу фазу з механізмом обробки височастотним фемтосекундним лазером – початкове видалення поверхневої фази зв'язувального матеріалу. Однак механізми обробки в другій фазі відрізняються. Оскільки енергія одного імпульсу наносекундного лазера не досягає порогу абляції частинок cBN [18], ці частинки не зазнають значних руйнувань або пошкоджень та зберігають структурну цілісність. Поверхні частинок мають закруглені краї внаслідок термічного розм'якшення або ерозії розплавленим зв'язувальним матеріалом. Примітно, що на периферії мікроканавки відсутній виразний шар переплавлення. На відміну від цього, обробка фемтосекундним лазером призводить до руйнування частинок cBN , як було продемонстровано в попередніх дослідженнях. Важлива відмінність полягає в зменшенні кількості переплавленого зв'язувального матеріалу на поверхнях, оброблених фемтосекундним лазером, порівняно з обробкою наносекундним лазером. Більша пікова потужність фемтосекундних лазерів дозволяє безпосередньо випаровувати більшу частину зв'язувального матеріалу, що приводить до мінімальних залишків переплавлення. Отже, видалення матеріалу під час обробки фемтосекундним лазером відбувається переважно через випаровування, а не плавлення.

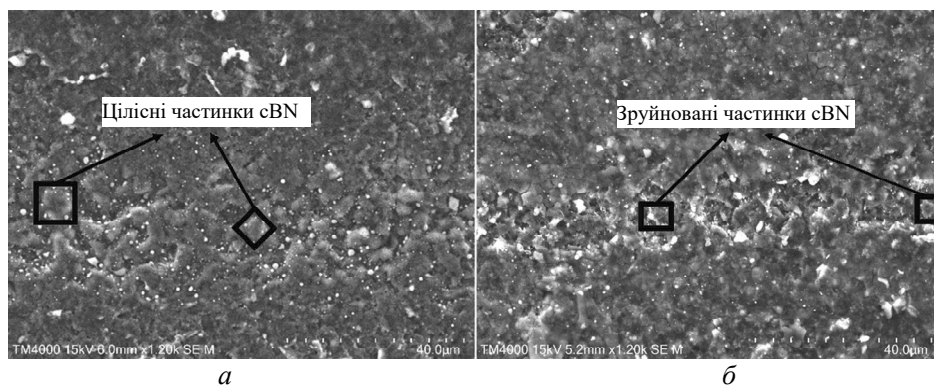


Рис. 7. Порівняння двох видів мікроканавок, отриманих нано- (а) і фемтосекундним (б) лазерами середньої потужності 1,5 Вт з високою частотою повторення.

Для порівняння мікроканавок, оброблених двома типами лазерів (наносекундним і височастотним фемтосекундним) за високої (10 Вт) потужності на зразку було створено мікроканавки довжиною 4 мм; параметри лазерів були однаковими: середня потужність – 10 Вт, швидкість сканування – 100 мм/с. Для оцінки морфології поверхні та потенційного утворення нових фаз було проведено РЕМ та РД аналізи, результати яких показано на рис. 8.

На рис. 8 показано результати експерименту, отримані за допомогою сканувального електронного мікроскопа. Оскільки інтенсивність випромінювання фемтосекундного лазера з високою частотою повторення описується нормальним законом Гауса, його енергія є найвищою в центральній області і зменшується з віддаленням від центра по радіусу. За низької енергії падаючого променя видалення матеріалу відбувається тільки поблизу його центру, де щільність енергії перевищує поріг абляції. Коли середня потужність лазера збільшується, область, що перевищує поріг абляції, розширюється, що приводить до збільшення області видалення матеріалу. Коли щільність фотонів у лазерному промені досягає критичного рівня, взаємодія фотонів викликає багатофотонну іонізацію [16]. Ефективність багатофотонної іонізації тісно пов'язана з інтенсивністю лазера: вища інтенсивність підвищує ефективність іонізації. Крім того, за високої енергії одиночного імпульсу затравочні електрони поглинають достатню енергію для підвищення своєї кінетичної енергії. Зіткнення між цими прискореними електронами та атомами генерують вторинні вільні електрони, ініціюючи каскадний процес, відомий як лавинна іонізація [16]. Це експоненціальне зростання кількості вільних електронів значно покращує ефективність видалення матеріалу, що приводить до підвищення швидкості видалення матеріалу для РсВN в умовах високої потужності. На рис. 8, *а* зображено мікроканавку, оброблену фемтосекундним лазером з високою частотою повторення, що демонструє загальну сприятливу морфологію з ефективним видаленням матеріалу в основі канавки, без тріщин на бічних стінках, без великих ямок або частинок і з чітко вираженими краями, що свідчить про високу якість обробки. Це вказує на мінімальне накопичення тепла в матеріалі, ефективне поглинання енергії фемтосекундним лазером і видалення матеріалу, що відбувається переважно через плавлення та випаровування.

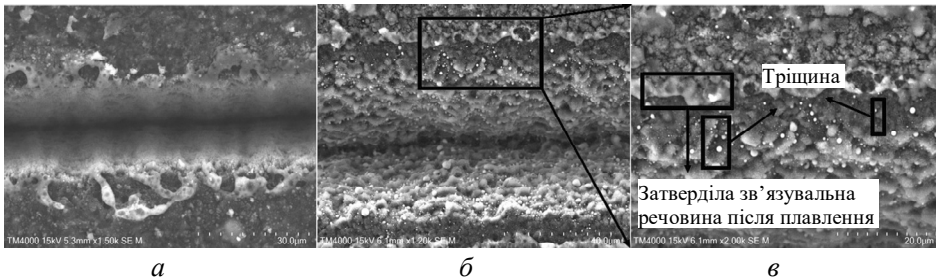


Рис. 8. Порівняння двох видів лазерної обробки за середньої потужності 10 Вт: мікроканавка, оброблена фемто- (*а*) та наносекундним (*б*) лазерами; морфологія краю мікроканавки, обробленої наносекундним лазером (*в*).

На рис. 8, *б* показано загальний мікроканал, оброблений наносекундним лазером. Як видно, по обидва боки мікроканалу з'являються сильно переплавлені поверхневі шари, а поверхня бокових стінок є дуже шорсткою. Це пояснюється надмірно високою потужністю падаючого випромінювання, яка ущільнює енергію лазера в каналі, що значно перевищує поріг абляції і викликає кулонівський вибух під час видалення матеріалу [21]. Зокрема, під дією інтенсивного електричного поля, індукованого лазером, молекули багаторазово іонізуються і це викликає утворення іонів з вищою валентністю. Під дією сильних внутрішніх електростатичних сил ці високзаряджені іони розпадаються на іони з меншою валентністю, але зі значно більшою кінетичною енергією, що прискорює їхнє виштовхування з вихідного матеріалу. Ударні

хвилі, що генеруються кулонівськими вибухами, поширюються назовні, утворюючи великі тріщини. Отже, механізм видалення матеріалу PcBN за цих умов поєднує швидке плавлення, швидке випаровування та кулонівський вибух.

Аналіз РД було проведено на обох оброблених зразках, щоб визначити, чи утворилися нові фази під час обробки. На рис. 9 видно, що необроблений PcBN та оброблений нано- і фемтосекундними лазерами мають дифракційні піки cBN при 42°. Однак на поверхні, обробленій фемтосекундним лазером з високою частотою повторення, не виявлено дифракційних піків hBN. Це пояснюється надкоротким часом взаємодії фемтосекундного лазера, що обмежує дифузію тепла, незважаючи на його надвисоку пікову потужність. Фазовий перехід cBN в hBN вимагає не тільки високих температур, але й тривалого термічного впливу [18]. Крім того, обробка фемтосекундним лазером зазвичай призводить до руйнування або аморфізації частинок cBN, а не до утворення цілих решіток hBN, що робить короточасні високі температури недостатніми для запуску фазових переходів [18]. На відміну від цього, наносекундний лазер з частотою 35 кГц забезпечує вищу енергію окремого імпульсу та довшу тривалість імпульсу порівняно з фемтосекундним лазером з частотою 800 кГц, що приводить до тривалішого теплового випромінювання. Тепло поступово накопичується через лінійне поглинання і досягає локальних температур, що перевищують поріг фазового перетворення cBN. Час теплової взаємодії (~ 10 нс) є достатнім для здійснення термодинамічно рівноважних фазових перетворень [22]. Під час охолодження розплавленій cBN зазнає метастабільних фазових переходів, частково перетворюється на hBN з видимими кристалічними структурами. Зразок, оброблений наносекундним лазером, демонструє незначні піки дифракції hBN біля ~ 27°, що вказує на часткове відновлення hBN на поверхнях частинок cBN. Слабкі піки hBN свідчать про обмежене відновлення cBN до hBN в експериментальних зразках. Це відновлення може спричинити зниження твердості поверхні PcBN, що потенційно може негативно вплинути на продуктивність різального інструменту.

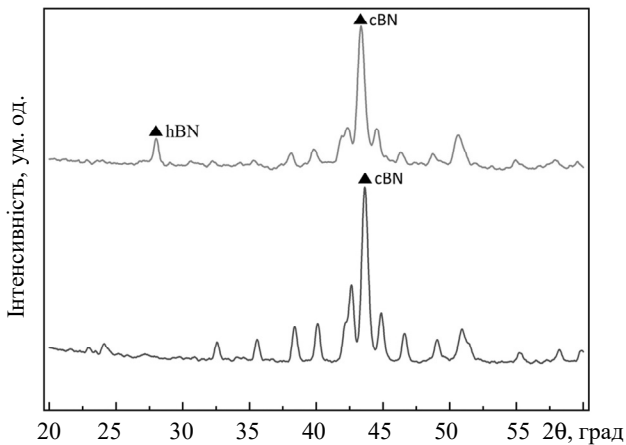


Рис. 9. Порівняння РД-діаграм різних поверхонь PcBN.

ВИСНОВКИ

Дослідження використання нано- і фемтосекундного лазерів з високою частотою повторення для обробки матеріалів PcBN з вмістом 95 % cBN,

зв'язаних керамічною фазою, показало, що в разі надзвичайно низьких рівнів потужності обидва лазери мають однаковий початковий механізм видалення матеріалу: коли енергія лазерного променя досягає порогу абляції, фаза зв'язувального матеріалу AlN на поверхні матеріалу плавиться з утворенням незначної кількості переплавленого матеріалу. Однак друга фаза розширюється зі збільшенням потужності лазера. За підвищених рівнів потужності ефекти плазмового розпилення спричиняють часткове викидання частинок cBN з поверхні, залишаються гострі частинки cBN і переплавленні залишки зв'язувального матеріалу, помітні в мікроканавці. За потужності лазера 7 Вт з'являються чіткі відмінності: обробка фемтосекундним лазером відбувається переважно випаровуванням і плавленням з утворенням мікроканавки з гладкими боковими стінками і без виявленого перетворення cBN в hBN. Навпаки, наносекундна лазерна обробка поєднує швидке випаровування, плавлення та кулонівські вибухи з утворенням шорстких бічних стінок, виразні переплавлені шари та часткове перетворення cBN в hBN навколо мікроканавки. Тобто, фемтосекундні лазери з високою частотою повторення перевершують наносекундні лазери як за якістю бічних стінок, так і за збереженням твердості матеріалу під час виготовлення мікроканавок у PcBN. Сучасну лазерну обробку PcBN широко використовують для мікротекстурування різальних інструментів. Однак перетворення cBN в hBN погіршує твердість матеріалу та збільшує ризик відколювання країв, а низька якість бічних стінок погіршує функціональність мікротекстури.

ФІНАНСУВАННЯ

Ключовий науково-дослідний спеціальний проект у провінції Хенань (грант № 241111220100); Проект фундаментальних досліджень ключових науково-дослідних проектів у провінції Хенань (грант № 24ZX004); Ключовий проект з розвитку шкільних досягнень (грант № K2023ZDPY01); Ключова лабораторія механічної промисловості з оптичних технологій зондування та випробувань (грант № 2022SA-04-15); Ключові наукові дослідницькі проекти в провінції Хенань (25CY044); Ключовий науковий дослідницький проект коледжів та університетів провінції Хенань (грант № 24A460029); Відкритий проект ключової лабораторії цифрового текстильного обладнання Хубей (Уханьський текстильний університет) (грант №: KDTL2023003); Проект реформи післядипломної освіти та підвищення якості в провінції Хенань (YJS2025XQLH24); Ключові проекти з досліджень, розвитку та просування в провінції Хенань (242102221033, 242102231026); Відкритий фонд ключової лабораторії загальної авіаційної техніки провінції Хенань (ZHKF-240204); Спільний фонд програми науково-технічних досліджень і розробок провінції Хенань (232103810035); Фонд ключової лабораторії загальної авіаційної техніки провінції Хенань за грантом ZHKF-240204; Програма наукового і технічного керівництва Китайської національної ради з текстилю та одягу (2021081).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ДОСТУПНІСТЬ ДАНИХ

Дані, на яких базуються результати, представлені в цій статті, не є загальнодоступними, але можуть бути отримані від авторів за обґрунтованим запитом.

Jialin Liu^{1,2}, Zhibin Lin¹, Yongqian Chen¹, Shirui Guo^{1,2},
Yinghao Cui^{1,2}, Xiaolei Li^{1,2}, Bo Zheng^{1,2}, Yue Zhao^{1,2},
Lujun Cui^{1,2}, Shuai Wang³, Lei Wang⁴, Minghui Gu^{1,4},
Quanbin Du⁴, Xiaolu Wang⁵

¹School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University
of Technology, Zhengzhou, China

²Zhengzhou Key Laboratory of Laser Additive Manufacturing Technol-
ogy, Zhengzhou, China

³Beijing Dynaflo Lab Solutions Co., Ltd, Beijing, China

⁴Henan Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment Integra-
tion for Superhard Materials, Zhengzhou, China

⁵Henan Key Laboratory of General Aviation Technology,
Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou, China

The removal mechanism of PcBN material by femtosecond
laser

This study compares the material removal mechanisms and thermal effects of femtosecond and nanosecond lasers on polycrystalline cubic boron nitride (PcBN). Using 800 kHz femtosecond and 35 kHz nanosecond lasers, the surface morphology and phase evolution were analyzed via SEM, EDS, and XRD. Results show: femtosecond lasers preferentially remove the AlN binder via ultrashort pulses—evaporation dominates at 0.5 W, while cBN fracture occurs at 1.3 W. Nanosecond lasers induce cBN-to-hBN phase transition and rough surfaces due to thermal accumulation. At 10 W, femtosecond-processed grooves exhibit smooth walls, whereas nanosecond lasers generate cracks and recast layers. XRD confirmed no hBN phase in femtosecond-processed regions, but minor hBN peaks in nanosecond-processed samples. High-repetition-rate femtosecond lasers demonstrate superior performance in minimizing thermal damage and enhancing machining quality.

Keyword: laser ablation, femtosecond laser, PcBN, morphology analysis.

1. Changjiang X., Qunfei Z. Current research status and progress of polycrystalline cubic boron nitride materials in China and abroad. *Superhard Mater. Eng.* 2023. Vol. 35, no. 1. P. 43–47.
2. Chao C., Mo P., Jiarong C., Xixi H.U., Feng L.I.N., Yi W.U. Effects of different binder systems on the reaction mechanism, microstructure and mechanical properties of PcBN composites. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 134, art. 109797.
3. Osipov A.S., Klimczyk P., Cygan S., Melniichuk Iu.A., Petrusha I.A., Jaworska L. Composites of the cBN–Si₃N₄ system reinforced by SiCw for turning tools. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 18, no. 1. P. 1–7.
4. Slipchenko K.V., Petrusha I.A., Stratiichuk D.A., Turkevych V.Z. The influence of VC–Al additive on wear resistance of cBN-based composites. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 3. P. 226–227.
5. Law M., Karthik R., Sharma S., Ramkumar J. Finish turning of hardened bearing steel using textured PcBN tools. *J. Manuf. Proc.* 2020. Vol. 60. P. 144–161.
6. Kim D.M., Bajpai V., Kim B.H., Park H.W. Finite element modeling of hard turning process via a micro-textured tool. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 2015. Vol. 78. P. 1393–1405.
7. Kawasegi N., Sugimori H., Morimoto H., Morita N., Hori I. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior. *Precis. Eng.* 2009. Vol. 33, no. 3. P. 248–254.
8. Daniel C., Ostendorf S., Hallmann S., Emmelmann C. Picosecond laser processing of polycrystalline cubic boron nitride—A method to examine the ablation behavior of a high cubic boron nitride content grade material. *J. Laser Appl.* 2016. Vol. 28, no. 1, art. 012001.
9. Warhanek M.G., Pfaff J., Meier L., Walter C., Wegener K. Picosecond pulsed laser processing of polycrystalline diamond and cubic boron nitride composite materials. *Proc. SPIE Laser-based Micro-and Nanoprocessing X.* 2016. Vol. 9736. P. 328–337.
10. Fernández B., Claverie F., Pécheyran C., Donard O. F. Direct analysis of solid samples by fs-LA-ICP-MS. *TrAC, Trends Anal. Chem.* 2007. Vol. 26, no. 10. P. 951–966.
11. Leitz K. H., Redlingshöfer B., Reg Y., Otto A., Schmidt M. Metal ablation with short and ultrashort laser pulses. *Phys. Procedia.* 2011. Vol. 12. P. 230–238.

12. Pacella M., Briggins D. Enhanced wear performance of laser machined tools in dry turning of hardened steels. *J. Manuf. Process.* 2020. Vol. 56. P. 189–196.
13. Denkena B., Grove T., Krödel A., Ellersiek L. Increased performance in high speed turning of Inconel 718 by laser structuring of PcBN tools. *Procedia CIRP.* 2018. Vol. 77. P. 602–605.
14. Pacella M., Nekouie V., Badiee A. Surface engineering of ultra-hard polycrystalline structures using a nanosecond Yb fibre laser: Effect of process parameters on microstructure, hardness and surface finish. *J. Mater. Process. Technol.* 2019. Vol. 266. P. 311–328.
15. Pacella M., Butler-Smith P.W., Axinte D. A., Fay M.W. The allotropic transformation of polycrystalline cubic boron nitride structures resulting from the thermal effects of pulsed laser ablation. *Diam. Relat. Mater.* 2015. Vol. 59. P. 62–68.
16. Junyun C., Zhuozheng Z., Zhisheng Z. Femtosecond laser processing of new binderless polycrystalline boron nitride material. *J. Yanshan Univ.* 2020. Vol. 44, no. 6. P. 519–525.
17. Pacella M., Badiee A. Functionalised polycrystalline boron nitride materials via laser surface engineering. *Procedia CIRP.* 2022. Vol. 113. P. 599–604.
18. Denkena B., Krödel A., Grove T. Influence of pulsed laser ablation on the surface integrity of PCBN cutting tool materials. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 2019. Vol. 101, no. 5. P. 1687–1698.
19. Mu Y., Zhang Q., Liang Q. Investigation of femtosecond laser-induced air plasma shock waves. *Guangxue Yiqi.* 2023. Vol. 45, no. 2. P. 69–74. [in Chinese].
20. Denkena B., Krödel A., Heckemeyer A., Murrenhoff M. Pulsed laser micro ablation of polycrystalline cubic boron nitride. *Procedia CIRP.* 2020. Vol. 94. P. 823–828.
21. Li L. Research on Femtosecond Laser Microstructure Machining Technology. Master's thesis: Tianjin University, 2007. [in Chinese].
22. Breidenstein B., Grove T., Krödel A., Sitab R. Influence of hexagonal phase transformation in laser prepared PcBN cutting tools on tool wear in machining of Inconel 718. *Met. Powder Rep.* 2019. Vol. 74, no. 5. P. 237–243.

Надійшла до редакції 24.05.25

Після доопрацювання 12.06.25

Прийнята до опублікування 12.06.25