

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1\(43\)-47-56](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-47-56)

УДК 621.9.048

Павло Васильович Кондрашев¹, Олександр Миколайович Степура²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: kondrashev@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7428-710X>. **ResearcherID:** [AAK-5011-2020](https://orcid.org/0000-0002-7428-710X)

²старший викладач кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: oleksandrstepura@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1915-9057>. **ResearcherID:** [M-6873-2018](https://orcid.org/0000-0003-1915-9057)

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ

Новітні методи та технології, а саме їх ефективна реалізація априорі стає неможливою без застосування надтвердих матеріалів. Особливо це критично для інструментального виробництва в машинобудівній галузі. Тому застосування цієї групи матеріалів вимагає розробки нових та вдосконалення існуючих прогресивних методів обробки цих матеріалів. Вже упродовж 30 років одним із найпоширеніших в плані застосування, зокрема в машинобудівній галузі є кубічний нітрид бору або його модифікації (белбор, киборит та ін.). Саме тому вдосконалення та впровадження існуючих та нових інженерних рішень, спрямованих на підвищення ефективності реалізації методів обробки надтвердих матеріалів безумовно є актуальною задачею.

Метою цієї роботи є пошук шляхів підвищення ефективності реалізації процесу лазерного різання кубічного нітриду бору за допомогою методів математичної статистики, з подальшою оптимізацією технологічних факторів за рахунок застосування багатофакторної стратегії проведення експерименту.

У цій роботі було проведено дослідження процесу лазерного різання кубічного нітриду бору з застосуванням лазерного експериментального устаткування потужністю 200 Вт в імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання. Енергія імпульсу складала 2 Дж, довжина імпульсу 200 мкс. Після лазерної обробки дослідні зразки розколювалися на спеціальному обладнанні. Для пошуку оптимальних режимів обробки, результати експерименту були оброблені із застосуванням методів математичної статистики.

Ключові слова: лазерне різання; надтверді матеріали; кубічний нітрид бору; математична статистика.

Рис.: 5. Табл.: 2. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. В сучасному машинобудуванні стрімко зростає попит на застосування надтвердих матеріалів таких як кубічний нітрид бору. Це пов'язано насамперед з унікальними властивостями цих матеріалів, таких як висока твердість, термостійкість, теплопровідність, хімічна інертність [1]. Водночас наявність цих властивостей викликає певні складнощі в обробці, насамперед це стосується традиційних методів обробки. Зокрема, при механічній обробці надтвердих матеріалів в наслідок високої твердості, застосовується алмазний різальний інструмент, що значно скорочує його ресурс, а також підвищує витрати самого матеріалу в наслідок контактних явищ в зоні обробки. Уникнути цього, а також значно підвищити продуктивність процесу різання надтвердих матеріалів дає можливість застосування лазерної технології [2; 3], що значно розширює можливості для подальшої оптимізації процесу лазерного різання надтвердих матеріалів з застосуванням багатофакторної стратегії проведення експерименту. Зокрема побудова моделей та їх подальший аналіз дозволяє значно скоротити час на пошук оптимальних режимів процесу лазерного різання надтвердих матеріалів, з подальшим масштабуванням та впровадженням їх у виробничий процес.

Постановка проблеми. При обробці надтвердих матеріалів, таких як кубічний нітрид бору одна з головних проблем при механічній обробці, є підвищена витрата матеріалу зразка, а також інтенсивний знос алмазного різального інструменту, внаслідок контактних явищ в зоні обробки. Також слід відзначити той факт, що традиційні методи та підходи (зокрема механічна обробка алмазним інструментом), мають достатньо невелику продуктивність реалізації процесу, в наслідок низької швидкості механічного різання, через фізичні властивості цього матеріалу. КНБ має високу крихкість та схильність до утворення мікротріщин та сколів, навіть при незначних механічних ударах або

нерівномірному тиску. Також завжди є ризик передчасного руйнування заготовки з КНБ в наслідок локального перегрівання під час тертя при механічній обробці. Також сучасна кон'юнктура ринку вимагає дедалі більш складну геометричну конфігурацію виробів з кубічного нітриду бору, що не можна реалізувати використовуючи традиційні технологічні процеси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні наукові дослідження в цьому напрямку показують низку різноманітних наукових підходів та цікавих інженерних рішень, які спрямовані на підвищення ефективності реалізації процесу лазерного різання надтвердих матеріалів як в цілому, так і конкретно кубічного нітриду бору. Зокрема в роботі [4] науковці досліджують механізм руйнування дослідного зразка з КНБ (кубічний нітрид бору) за допомогою гібридної технології, поєднуючи лазерну різку CO₂ лазера та енергію водяного струменя. Причому руйнування та деформація зразка відбувається за рахунок термічних напружень, які виникають після опромінення заготовки лазерним променем та подальшою обробкою струменем води. Недоліком цього методу є хімічні фазові перетворення заготовки, тобто перехід кубічного нітриду бору до гексагонального нітриду бору. Вказаний недолік значно мінімізується на прикладі реалізації технології лазерного різання нанотрубок з КНБ [5], дослідники проводять лазерне різання КНБ трубок безпосередньо в середовищі води, що значно мінімізує поліморфні перетворення структури КНБ, внаслідок відсутності високих градієнтів температур. Цікаве дослідження лазерного різання КНБ показано в роботі [6], де використовували лазерний технологічний комплекс на базі твердотільного лазера з довжиною хвилі 1,06 мкм. Технологічний процес реалізується виключно за допомогою лазерного різання на певну глибину, після витримки опроміненням відбувається руйнування дослідного зразка, недоліком цього підходу є, в першу чергу складність контролювання процесу руйнації, яка може протікати в будь-якому напрямку.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Опираючись на ґрунтовний аналіз літературних джерел [1-6] можна відмітити наступні недосліджені області в даному науковому напрямку, а саме недостатньо досліджена сфера застосування гібридних підходів та технологій з використанням додаткових джерел, енергії при реалізації даного технологічного процесу. Аналізуючи наукові дослідження стає зрозумілим той факт, що досягти якісних та ефективних результатів при реалізації процесу лазерного різання КНБ, без модифікації внутрішньої мікроструктури й відповідно подальшим зміненням комплексу фізико-механічних властивостей матеріалу зразка, застосовуючи лише лазерну технологію стає достатньо складним завданням. У наукових роботах, які досліджували гібридні інженерні рішення та підходи не було враховано та досліджено вплив додаткового джерела енергії на структуру КНБ зразка. Тому в цій роботі акцент наукових досліджень був спрямований саме на гібридному підході реалізації технології лазерного різання КНБ зразків, а також було досліджено вплив додаткового джерела енергії у вигляді керованого механічного впливу на ефективність та продуктивність реалізації даного технологічного процесу.

Метою статті є пошук шляхів підвищення ефективності реалізації процесу лазерного різання кубічного нітриду бору за допомогою методів математичної статистики з подальшою оптимізацією технологічних факторів за рахунок застосування багатфакторної стратегії проведення експерименту.

Методика проведення досліджень. При лазерному різанні надтвердих матеріалів (природні або синтетичні алмази, різноманітні тверді сплави) переважно застосовуються дві схеми реалізації технологічного процесу, а саме: без заглиблення, та з заглибленням

фокальної площини оптичної системи в тіло зразка. В останньому випадку можливе програмне збільшення ширини різку. У цій роботі було застосовано 2-гу схему, тобто з заглибленням фокальної площини. На підставі аналізу апіорної інформації [1-6] були визначені технологічні фактори з відповідними рівнями варіювання (X_i) в натуральному та кодованому масштабі (табл. 1). Також було встановлено статистичну значущість цих технологічних факторів та їх нелінійний вплив на результат та якість обробки. У такому випадку для адекватного опрацювання результатів експерименту було обрано симетричний композиційний рототабельний план, якій має достатньо високі статистичні характеристики (дозволяє побудувати точну квадратичну модель і врахувати кривизну та взаємодію технологічних факторів, що описують процес лазерного різання) [7-9] (загальна кількість дослідів $N=30$), причому як функції відгуків були використані ширина різку (W), середня глибина різку ($Depth_1$), глибина перфорації ($Depth_2$) та шорсткість поверхні різку (Rz). Для математичної інтерпретації симетричного композиційного рототабельного плану було використано поліном 2-го порядку (1):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{i=k} b_i x_i + \sum_{i < j = 1}^{i=k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{ii=1}^{i=k} b_{ii} x_{ii}^2, \quad (1)$$

де k - кількість технологічних факторів;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} - коефіцієнти рівняння регресії;

i, j - індекси.

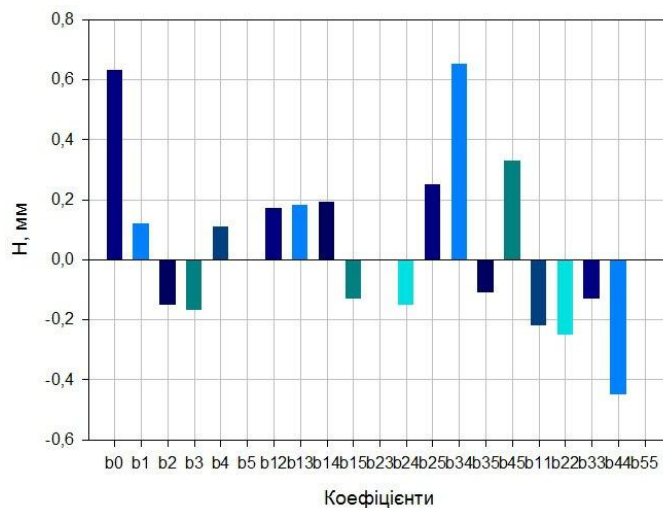
Попереднє дослідження технологічного процесу лазерного різання кубічного нітриду бору дозволило встановити границі технологічних факторів, які відповідно дозволяють гарантувати фізичну реалізацію процесу скрайбування зразка на глибину 0,5 мм. Також слід відзначити, що інтервали варіювання перевищили їх середньоквадратичну помилку. У кожній експериментальній точці досліди було продубльовано три рази ($n_u = 3$). Проведення експериментів, розрахунки коефіцієнтів рівняння регресії, перетворення систем координат відповідають загальній методиці проведення досліджень [7-9].

Таблиця 1 – Рівні варіювання технологічних факторів

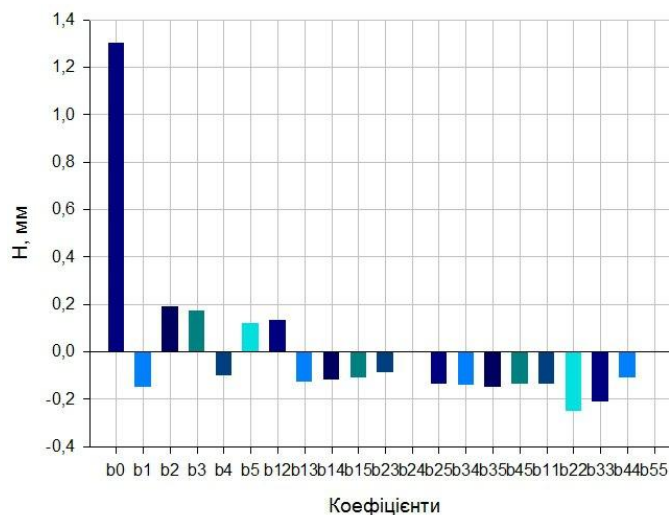
Технологічні фактори	X1	X2	X3	X4	X5
	Швидкість (V), мм/с	Кількість проходів (n), раз	Частота (f), Гц	Розфокусування (ΔF), мм	Тиск (P), Атм
Основний рівень ($X_i=0$)	600	8	15	0	1,2
Інтервал варіювання (DX_i)	150	2	5	0,1	0,4
Верхній рівень ($X_i=+1$)	750	10	20	0,1	1,6
Нижній рівень ($X_i=-1$)	450	6	10	-0,1	0,8
Зіркове плече ($X_i=+2$)	900	12	25	0,2	2
Зіркове плече ($X_i=-2$)	300	4	5	-0,2	0,4

Аналізуючи результати розрахунків, можна відмітити, що для моделей процесу, які описують залежності ширини та глибини різку відповідно до технологічних факторів висунуті статистичні гіпотези про адекватність підтвердились:

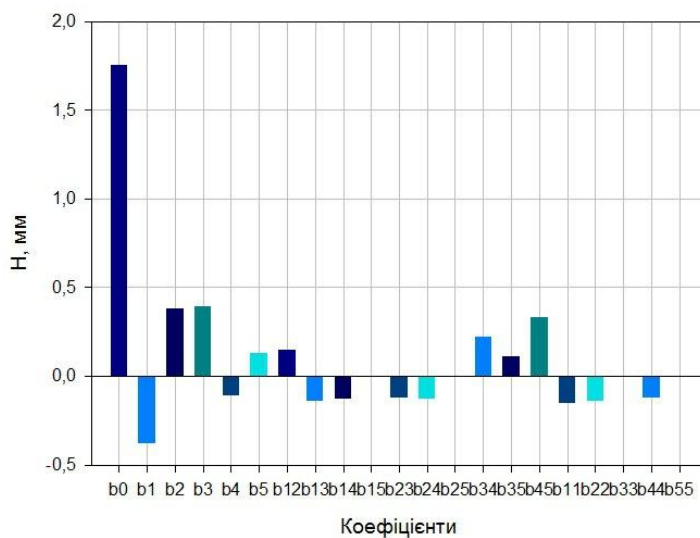
- дисперсії дослідів однорідні;
- рівняння регресії адекватні, на рис. 1 наведені коефіцієнти рівнянь регресії, які описують процес лазерного різання кубічного нітриду бору у вигляді рангових діаграм.



a



б



в

Рис. 1. Рангові діаграми коефіцієнтів рівняння регресії, які описують процес лазерного різання кубічного нітриду бору: а – ширина різку; б – глибина різку; в – глибина перфорації

Також слід відзначити що функція відгуку, яка описує шорсткість стінок різь від значень технологічних факторів не підтвердила гіпотезу стосовно адекватності (розрахунковий критерій Фішера перевищує табличний [7-9]). Тому в подальших дослідженнях дана залежність не враховувалась.

Результати проведених досліджень. На підставі проведених експериментальних досліджень, слід відзначити наступне, а саме отримані математичні моделі процесу лазерного різання кубічного нітриду бору, які описуються поліномом другого порядку (1) по своїй суті являють собою так звані "чорні ящики", і відповідно до обраної стратегії планування проведення експерименту, не розкривають достатньою мірою фізичної сутності процесів, які відбуваються в матеріалі, що оброблюється, це в свою чергу ускладнює аналіз та інтерпретацію результатів експериментальних досліджень. Водночас вони дозволяють адекватно оцінити величину впливу кожного технологічного фактору на функцію відгуку в просторі проектування. Тому аналізуючи абсолютні значення коефіцієнтів рівняння регресії, слід зазначити, що на глибину різь та глибину перфорації суттєвий вплив має саме лінійна складова технологічних факторів.

Також було встановлено, що при зменшенні густини енергії сфокусованого лазерного променя з урахуванням збільшення швидкості обробки спостерігається зменшення глибини та відповідно ширини різь (рис. 2, а, б).

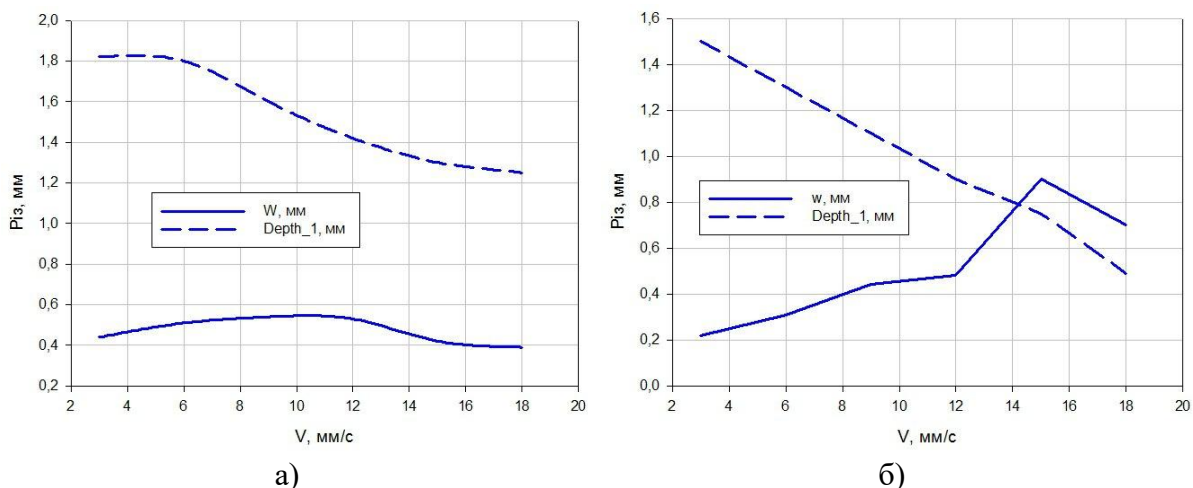


Рис. 2. Залежності глибини $depth_1$ та ширини W лазерного різь КНБ від швидкості обробки, кількість проходів $n=8$, частота слідування імпульсів $f=15$ Гц при різних значеннях тиску робочого газу: а)- $P=0,4$ Атм.; б)- $P=2$ Атм.

Однак водночас слід зауважити, що при тиску робочого газу 0,4 Атм та швидкості обробки 12 мм/с (рис. 2, а) спостерігається незначне збільшення ширини різь, теж саме явище спостерігається при швидкості 15 мм/с і відповідно тиску робочого газу 2 Атм (рис. 2, б), що пояснюється перефокусуванням лазерного випромінювання в області плазмової хмари (рис. 3, а), що призводить до збільшення плями фокусування і як наслідок ширина різь збільшується. Що стосується впливу інших технологічних факторів на процес лазерного різання кубічного нітриду бору, було встановлено, що при збільшенні кількості проходів та відповідно частоти імпульсів лазерної генерації обидва вихідних параметри глибина та ширина різь збільшуються.

Також слід відзначити, що при відсутності синхронізації між переміщенням деталі та частоти подачі лазерних імпульсів можлива ситуація багаторазового потрапляння сфокусованого випромінювання в однакові точки, що створює передумови для формування масиву "елементарних" отворів. Про що свідчить зовнішній вигляд поверхні лазерного різь (рис. 3, б), якій показує це явище.

Цікавим є той факт, що при збільшенні кількості подвійних проходів також спостерігається збільшення глибини та ширини лазерного різку. На рис. 4 наведені залежності ширини та глибини лазерного різку кубічного нітриду бору від кількості проходів, у випадку, коли швидкість обробки $V=16$ мм/с, частота слідування лазерних імпульсів $f=25$ Гц, тиск робочого газу $P=2$ Атм.

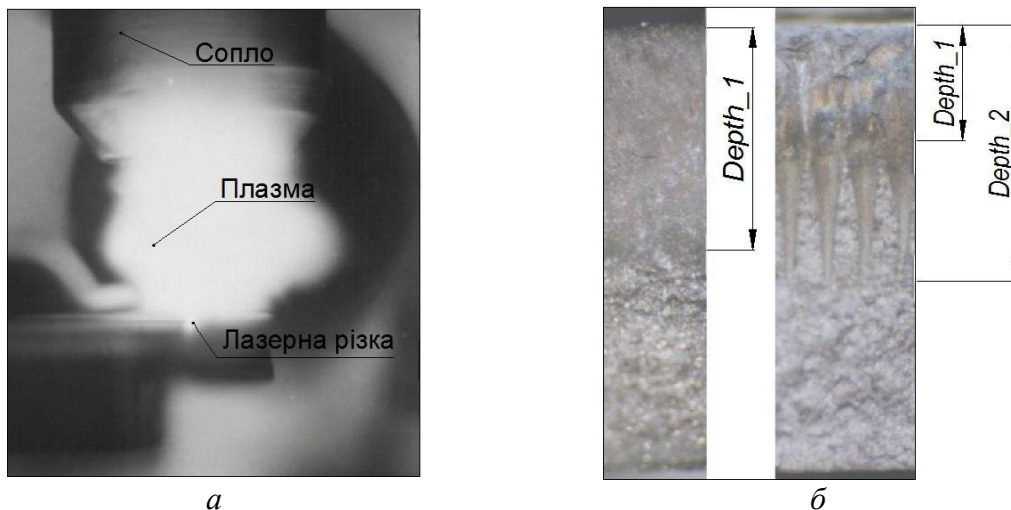


Рис. 3. Лазерне різання кубічного нітриду бору (а), та зовнішній вигляд поверхні лазерного різку (б)

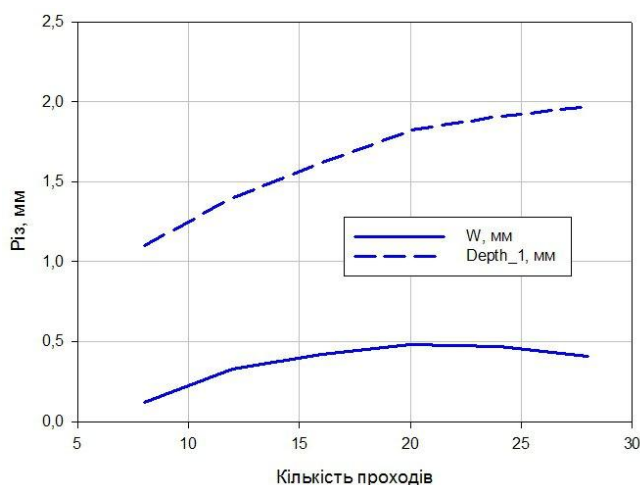


Рис. 4. Залежності глибини та ширини лазерного різку від кількості проходів сфокусованого лазерного випромінювання ($V=16$ мм/с, $f=25$ Гц, $P=2$ Атм)

Отже, така інтерпретація отриманих залежностей дозволяє стверджувати, що їх можна використовувати зокрема й для попередньої оцінки кліноподібності лазерного різку. Однак слід взяти до уваги той факт, що при збільшенні сумарної дисперсії, адекватність отриманої залежності стає надзвичайно низькою. Дослідження процесу лазерного різання КНБ за допомогою залежностей (1) з урахуванням статистичної значущості кожного технологічного фактора (рис. 1) можна проводити достатньо довго з урахуванням фізичної складності процесу. Саме тому для пошуку оптимальних режимів обробки, які надалі можна було б легко масштабувати та впроваджувати в подібних технологічних процесах на виробництві, були використані методи нелінійного програмування [10]. Причому пошук режимів обробки було проведено з урахуванням забезпечення максимальної глибини різку (4 мм) (2) зі збільшенням факторної області (3) та шириною різку, яка лежить у границях від 0,4-0,9 мм (4).

$$\text{Depth}_1(x_i) = 4, \quad (2)$$

$$x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax}, x_2 \leq +4, \quad (3)$$

$$0,4 \leq W(x_i) \leq 0,9, \quad (4)$$

де x_{imin}, x_{imax} -границі змінення незалежних змінних (табл. 1).

Залежності (1-4) були оптимізовані за допомогою «штрафних» функцій [7] в одне рівняння (5).

$$\Phi(x, R) = f(x) + R \sum_{j=1}^m P_j(x), \quad (5)$$

де $f(x)$ -цільова функція для модифікації;

R -параметр штрафу;

P -квадрат порушення.

При реалізації "штрафних" функцій для лазерного різання КНБ до цільової функції (математична модель, яка описує процес лазерного різання КНБ) по черзі додавалися штрафні функції в разі відхилення від гранично допустимих значень (визначалися експериментально на технологічних пробах) параметрів керування процесом лазерного різання КНБ, для яких відповідно проводилася оптимізація, в нашому випадку це швидкість V , кількість проходів n , частота слідування імпульсів f , тиск робочого газу P . Накладання штрафів дає можливість уникнути режимів обробки при яких виникає псування матеріалу (тріщини, перегрів, поліморфні перетворення). В даній роботі для оптимізації параметрів керування процесом лазерного різання КНБ накладалися штрафи на наступні технологічні параметри керування процесом лазерного різання КНБ:

- штраф за «конусність»: КНБ дуже твердий, тому лазерний промінь розсіюється. Якщо швидкість перевищувала значення ($V > 20$ мм/с, рис. 2), нижня частина різку не прогрівалася, відповідно функція відгуку різко зростала, сигналізуючи про брак.

- термічний штраф: КНБ чутливий до термічного удару. Якщо тривалість імпульсу була більше ($f > 25$ Гц) та кількість проходів ($n > 15$), вводився штраф за розширення зони термічного впливу ЗТВ (рис. 5).

- штраф за механічні uszkodження (мікротріщини, сколи) при значеннях тиску робочого газу ($P > 2$ Атм) відбувалося значне механічне навантаження на зону різку. Оскільки КНБ чутливий до термічних ударів, поєднання високої температури технологічного лазера та інтенсивного охолодження потоком робочого газу пояснює утворення термічних напружень та розтріскування країв зразка.

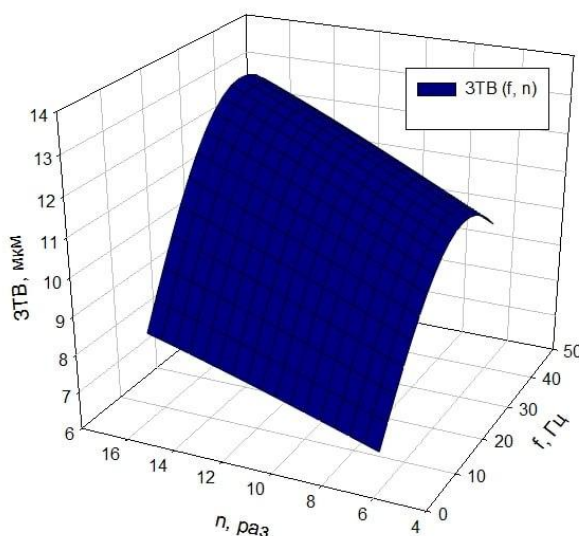


Рис. 5. Залежність величини зони термічного впливу ЗТВ, мкм від частоти слідування імпульсів лазерного випромінювання f , Гц та кількості проходів n

Також було встановлено, що лазерне різання КНБ завтовшки 4 мм доцільно проводити на таких режимах обробки, а саме швидкість обробки $V = 20$ мм/с, кількість проходів $n = 10$, частота слідування імпульсів $f = 20$ Гц, розфокусування $\Delta F = 0,4$ мм, тиск робочого газу $P = 2$ Атм. При таких режимах обробки ширина різку на вході становить 0,7 мм, шорсткість поверхні складає 20 мкм. Продуктивність процесу різання КНБ з застосуванням розробленої методики була оцінена співвідношенням глибини лазерного різання h_1 до глибини механічного різання h_2 за один прохід. Причому середня швидкість процесу лазерного різання становила 15 мм/с, що відповідає середній швидкості різання алмазним інструментом 900 м/хв [11] при механічному різанні (табл. 2).

Таблиця 2 – Показники продуктивності процесу лазерного різання КНБ із застосуванням розробленої методики в порівнянні з традиційними технологіями

Товщина заготовки, мм	Середня швидкість різання, мм/с	Глибина лазерного різання за один прохід h_1 , мм	Глибина механічного різання за один прохід h_2 , мм	Продуктивність процесу, раз
4	15	0,4	0,02	20

Висновки. На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень було встановлено:

- отримані математичні моделі, які описують процес лазерного різання кубічного нітриду бору товщиною 4 мм;
- для досліджуваного сумарного факторного простору було встановлено максимальний вплив на процес лазерного різання кубічного нітриду бору густини енергії, швидкості процесу, кількості проходів та частоти слідування імпульсів;
- доведено, що при відсутності синхронізації між швидкістю переміщення деталі та частотою слідування імпульсів можливе виникнення повторного потрапляння сфокусованого лазерного випромінювання в однакові точки;
- встановлені оптимальні режими процесу лазерного різання кубічного нітриду бору, швидкість обробки $V = 20$ мм/с, кількість проходів $n = 10$, частота слідування імпульсів $f = 20$ Гц, розфокусування $\Delta F = 0,4$ мм, тиск робочого газу $P = 2$ Атм, які дозволяють підвищити продуктивність процесу в порівнянні з традиційними методами обробки у 20 разів.

Список використаних джерел

1. Волкогон, В. М., & Антонюк, Н. В. (2002). Вплив та перспективи створення та застосування ріжучого інструменту з гексаніту. *Світ техніки та технології*, 11, 42–44.
2. Коваленко, В. С., & Лавринович, А. В. (1991). *Лазерна обробка керамічних матеріалів*. Техніка.
3. Коваленко, В. С., Анякін, М. І., та ін. (2002). Лазерне різання. *Electrical Machining*, 7, 9–14.
4. Wu, Z., & Ammar, A. (2015). Hybrid CO₂ laser/waterjet (CO₂-LWJ) cutting of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) blanks with phase transformation induced fracture. *Optics & Laser Technology*, 70, 39–44.
5. Bhandari, S., Tiwari, B., Yapici, N., Zhang, D., & Yap, Y. K. (2016). Introduction to boron nitride nanotubes: Synthesis, properties, functionalization, and cutting. In *Boron nitride nanotubes in nanomedicine* (pp. 1–15).
6. Bloschanevich, A. M. (2004). Laser cutting of diamond-based materials and dense modifications of boron nitride. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 43, 150–155.
7. Новік, Ф. С., & Арсов, Я. В. (1980). *Оптимізація технології обробки металів експериментально розробленими методами*. Наука.
8. Коваленко, В. С., Анякін, М. І., та ін. (2000, November). Моделювання та оптимізація процесів лазерного різання (напівпровідникові лазери). In *Proceedings of the International Congress "ICALEO 2000"* (pp. D82–D92).
9. Коваленко, В. С., Котляров, В. П., Дятел, В. П., та ін. (1985). *Довідник по технології лазерної обробки*. Техніка.
10. Хімелблау, Д. (1975). *Застосування нелінійного програмування*. Світ.

11. Бакуль, В. М. та ін. (б. р.). *Алмазна обробка надтвердих матеріалів*. Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля.

References

1. Volkohoh, V. M., & Antoniuk, N. V. (2002). Vplyv ta perspektyvy stvorennia ta zastosuvannia riuzhuchoho instrumentu z heksanitu [Impact and prospects of creation and application of cutting tools made of hexanite]. *Svit tekhniky ta tekhnologii – World of Technics and Technologies*, (11), 42–44.
2. Kovalenko, V. S., & Lavrynovych, A. V. (1991). *Lazerna obrobka keramichnykh materialiv [Laser processing of ceramic materials]*. Tekhnika.
3. Kovalenko, V. S., Aniakin, M. I., et al. (2002). Lazerne rizannia [Laser cutting]. *Electrical Machining*, (7), 9–14.
4. Wu, Z., & Ammar, A. (2015). Hybrid CO₂ laser/waterjet (CO₂-LWJ) cutting of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) blanks with phase transformation induced fracture. *Optics & Laser Technology*, 70, 39–44.
5. Bhandari, S., Tiwari, B., Yapici, N., Zhang, D., & Yap, Y. K. (2016). Introduction to boron nitride nanotubes: Synthesis, properties, functionalization, and cutting. In *Boron nitride nanotubes in nanomedicine* (pp. 1–15). William Andrew Publishing.
6. Bloschanevich, A. M. (2004). Laser cutting of diamond-based materials and dense modifications of boron nitride. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 43, 150–155.
7. Novik, F. S., & Arsov, Ya. V. (1980). *Optyimizatsiia tekhnologii obrobky metaliv eksperymentalno rozroblenymy metodamy [Optimization of metal processing technology by experimentally developed methods]*. Nauka.
8. Kovalenko, V. S., Aniakin, M. I., et al. (2000, November). *Modeliuvannia ta optyimizatsiia protsesiv lazernoho rizannia (napivprovodnykovi lazery) [Modeling and optimization of laser cutting processes (semiconductor lasers)]*. In *Proceedings of the International Congress “ICALEO 2000”* (pp. D82–D92). Laser Institute of America.
9. Kovalenko, V. S., Kotliarov, V. P., Diatel, V. P., et al. (1985). *Dovidnyk po tekhnologii lazernoi obrobky [Handbook on laser processing technology]*. Tekhnika.
10. Himmelblau, D. (1975). *Zastosuvannia neliniinoho prohramuvannia [Applied nonlinear programming]*. Svit.
11. Bakul, V. M., et al. (n.d.). *Almazna obrobka nadtverdykh materialiv [Diamond processing of superhard materials]*. Instytut nadtverdykh materialiv im. V. M. Bakulia [V. Bakul Institute for Superhard Materials].

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.01.2026

UDC 621.9.048

Pavlo Kondrashev¹, Oleksandr Stepura²

¹PhD, Assistant Professor of the department Laser System and Advanced Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: kondrashev@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7428-710X>. **ResearcherID:** [AAK-5011-2020](https://orcid.org/AAK-5011-2020)

²Senior lecturer of the department Laser System and Advanced Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: oleksandrstepura@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1915-9057>. **ResearcherID:** [M-6873-2018](https://orcid.org/M-6873-2018)

APPLICATION OF METHODS OF MATHEMATICAL STATISTICS IN THE IMPLEMENTATION OF THE LASER CUTTING PROCESS OF CUBIC BORON NITRIDE

The latest methods and technologies, namely their effective implementation a priori becomes impossible without the use of superhard materials. This is especially critical for tool production in the machine-building industry. Therefore, the use of this group of materials requires the development of new and improvement of existing progressive methods for processing these materials. For 30 years, one of the most widespread in terms of application, in particular in the machine-building industry, is cubic boron nitride or its modifications (belbor; cyborite, etc.). That is why the improvement and implementation of existing and new engineering solutions aimed at increasing the efficiency of the implementation of methods for processing superhard materials is definitely an urgent task.

Analysis of literary sources in this scientific topic allowed us to identify unexplored parts of the global problem, in particular; when processing superhard materials, such as cubic boron nitride, one of the main problems, with traditional processing methods, for example mechanical, is the increased consumption of sample material, as well as intensive wear of the diamond cutting tool, as a result of contact phenomena in the processing zone. It should also be noted that traditional methods and approaches have a rather low productivity of the process implementation. The use of laser technology, in particular laser cutting, makes it possible to significantly increase the productivity of the cutting process, primarily due to the absence of contact phenomena in the laser-processing zone.

The purpose of this work is to find ways to increase the efficiency of the implementation of the laser cutting process of cubic boron nitride using mathematical statistics methods, namely, to find ways to optimize this technology by using a multi-factorial strategy for conducting the experiment.

In this work, a study of the laser cutting process of cubic boron nitride was conducted using laser experimental equipment with a power of 200 W in the pulsed mode of laser radiation generation. The pulse energy was 2 J, the pulse length was 200 μ s. After laser processing, the test samples were heated on special equipment. To find the optimal processing modes, the experimental results were processed using mathematical statistics methods.

Key words: laser cutting; superhard materials; cubic boron nitride; mathematical statistics.

Fig.: 5. Table: 2. References: 11.