

## УДК 621.375.826 DOI: 10.20535/2077-7264.3(85).2024.312495

© О. О. Гончарук, канд. техн. наук, доц., Л. Ф. Головко, д-р техн. наук, проф., С. М. Волошко, д-р техн. наук, проф., О. Д. Кагляк, канд. техн. наук, доц.,
А. П. Бурмак, канд. техн. наук, доц., Ю. В. Ключніков, канд. фіз.-мат. наук, доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛАЗЕРНОГО СИНТЕЗУ РОБОЧОГО ШАРУ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТА

В статті наведено результати програмного моделювання температурного поля, зумовленого впливом рухомого джерела енергії в процесі синтезу інструментального шару абразивного інструмента на основі надтвердих матеріалів (HTM), яке було реалізовано методами скінчених різниць та Ньютона для розв'язання систем нелінійних рівнянь, а для знаходження значень температури на межі середовищ використано рівняння теплового балансу.

# Ключові слова: лазерне випромінювання; математичне моделювання; абразивний інструмент; алмаз; кубічний нітрид бору.

## Вступ

Технології лазерного впливу на матеріал набули широкого застосування для безлічі технологічних процесів за рахунок своєї гнучкості, адаптації та невичерпних перспектив використання. На світовому ринку з'являються перспективні лазерні системи з широким діапазоном довжини хвилі, що дозволяє технологам ефективно використовувати цей інструмент для реалізації своїх проєктів. Ще одним напрямом розвитку технологій є гібридизація — поєднання декількох технологій до однієї — більш продуктивної, що в результаті забезпечує підвищення ефективності обробки матеріалів.

Надшвидкісний нагрів є технологією, що швидко розвивається і дозволяє оптимізувати процес лазерного спікання і отримувати матеріали з високою щільністю і дрібнозернистою структурою [1]. Тому з'явилося багато неізотермічних методів спікання. Одним з найбільш поширених способів виготовлення абразивного шліфувального інструменту є ізотермічне спікання, яке полягає в прямому спіканні металевих матеріалів за допомогою електричного струму [2], який доповнюється лазерним нагріванням [3–5].

Лазерне випромінювання як джерело тепла має масу переваг: точне безконтактне введення енер-

<sup>©</sup> Автор(и) 2024. Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського.

CC BY 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



гії в матеріал, широкий діапазон температур для надшвидкісного локального нагріву та можливість отримання надтонких структур. Всі вони дозволяють використовувати лазерний нагрів для спікання тонких металевих і композиційних матеріалів. Дослідження щодо лазерного нагрівання керамічних і металевих порошків [4] показали, що найкращим способом отримання матеріалу з необхідними властивостями є рідкофазне спікання. Багатьма дослідниками [6-9] показано, що таким чином можна підвищити продуктивність і якість лазерного спікання різальних інструментів.

Абразивні інструменти з синтетичних алмазних зерен [10–12] і кубічного нітриду бору (КНБ) [13– 16] потребують правки для задання необхідного профілю та якості поверхні, для чого використовують специфічні методи точної обробки, які включають електричний розряд [16], механічну обробку [17] та імпульсну лазерну обробку [18, 19]. Порівняно з іншими способами правки та виготовлення абразивного інструменту лазерний метод має такі переваги, як безконтактність, менші втрати, тривалий термін служби та широке застосування.

Дослідження щодо використання лазерного випромінювання для правки абразивного інструменту представлені у низці робіт [20–23]. Для абляції шліфувальних кругів на основі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та SiC кераміки було використано імпульсний Nd:YAG лазер, що довело можливість використання імпульсного лазера для правки шліфувальних кругів, а також CO<sub>2</sub>лазер для опромінення шліфувального круга на керамічній основі КНБ. Загалом отримані на сьогодні результати в цьому напрямі засвідчують перспективність лазеру, як інструменту, а також ефективність поєднання лазерного впливу та механічної правки.

Автори [24-28], використовуючи різні типи лазерів для опромінення абразивних інструментів на металевій основі, довели, що лазерне опромінення не викликає жодних очевидних термічних пошкоджень абразивних зерен КНБ. Досить ефективним виявився комплексний метод лазерної корекції з ортогональною та квазітангенціальною пікосекундною лазерною абляцією алмазних шліфувальних кругів на металевій основі зі складним контуром [28]. Метод прецизійної правки імпульсним лазером V-подібної крупнозернистої гальванічної форми шліфувального круга з КНБ запропонований в [29] на основі попереднього моделювання процесу лазерної правки крупнозернистих гальванічних шліфувальних кругів зі складним контуром і доведено його високу ефективність. Це підкреслює перспективність використання лазерного випромінювання з різною довжиною хвилі для синтезу робочих шарів абразивних інструментів.

Проведені авторами попередні дослідження [30] показали можливість використання технології лазерного синтезу робочих шарів абразивного інструменту на основі кубічного нітриду бору та металевої зв'язки. Також встановлено технологічні параметри опромінення, які не призводять до термічного руйнування абразивних зерен.



#### Постановка проблеми

Завданням цієї роботи є визначення умов лазерного синтезу зовнішнього алмазовмісного робочого шару циліндричного інструменту, що застосовується для шліфування зовнішніх поверхонь виробів із композитних матеріалів, різних полімерних складових, склопластиків тощо.

Ця технологічна операція виконується одношаровими алмазо-абразивними шліфувальними кругами діаметром від 60 до 80 мм і висотою 20–100 мм, а також кругами діаметром 165– 200 мм і висотою 640 мм.

Шліфувальні алмазо-абразивні круги (рис. 1) являють собою циліндр обертання діаметром D і шириною L. Робоча поверхня кругів з переривчастою робочою поверхнею і являє собою сукупність алмазо-абразивних робочих елементів, утворених пересічними між собою гвинтовими канавками правого (n1) і лівого (n2) напрямів, виконаними під кутами w1 і w2 до геометричної осі інструменту й рівними 30-40 градусів. Для забезпечення рівномірного розподілу навантаження на робочі елементи круга в процесі шліфування різниця гвинтових канавок правого й лівого напрямів варіюється в межах від 1 до 10. На зовнішній робочій поверхні кругів закріплений шар інструментального композиту зі шліфувальних порошків синтетичних алмазів марок АС15, АС20 і АС32 зернистістю 500/400-200/160.



Рис. 1. Конструкція одношарового алмазо-абразивного шліфувального круга: 1— корпус; 2— робочі елементи; 3— спіральні канавки; 4— пінополістирол; 5— оправка; 6— фланець; 7— призматична шпонка

3000





Для визначення умов реалізації процесу лазерного рідиннофазного спікання алмазовміщуючого шару проведене його математичне моделювання. Розрахункова область включає підкладку та покриття, на поверхню якого діє лазерний промінь, який пересувається зі сталою швидкістю V уздовж осі О<sub>х</sub>, як показано на рис. 2.

Деталь має форму прямокутного паралелепіпеда зі сторонами L<sub>x</sub>, L<sub>v</sub>, L<sub>z</sub> та початкову температуру U<sub>п</sub>, причому товщина верхнього шару дорівнює h. lï поверхні знаходяться у процесі теплообміну з навколишнім середовищем, температура якого U<sub>c</sub>. Верхня поверхня (поверхня обробки) опромінюється лазерним променем з довільним розподілом потужності за перерізом. Промінь рухається за будь-якою траєкторією зі швидкістю V. Розподіл потужності описується законом W<sub>(x.v.t)</sub>, а його дія викликає на поверхні обробки тепловий потік з розподілом щільності q<sub>(x,y,t)</sub>. Через деякий проміжок часу т, що залежить від теплофізичних властивостей матеріалу, встановлюється квазістаціонарний стан, за якого зона нагріву або зона розплавленого металу характеризується незмінними розмірами і пересувається разом з джерелом теплового впливу.

В досліджуваному технологічному процесі порошковий матеріал неперервно подається до зони розплавлення за допомогою потоку газу. Для спрощення аналізу допускається, що матеріал покриття у виді ідеально спресованого порошку в загальному випадку складного складу попередньо наноситься на підкладку, після чого розплавляється під дією лазерного випромінювання. Матеріал покриття, що наплавляється, після кристалізації являє собою однофазне середовище, яке складається з основної фази у виді бронзової матриці та дисперсних включень синтетичних алмазів, розташованих періодично за 3-ма координатними осями.

У даній роботі використовується лінійний закон зміни L від температури в інтервалі кристалізації [T<sub>S</sub>, T<sub>L</sub>] для сплавів, а для чистих металів — в інтервалі згладжування.

Слід зауважити, що в моделі не враховується вплив руху розплавленого металу на процеси тепло- та масоперенесення в рідкометалевій ванні. Тобто температурне поле обчислюється для випадку нерухомого рідкого металу. Також не враховується деформація вільної поверхні розплавленого металу.



Рис. 2. Схема дії лазерного променю на деталь



# Математична модель

В загальному випадку нестаціонарний розподіл температури U(x, y, z, t) в металевому зразку описується нелінійним рівнянням теплопровідності [31–33]:

$$c\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} +$$
  
+  $\frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial^2 U}{\partial z^2},$  (1.1)

де c(z, U) в даній моделі — ефективне значення теплоємності матеріалу, що враховує наявність фазових переходів і структуру покриття, ρ(z, U) — густина матеріалу, λ(z, U) — ефективне значення теплопровідності.

Розглянемо спочатку нижній прошарок. Для нього значення с, ρ, λ є сталими відносно температури, тому можна записати рівняння (1.1) таким чином:

$$\begin{split} c\rho \frac{\partial U}{\partial t} &= \lambda \bigg( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \bigg), \\ &\quad x \in [0, L_X], \, y \in [0, L_y], \\ &\quad z \in [h, L_Z], \, t \in [0, T_K]. \end{split}$$

Початкова умова:

$$U(x, y, z, 0) = U_{n}$$

Крайова умова на поверхні обробки у зоні дії лазерного випромінювання:

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, 0, t)}{\partial z} +$$
(1.2)  
+q(x, y, t) = 0.

Крайова умова на поверхні обробки поза зоною дії випромінювання:

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, 0, t)}{\partial z} + \alpha \left[ U(x, y, 0, t) - U_c \right] = 0.$$
(1.3)

Крайові умови на інших гранях розрахункової області:

$$\begin{split} &\lambda \frac{\partial U(x,y,L_{z},t)}{\partial z} + \\ &+ \alpha \left\lceil U(x,y,L_{z},t) - U_{c} \right\rceil = 0, \end{split} \tag{1.4}$$

$$\lambda \frac{\partial U(0, y, z, t)}{\partial x} +$$
(1.5)

$$+\alpha \left[ U_{c} - U(0, y, z, t) \right] = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial U(L_x, y, z, t)}{\partial x} +$$
 (1.6)

$$+\alpha \left[ U(L_x, y, z, t) - U_c \right] = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial U(x,0,z,t)}{\partial y} +$$
(1.7)

$$+\alpha \left[ U_{c} - U(x,0,z,t) \right] = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial U(x,L_y,z,t)}{\partial y} +$$
(1.8)

$$+\alpha \left[ U(x,L_{y},z,t)-U_{c}\right] = 0.$$

Моделювання проведене для таких матеріалів:

 дисперсні включення покриття — бронза ОЦР 3-8-6;

— підкладка — сталь 3.

Геометричні параметри бруска становили:

Розрахунки проводились в системі одиниць кг, см, с.

Значення параметрів випромінювання та навколишнього середовища:





Рис. 3. Ізолінії температурного поля на поверхні обробки для першого часового кроку: а — на поверхні області моделювання; б — у зрізі області

$$\alpha = 50 \frac{\text{BT}}{\text{M}^2 \text{град}} = 50 \frac{\text{KF}}{\text{c}^3 \text{град}},$$

q1E8
$$\frac{K\Gamma}{c^3max}$$
, r = 0,25 cm,

$$v = 2,5 \frac{CM}{C}, U_{C} = 20^{\circ}.$$

Отримано наступні результати для двох моментів часу.

Перший момент часу τ<sub>1</sub> = 0,004. Температурне поле на поверхні обробки (рис. 3, а) та в поперечному перерізі (рис. 3, б) до-



Рис. 4. Температурне поле на поверхні обробки для першого часового кроку

сягає максимуму  $t_1^\circ C_{max}$  в положенні центра променю (x = 0,5; y = 0,26).

Щоб краще уявити розподіл температур, можна проаналізувати ізолінії поля в проєкції хОz на перерізі, що проходить через координату центра променю. Бачимо, що чим далі уздовж осі Оz, тим повільніше змінюється температура, це обумовлено теплофізичними властивостями матеріалу, в даному випадку композитного шару покриття (рис. 4).

На рис. 5 представлено розподіл вузлів різницевої сітки для першого моменту часу. Спостерігається згущення вузлів сітки в координатах лазерного променю та на межі двох середовищ. Отже, можна бачити, що навіть для цього випадку має місце змінний крок за координатами.

Для більш детального аналізу характеру змін на рис. 6 представлено графіки залежності середніх значень кроків від координат для першого моменту часу.

Аналіз таблиці реальних значень температури на поверхні обробки для дев'ятого моменту часу (т<sub>9</sub> = 0,046), свідчить, що



Рис. 5. Розподіл вузлів різницевої сітки для першого моменту часу

максимального значення  $t_1^\circ C_{\text{max}}$ 

температура досягає вже в точці (x = 0,5; y = 0,26).

На рис. 7 представлено ізолінії температурного поля в пере-

різі хОz для дев'ятого моменту часу. Можна бачити, що на межі середовищ температура вже сягає 200° С. Детальніше характер поведінки температурного поля представлено на рис. 8, 9.







Рис. 7. Ізолінії температурного поля у зрізі області нагрівання  $\tau_9 = 0,046$ 





Рис. 8. Ізолінії температурного поля на поверхні обробки т<sub>9</sub> = 0,046

З рис. 9 видно, що центр променю вже встигає переміститися до іншої позиції.

Розподіл вузлів різницевої сітки представлено на рис. 10.

Можна побачити, що вузли різницевої сітки більш щільні в місцях дії лазерного променю, тобто там, де має місце різка зміна температури, а там де температура не змінюється — вузли розріджуються. Залежність середнього кроку від координат для 9-го кроку за часом наведено на рис. 11. Треба зауважити, що після деякого проміжку часу



Рис. 9. Температурне поле на поверхні обробки т<sub>9</sub> = 0,046



Рис. 10. Розподіл вузлів різницевої сітки для т<sub>9</sub> = 0,046





Рис. 11. Залежність середнього значення кроку від координат для дев'ятого моменту часу

від початку дії променю, графіки залежності середнього кроку від координат не змінюються з плином часу.

Отже вузли ущільнюються в місцях, на котрі діє лазерний промінь, а також на границях області, бо там виконуються крайові умови. За результатами математичного моделювання встановлено технологічні параметри лазерного синтезу інструментальних композитів, за яких гарантоване формування однорідного шару з НТМ із збереженням зернами НТМ якісних показників. Матеріали, експериментальне обладнання та методика проведення досліджень

Вивчення впливу умов лазерного опромінення на механічні властивості НТМ в процесі синтезу абразивного інструменту проведено на зразках абразивних зерен різних марок, характеристики яких наведені в таблиці. Режими лазерного нагрівання відповідали розрахунковим, які планувалося застосувати для поліпшення структури, а також спікання композитів з різними типами зв'язок.

Марка НТМ	Зернистість НТМ	Статична міцність зерен, Н		
AC125	425/300	166		
AC125	500/400	194		
AC160	425/300	207		
AC160	500/400	242		
КВ	315/250	20		
КВ	250/200	16		
К9	250/200	26		
CBN 100	250/200	15		

#### Характеристики досліджуваних марок шліфпорошків НТМ



Основним завданням даного дослідження є визначення максимальних значень температури прямого та побічного (від температури плавлення зв'язки) лазерного нагріву різних марок шліфпорошків НТМ (синтетичного алмазу та КНБ), у тому числі і за різних умов опромінення, за яких зберігається їхня вихідна статична міцність.

Для експериментальних досліджень використано лазерний технологічний комплекс, оснащений газовим СО2 лазером з довжиною хвилі випромінювання 10,6 мкм і потужністю в діапазоні регулювання 150-1500 Вт. До складу комплексу входять технологічні модулі, що включають пристрої переміщення оброблюваних деталей відносно лазерного пучка, системи фокусування та сканування випромінювання, пристрої дозування та подачі порошкових матеріалів. Технологічні параметри обробки варіювалися в діапазоні: густина потужності —  $W_p = (0,2-6,37) \times 10^3 \text{ Bt/cm}^2$ , час обробки — т = 0,09-0,36 с. Лазерна обробка здійснювалася на повітрі та в середовищі аргону, витрати якого варіювалася в діапазоні 2–20 л/хв.

Методично поставлене завдання визначення впливу лазерного випромінювання на зерна НТМ вирішувалося двома способами прямим опроміненням зерен на графітовій підкладці та непрямим — нагріванням розплавленої лазерним випромінюванням порошкової зв'язки, до якої попередньо були занурені зерна НТМ [30]. Після опромінення частину зерен (100–200 шт.) випробовували на міцність при статичному навантаженні за стандартною методикою на приладі моделі ДА-2 [34]. Частина зразків досліджувалась із застосуванням методів растрової електронної мікроскопії, локального та інтегрального рентгеноспектрального елементного аналізу на електронному мікроскопі ZEISS EVO 50 XVP [35].

Вивчення впливу побічної дії лазерного опромінення на механічну міцність НТМ проводилося на зразках інструментальних композитів зі зв'язками різних систем, що відрізняються температурою плавлення та твердістю: ПГ-12H-01 + НТМ; ПС-12H-BK + + НТМ; ПГ-19M-01 + НТМ; Бр010 + + НТМ [30].

Після лазерної обробки шари композитів оброблялися у розчині кислот (HNO<sub>3</sub> + 3HCl) з підігрівом до 50° С до повного розчинення металевих зв'язок. Зерна HTM відбиралися на фільтрувальний папір, промивалися, висушувалися та досліджувалися із застосуванням растрової електронної мікроскопії та електронографічного аналізу. Одночасно, використовуючи стандартну методику, проводилося вимірювання їхньої статичної міцності.

Вплив лазерного випромінювання на міцність та змочуваність зерен НТМ

Аналіз результатів вимірювання міцності зерен КНБ досліджених марок за статичного навантаження показав, що вони при нагріванні випромінюванням з довжиною хвилі  $\lambda = 10,6$  мкм, щільністю потужності W<sub>p</sub> =  $(0,2-2,5) \times 10^3$ Вт/см<sup>2</sup> та швидкістю обробки в діапазоні від 0,2 до 2,0 м/хв практично не втрачають своєї вихідної міцності (рис. 12). Незначні відхилення пояснюються наявністю





Рис. 12. Міцність зерен КНБ за статичного навантаження після лазерного опромінення в середовищі аргону з потужністю Р = 800 Вт (діаметр плями фокусування d = 3 мм, швидкість відносного переміщення V = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/хв)

у вибірці графітоподібного α-BN, BN<sub>гр</sub>, що служить вихідним матеріалом для утворення β-BN, BN<sub>к</sub> у присутності металів (їхніх нітридів і боридів) лужної та лужноземельної груп періодичної системи елементів, які мають низьку вихідну міцність і потрапили до вибірки випадково, у виді зерен білого кольору [36].

Результати випробувань алмазів на статичну міцність після опромінення наведено на рис. 13. Аналіз наведених даних показує, що лазерний вплив може в деякій мірі знижувати міцність алмазних зерен. В першу чергу це обумовлено появою тріщин, що виникають на поверхні зерен і поширюються вздовж ребер їхнього ограновування. Причиною появи тріщин в алмазах є внутрішні напруження, дефекти алмазних зерен, режим опромінення і в першу чергу — його тривалість. Узагальнюючи можна констатувати, що зерна бездефектних та міцних синтетичних алмазів за обраних режимів лазерного опромінення своєї міцності практично не втрачають.









Рис. 14. Аналіз механізму впливу лазерного випромінення на зерна КНБ марки КВ 250/200 у зв'язці ПС-12H-ВК за умов лазерного опромінення з  $\lambda$  = 10,6 мкм

Застосування растрової електронної мікроскопії дозволило додатково уточнити діапазони режимів лазерного опромінення, за яких зберігаються вихідні фізико-механічні властивості зерен КНБ. На першому етапі опромінення відбувається очищення зерен КНБ від продуктів синтезу без негативного впливу на показники міцності (рис. 14, а, б). У міру збільшення інтенсивності опромінення на зернах з'являються тріщини (рис. 14, в), причиною появи яких є відмінність у коефіцієнтах термічного розширення кристалів КНБ та металевих зародків (магнію), що виходять на поверхню (рис. 15).

При цьому зініціюється фазове перетворення сВN→hBN, що опосередковано підтверджується різницею їхнього кольору (рис. 14, г). Цей ефект може бути використаний для лазерної сепарації зерен КНБ.

За аналогією досліджено вплив лазерного випромінювання на зерна синтетичного алмазу. На рис. 16 представлено загальний вид «доріжки» композиту із зернами алмазів та КНБ, отриманої методом лазерного рідкофазного спікання зв'язки ПС-12H-ВК.

Вивчення алмазних зерен показало, що вони в процесі лазерного опромінення погано змочуються розплавленої зв'язкою, в результаті чого на гранях зерен



Спектр	B crar.	В	с	N	0	Mg	si.	Ça	Ee	Підсумок	
Спектр 1	Да	19.77	7.54	0.00	45.59	25.16	0.64	0.51	0.80	100.00	
Спектр 2	Да	21.00	7.94	0.91	45.86	22.91	0.54	0.22	0.61	100.00	
Спектр 3	Да	29.79	6.37	0.00	47.56	15.15	0.33	0.30	0.50	100.00	
Спектр 4	Да	25.33	7.12	0.98	46.84	18.67	0.36	0.17	0.54	100.00	
Спектр 5	Да	29.93	6.19	5.33	42.15	15.53	0.25	0.14	0.48	100.00	
Спектр б	Да	30.34	10.32	11.90	38.91	8.06	0.09	0.09	0.29	100.00	
Спектр 7	Да	29.84	7.31	10.44	42.75	9.17	0.15	0.07	0.28	100.00	
Спектр 8	Да	38.66	3.55	35.68	20.34	1.48			0.27	100.00	
Спектр 9	Да	42.71	6.56	47.74	2.59	0.15			0.25	100.00	
Спектр 10	Да	41.51	8.35	48.56	1.27	0.09			0.21	100.00	
Maxe.		42.71	10.32	48.56	47.56	25.16	0.64	0.51	0.80		
Man.		19.77	3.55	0.00	1.27	0.09	0.09	0.07	0.21		

Усі результати у вагових %

Рис. 15. Електронне зображення зерен марки КВ 250/200





Рис. 16. Характерні валики алмазовмісного композиту: а та КНБ б, отримані лазерним рідкофазним спіканням

нерівномірно розподіляються залишки зв'язки (рис. 17, а). Добавка до зв'язки Со змінює картину. Підтвердженням цьому є дані растрової електронної мікроскопії (рис. 17, б). Наявність на поверхні алмазних зерен шару розплавленого Со завтовшки від 180 до 400 ангстрем встановлено за допомогою якісного та кількісного мікроаналізу.

Оскільки температура плавлення Со становить 1450° С, то можна стверджувати, що і алмазні зерна нагріваються до близьких температур. При цьому помітного термічного руйнування алмазів не спостерігалося. Наявність плівки металу підтверджує також гарну

змочуваність алмазів кобальтом, що дуже важливо для підвищення міцності механічного затискання алмазних зерен зв'язкою, а також процесів теплопередачі. Відомо, що рідкий Со добре розчиняє вуглець, що може негативно позначатися на механічних властивостях алмазів. Однак за такого неістотного часу існування рідкої фази (10<sup>-2</sup>–10<sup>-3</sup> с) перебіг помітних дифузійних процесів є малоймовірним. Проте для виключення можливості цієї взаємодії доцільно в зв'язках разом із Со застосовувати також карбідоутворюючі метали або карбіди, наприклад, карбід вольфраму.



Рис. 17. Вплив наявності Co у зв'язці на рівномірність її розподілення поверхнею алмазного зерна: а — без Co, б — після додавання Co





Рис. 18. Характерне утворення тріщин із збільшенням інтенсивності та часу лазерного опромінення вище критичних значень

Із перевищенням критичного значення густини потужності лазерного випромінювання або перевищенням допустимого часу опромінення (> 0,3 с) має місце інтенсивне утворення тріщин не тільки межею алмаз–зв'язка, але і в самому кристалі алмазу (рис. 18). Отримані дані дозволяють визначати діапазон режимів лазерного опромінення, за яких синтетичний алмаз та КНБ не втрачають своєї статичної міцності (рис. 19), що надає можливість використовувати їх для встановлення оптимальних режимів об-



Рис. 19. Діапазон режимів лазерного опромінення для різних металевих зв'язок, в межах яких забезпечується вихідна міцність: а — алмазів, б — КНБ при формуванні абразивних інструментальних шарів з використанням CO<sub>2</sub> лазерів

робки випромінюванням з довжиною хвилі 10,6 мкм для отримання інструментальних композитів на різних типах зв'язок.

### Висновки

В ході програмного моделювання температурного поля, зумовленого впливом рухомого джерела енергії, було реалізовано метод скінчених різниць, метод Ньютона для вирішення систем нелінійних рівнянь, використано рівняння балансу для знаходження значень температур на межі середовищ, і доведено, що ці методи є дійсно дієвими і досить чітко генерують картину змін температурного поля досліджуваного зразка. Єдиним недоліком такого підходу є значна витратність програмних ресурсів, що зумовлює досить велику тривалість розрахунків.

Виявлено, що розрідження вузлів адаптивної сітки на незмінних за температурою ділянках, є недостатнім, і це обумовлено неоднорідністю матеріалу покриття. До того ж, для полегшення розрахунків, застосовано деякі спрощення математичної моделі, наприклад, не враховано процеси тепло- та масопереносу, тобто отриманий результат є досить наближеним. Проте, як було з'ясовано, дослідження подібних процесів за допомоги реальних експериментів є ще більш витратним, як в плані часу, так і ресурсів, до того ж результати теж можна отримати лише з деяким наближенням.

Досліджено вплив лазерного опромінювання з довжиною хвилі 10,6 мкм на стан і фізичні властивості порошків синтетичних алмазів та КНБ різних марок та фракцій. Визначено оптимальні енергетичні параметри та умови лазерного опромінювання цих порошків, що забезпечують температурний інтервал їхнього нагрівання в діапазоні 1000–1500° С за відсутності негативного термічного руйнівного впливу на абразивні зерна. Це дозволяє з принципово вищою продуктивністю і нижчою собівартістю процесу синтезувати алмазовмісні композити для різноманітної номенклатури інструментів з точки зору форми, геометричних розмірів та властивостей зв'язок для обробки широкого спектру конструкційних матеріалів (сталі, композитні та керамічні матеріали, вуглепластики тощо), а також створює передумови для лазерного селективного сортування та лазерного модифікування порошків НТМ.

Встановлено діапазони режимів лазерного опромінення з довжиною хвилі 10,6 мкм для різних металевих зв'язок, які забезпечують вихідну міцність абразивних зерен:  $W_p = (0,1-1,8) \times 10^4$  BT/cm<sup>2</sup>, час дії (0,09–0,36 с), температура спікання 400–1300° С.

#### Подяка

Дослідження фінансується Національним фондом досліджень України, конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності України», проєкт № 2023.04/0051 «Синтез алмазовмісних композитів термодеформаційним лазерним спіканням для абразивної обробки великогабаритних деталей авіа-, судно- та машинобудування» (№ д/р 0124U003940).





## Список використаної літератури/References

1. Munir, Z. A., Quach, D. V., & Ohyanagi, M. (2011). Electric current activation of sintering: a review of the pulsed electric current sintering process. *J. Am. Ceram. Soc.*, 94(1), 1–19. <u>https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04210</u>.

2. Orrù, R., Licheri, R., Locci, A. M., Cincotti, A., & Cao, G. (2009). Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering. *Mater. Sci. Eng.*, 63(4-6), 127–287. <u>https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.09.003</u>.

3. Blochanevich, A. M., & Bochko, A. M. (2004). Laser cutting materials on basis of diamond and compact modification boron nitride. *Powder Metall*, 3/4, 47–53.

4. Tolochko, N. K., & et al. (1998). Absorptivity measurement of freely located one component metal powders and its change during laser processing. *Powder Metall*, 7/8, 89–94.

5. Idan Alaa, F. I., Golovko, L., Goncharuk, O., & Kostyk, K. (2016). The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, 5(80), 69–73. <u>https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65455</u>.

6. Węglowski, M. S., Błacha, S., & Phillips, A. (2016). Electron beam welding — techniques and trends — review. *Vacuum*, 130, 72–92.

7. Rommela, D., Scherma, F., Kuttnerb, C., & Glatzela, U. (2016). Laser cladding of diamond tools: interfacial reactions of diamond and molten metal. *Surf. Coat. Technol.*, 291, 62–69. <u>https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.014</u>.

8. Rabiey, M., Walter, C., Kuster, F., Stirnimann, J., Pude, F., & Wegener, K. (2012). Dressing of hybrid bond CBN wheels using short-pulse Fiber laser. *Aust. J. Mech. Eng.*, 58(7–8), 7–8. <u>https://doi.org/10.5545/svjme.2011.166</u>.

9. Huang, S.-F., Tsai, H.-L., & Lin, S.-T. (2002). Laser brazing of diamond grits using a cu-15Ti-10Sn brazing alloy. *Mater. Trans.*, 43(10), 2604–2608. https://doi.org/10.2320/matertrans.43.2604.

10. Zhao, Q., & Guo, B. (2015). Ultra-precision grinding of optical glasses using mono-layer nickel electroplated coarse-grained diamond wheels. Part 2: Investigation of profile and surface grinding, *Precis. Eng.*, 39, 67–78.

11. Guo, B., Meng, Q., Wu, G., Zhao, Q., & Li, S. (2022). Parallel axis precision grinding of microtooth internal thread with the coarse-grains CBN wheels, *J. Manuf. Processes*, 74, 474–485.

12. Deng, H., & Xu, Z. (2019). Dressing methods of superabrasive grinding wheels: A review, *J. Manuf. Processes*, 45, 46–69.

13. Ding, W., Xu, J., Chen, Z., Su, H., & Fu, Y. (2010). Grindability and surface integrity of cast nickel-based superalloy in creep feed grinding with brazed CBN abrasive wheels, *Chin. J. Aeronaut.*, 23(4), 501–510.

14. Xi, X. X., Ding, W. F., Wu, Z. X., & et al. (2021). Performance evaluation of creep feed grinding of gamma-TiAl intermetallics with electroplated diamond wheels, *Chin. J. Aeronaut.*, 34(6), 100–110.

15. Ding, W., Dai, C., Yu, T., Xu, J., & Fu, Y. (2017). Grinding performance of textured monolayer CBN wheels: Undeformed chip thickness nonuniformity modeling and ground surface topography prediction, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 122, 66–80.

16. Wang, T., Wu, C., Liu, H., Chen, M., Cheng, J., & Dingning, S. u. (2020). On-machine electric discharge truing of small ball-end fine diamond grinding wheels, *J. Mater. Process. Technol.*, 277, 116472, <u>https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116472</u>.



17. Chen, B., Guo, B., & Zhao, Q. (2015). On-machine precision form truing of arc-shaped diamond wheels, *J. Mater. Process. Technol.*, 223, 65–74.

18. Chen, G. Y., Cai, S., Zhou, C., & et al. (2015). On the laser-driven integrated dressing and truing of bronze-bonded grinding wheels, *Diam. Relat. Mater.*, 60, 99–110.

19. Deng, H., & Xu, Z. (2021). Laser-dressing topography and quality of resin-bonded diamond grinding wheels, *Opt. Lasers Eng.*, 136, 106322, <u>https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106322</u>.

20. Babu, N. R., & Radhakrishnan, V. (1989). Investigations on laser dressing of grinding wheels — part II: grinding performance of a laser dressed aluminum oxide wheel, *J. Eng. Industry*, 111(3), 253–261.

21. Ramesh Babu, N., Radhakrishnan, V., & Murti, Y. V. G. S. (1989). Investigations on laser dressing of grinding wheels — part I: preliminary study, *J. Eng. Industry*, 111(3), 244–252.

22. Yan, S., Wu, D., Niu, F., Ma, G., & Kang, R. (2017).  $Al_2O_3$ -ZrO<sub>2</sub> eutectic ceramic via ultrasonic-assisted laser engineered net shaping, *Ceram. Int.*, 43(17), 15905–15910.

23. Zhang, C., & Shin, Y. C. (2002). A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 42(7), 825–835.

24. Hosokawa, A., Ueda, T., & Yunoki, T. (2006). Laser dressing of metal bonded diamond wheel, *CIRP Ann.*, 55(1), 329–332.

25. Deng, H., Chen, G. Y., Zhou, C., Zhou, X. C., He, J., & Zhang, Y. (2014). A theoretical and experimental study on the pulsed laser dressing of bronzebonded diamond grinding wheels, *Appl. Surf. Sci.*, 314, 78–89.

26. Deng, H., Deng, Z., & Li, S. (2017). The grinding performance of a laserdressed bronzebonded diamond grinding wheel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 88(5–8), 1789–1798.

27. Pfaff, J., Warhanek, M., Huber, S., Komischke, T., Hänni, F., & Wegener, K. (2016). Laser touch dressing of electroplated CBN grinding tools, *Proc. CIRP*, 46, 272–275.

28. Ackerl, N., Warhanek, M., Gysel, J., & Wegener, K. (2020). Ultra-short pulsed laser conditioning of metallic-bonded diamond grinding tools, *Mater. Des.*, 189, 108530, <u>https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108530</u>.

29. Guo, B., Meng, Q., Li, S., Wu, G., Xiang, Y., & Zhao, Q. (2022). Pulse laser precision truing of the V-shaped coarse-grained electroplating CBN grinding wheel, *Materials & amp; Design*, 110650. <u>https://doi.org/10.1016/j.mat-des.2022.110650</u>.

30. Goncharuk, O., Zhuk, R., Kaglyak, O., & et al. (2018). Laser Sintering of Abrasive Layers with Inclusions of Cubic Boron Nitride Grains. *Lasers Manuf. Mater. Process*, 5, 298–316. <u>https://doi.org/10.1007/s40516-018-0068-0</u>.

31. Gan, J., Gao, H., Wen, S., & et al. (2020). Simulation, forming process and mechanical property of Cu-Sn-Ti/diamond composites fabricated by selective laser melting. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 87: 105144. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105144</u>.

32. Li, L., Li, S., Zhang, B., & Fan, T.-H. (2021). Phase-field modeling of selective laser brazing of diamond grits[J]. *Physics of Fluids*, 33(5), 052113. <u>https://doi.org/10.1063/5.0049096</u>.



 33. Lukyanenko, S. O. (2004). Adaptive computing methods for modeling objects with distributed parameters. Kyiv: Polytechnic Publishing House, 236 p. 34. Goncharuk, A. A., Golovko, L. F., & Kaglyak, A. D. (2020). Laser thermal deformation sintering of abrasive tools based on cubic boron nitride. *Mechanics and Advanced Technologies*, 1(88), 108–123. DOI: <u>https://doi.org/10.20535/</u>

2521-1943.2020.88.200770.

35. *Instrument Database: Carl Zeiss AG – EVO® 50 Series*. Retrieved from <u>https://speciation.net/Database/Instruments/Carl-Zeiss-AG/EVO-50-Series-;i663</u>.

36. Holovko, L. F., Honcharuk, O. O., Lutai, A. N., Sorochenko, V. G., & Bloschytsin, M. S. (11.03–11.04, 2014). Laser separation of grinding powders of cubic boron nitride. *Proc. Materials VI International scientific and technical web-conference 'Composite materials'*, 16–20.

The results of software modeling of the temperature field caused by the influence of a moving energy source in the process of synthesis of the tool layer of an abrasive tool based on superhard materials (SHM) are reported, which was implemented by finite difference and Newton methods for solving systems of nonlinear equations, and for finding temperature alues at the boundary environments, the heat balance equation was used.

Keywords: laser radiation; mathematical modeling; abrasive tool; diamond; cubic boron nitride.

Надійшла до редакції 23.08.24