

*Д. О. Федоренко, д-р техн. наук В. О. Федорович,  
д-р техн. наук О. Ю. Федоренко, канд. техн. наук К. Б. Дайнеко  
(НТУ Харківський політехнічний інститут),  
м. Харків, Україна)*

## **Керамоматричні композиційні матеріали для виготовлення алмазно-абразивного інструменту**

### **Вступ**

Сучасний рівень науки і техніки потребує підвищення вимог до якості надточної обробки поверхонь деталей, що обумовлює необхідність удосконалення та створення нових високопродуктивних інструментів для потреб підприємств машинобудівного, військово-промислового, сільськогосподарського та гірничовидобувного комплексів. Алмазне шліфування є найбільш високопродуктивним способом обробки деталей з металів, твердих сплавів і надтвердих неметалічних матеріалів. Незважаючи на численні дослідження в області його удосконалення, питання підвищення продуктивності та ресурсності алмазно-абразивного інструменту (ААІ) залишається відкритим [1, 2]. Одним із перспективних напрямків підвищення ефективності алмазно-абразивної обробки є використання алмазних кругів на керамічних зв'язках, які, порівняно з металевими або полімерними зв'язками, підвищують твердість алмазозносного шару, збільшують припустиму температуру абразивної обробки та забезпечують високу точність обробки деталей з інструментальних металів і сплавів, а також важкооброблювальних композиційних, в т. ч. гібридних матеріалів, кераміки, ситалів, скла тощо [3, 4].

Як відомо, при експлуатації ААІ відбувається зниження їх ріжучої здатності через утворення зон зносу на зернах, а також «засалювання» робочої зони частинками матеріалу, в результаті чого ефективність шліфування різко знижується. У зв'язку з цим останнім часом спостерігається збільшення частки алмазного інструменту на керамічних зв'язках, що пов'язано з їх перевагами: високою продуктивністю обробки, температуростійкістю, здатністю до самозагострення і підвищеним терміном експлуатації. Аналіз інформаційних потоків в області створення алмазних кругів показав, що за останнє десятиліття кількість

праць, присвячених алмазним кругам, збільшилася більш ніж в 2,5 раза. При цьому частка публікацій, які стосуються кругів на керамічній зв'язці, становить всього 8 %.

Головний недолік існуючих керамічних зв'язок для ААІ пов'язаний з високою температурою спікання таких керамоматричних композитів (понад 800 °С). Тому відомі типові керамічні зв'язки застосовують переважно для виготовлення шліфувально-го інструменту з температуростійких абразивів (кубоніту або корунду) [4, 5]. Спікання алмазовмісних композитів в таких умовах викликає передчасне руйнування зерен внаслідок виникнення в них напруг, а також графітизації, що унеможлиблює використання типових керамічних зв'язок при виготовленні ААІ [6, 7].

Втім відомо, що саме керамічна зв'язка обумовлює здатність до раціонального самозагострення ААІ — регенерації робочої поверхні алмазних кругів при шліфуванні за рахунок оновлення ріжучих поверхонь алмазів, розкриття нових і видалення затуплених зерен, що сприяє підвищенню продуктивності обробки та економічної ефективності використання інструменту [4, 5]. Тому використання керамоматричних алмазних кругів дозволить збільшити продуктивність обробки і розширити область застосування інструменту.

З огляду на вищевикладене, метою роботи є створення високоресурсних алмазно-абразивних інструментів з використанням легкоплавких керамічних зв'язок із заданими властивостями, які забезпечують збереження цілісності зерен при спіканні алмазовмісного шару на етапі виготовлення інструментів, покращують алмазоутримання і створюють умови для шліфування в режимі раціонального самозагострення.

Дослідження виконували в кілька етапів, що включали: теоретичний аналіз процесу спікання алмазоносного шару інструменту з використанням мікрорівневого 3D-моделювання; оптимізацію якісних і кількісних характеристик компонентів алмазоносного шару з застосуванням математичного планування модельних експериментів; розробку легкоплавкої керамічної зв'язки з заданими властивостями та визначення складу алмазовмісного керамоматричного композита зі зниженою температурою спікання; виготовлення дослідних зразків інструменту, для яких проводили дослідження структури і властивостей.

## **Теоретична частина**

3D-моделювання процесів спікання алмазоносного шару і алмазного шліфування здійснювали з використанням

програмних пакетів COSMOSWorks, ANSYS, ABAQUS, розрахунки в яких засновані на методі кінцевих елементів (МКЕ). Методика моделювання включала такі етапи: розробку 3D-моделі систем, що відображає особливості елементарного об'єму алмазного круга; побудову сітки і її згущення в місцях металевих включень у зернах, а також контакту елементів системи один з одним; завдання параметрів навантаження моделі (тиску пресування і температури спікання, що відповідають умовам виготовлення алмазних кругів); завдання для всіх елементів моделі фізико-механічних і теплофізичних властивостей [8, 9]. Фрагмент зв'язки (рис. 1) виконаний у вигляді прямокутного паралелепіпеда, в якому є пори складної форми. Алмазні зерна виконані

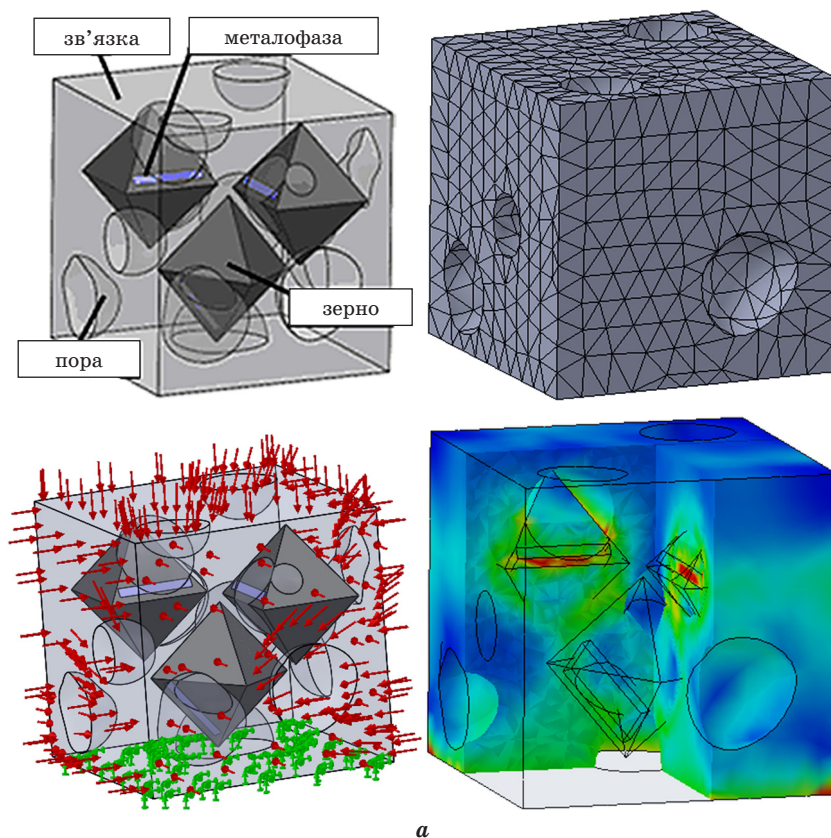
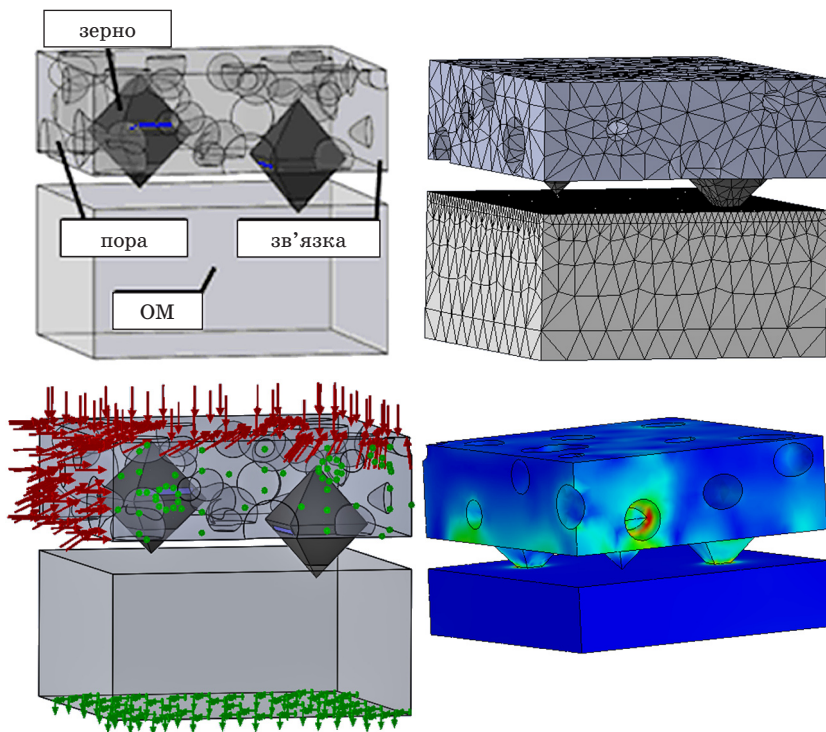


Рис. 1. 3D-моделі, побудова сітки кінцевих елементів, схема навантаження та вигляд епюри напружено-деформаційного стану (НДС) при дослідженні процесів спікання алмазозного шару (а) та шліфування (б)

з геометрією октаедра; розмір зерен обирали залежно від розглянутої зернистості алмазних порошоків. Зерна містять включення металу-катализатора (в подальшому металофази) у вигляді довільно орієнтованих пластин, об'ємний вміст яких (0,6 до 7,5 %) залежить від марки алмазів (відповідно для марок АС15 та АС2). Оброблювальний матеріал (ОМ) виконаний у вигляді прямокутного паралелепіпеду. Як критерій руйнування розглядали максимальні еквівалентні напруження, розраховані відповідно до теорії Мора—Кулона з урахуванням поправок Писаренка—Лебедева для крихких тіл [10], та відносний об'єм елементів системи (зерна або зв'язки), напруги в яких перевищують межу міцності матеріалів на розрив ( $\sigma_p$ ) для відповідного елемента.

При 3D-модельованні процесу виготовлення алмазозносного шару оцінювали роль температурного і силового факторів (як окремо, так і при одночасному впливі). Розрахунки показали, що рівень напружень при підвищенні тиску до 50 МПа і температурі



6

Закінчення рис. 1

спікання до 400 °С не перевищує межі міцності алмазів марки АС6 і зернистості 125/100 ( $\sigma_p = 0,2$  ГПа), що свідчить про незначний вплив силового фактора. При підвищенні температури спікання до 600 °С і більше в зерні в області металофази виникають напруги, які обумовлені різницею ТКЛР алмазу та металу, що спричиняє руйнування зерна. З підвищенням об'ємного вмісту включень металофази спостерігається експоненціальне збільшення напруг, локалізованих поблизу включень металофази. Дослідження показали, що наявність руйнівних напружень в мікроділянках зерна не є достатньою умовою його пошкодження. Руйнування зерна починається в разі, якщо об'єм, в якому зафіксовані граничні руйнівні напруги, перевищує 10 % від загального об'єму зерна.

При моделюванні впливу властивостей металофази на стан зерен при спіканні розглянуті найбільш типові для синтезу алмазів сплави-розчинники:  $\text{Ni}_{39,6}\text{Mn}_{59,6}(\text{Cr}_3\text{C}_2)_{0,8}$ ;  $\text{Fe}_{44}\text{Co}_{44}(\text{Cr}_3\text{C}_2)_{12}$ ;  $\text{Fe}_{95}\text{Si}_5$ , які значно відрізняються за показниками ТКЛР і модуля пружності. Встановлено, що майже дворазове підвищення ТКЛР металофази призводить до збільшення локальних еквівалентних напружень в зерні в 2,5—2,8 раза. Критичний рівень напружень спостерігається в окремих мікроділянках зерна вже за 400 °С, однак руйнування зерна ймовірно тільки при нагріванні вище 700—750 °С, тому що при цьому обсяг критичних напружень у зерні досягає 15—22 %. В умовах спікання композиту за 600—650 °С ймовірність руйнування зерен мала, оскільки обсяг критичних напружень не перевищує 10 %.

Порівняння температурних залежностей двох критеріїв руйнування зерна з даними експериментальних визначень цілісності зерен після спікання композиту показав, що відносний обсяг критичних напружень в зерні ( $\Delta V_{\text{кр}}$ ) точніше відображає ступінь руйнування алмазів при спіканні алмазоносного шару. Тому для визначення раціональної температури спікання алмазоносного шару використаний саме цей параметр, що характеризує відносний об'єм зерна, в якому виникають напруги руйнування алмазів даної марки і зернистості. Визначено межі значень даного параметра (3—7 %), за яких зерна в композиті перебувають у стані передруйнування, особливістю якого є утворення в зерні мікротріщин без втрати його цілісності. За прийнятою робочою гіпотезою такий стан зерен є необхідною умовою для їх раціонального самозагострення при шліфуванні, а також попередження їх передчасного руйнування під час спікання алмазоносного шару інструменту. Математична обробка результатів модельних

розрахунків дозволила визначити діапазон температур спікання алмазних кругів, здатних до раціонального самозагострення (таблиця).

*Таблиця*

**Рекомендовані температури спікання керамоматричних композитів при використанні алмазного порошку різної марки та зернистості**

Зернистість алмазів	Марка алмазних зерен											
	АС2			АС4			АС6			АС15		
	$\sigma_p$	$T_{min}$	$T_{max}$	$\sigma_p$	$T_{min}$	$T_{max}$	$\sigma_p$	$T_{min}$	$T_{max}$	$\sigma_p$	$T_{min}$	$T_{max}$
50/40	0,35	666	687	0,6	692	719	0,84	710	737	2	763	795
63/50	0,22	649	672	0,37	676	701	0,67	700	728	1,4	748	779
80/63	0,14	632	653	0,27	662	688	0,41	686	715	0,88	731	761
100/80	0,09	614	635	0,19	650	675	0,27	670	698	0,59	718	749
125/100	0,07	600	622	0,12	634	660	0,2	658	686	0,53	706	737
160/125	0,05	583	604	0,11	625	652	0,14	644	671	0,28	689	721
200/160	0,03	568	590	0,07	610	635	0,11	633	661	0,2	674	705
250/200	—	—	—	—	—	—	0,07	619	648	0,14	661	691

Експериментальна перевірка підтвердила висунуте припущення: електронно-мікроскопічними дослідженнями встановлено, що при рекомендованій температурі спікання композиту в зерні утворюються мікротріщини, які не руйнують алмазні зерна при спіканні керамоматричного композиту і створюють передумови для їх раціонального самозагострення при шліфуванні.

З використанням багатофакторного експерименту отримано рівняння регресії, які адекватно описують залежності обраних критеріїв руйнування зерен від основних властивостей компонентів алмазних кругів в умовах, що імітують процеси їх виготовлення:

$$\sigma_{\text{екв}} = 31,09 - 0,393X_1 - 0,169X_2 - 2,287X_3 - 3,604X_4 + 8,54X_1X_2 + 0,848X_1X_3 + 0,84X_1X_4 + 0,605X_2X_3 + 1,603X_2X_4 + 0,381X_3X_4 - 12,893X_1^2 - 8,598X_2^2 + 14,497X_3^2 - 10,033X_4^2; \quad (1)$$

$$V_{\text{крп}} = 10,948 + 5,684X_1 + 0,975X_2 + 0,423X_3 + 8,313X_4 - 0,101X_1X_2 + 0,074X_1X_3 + 2,284X_1X_4 - 0,26X_2X_3 - 0,423X_2X_4 - 0,075X_3X_4 + 0,448X_1^2 - 2,667X_2^2 + 2,493X_3^2 + 0,063X_4^2, \quad (2)$$



де  $X_1$  — ТКЛР металофази;  $X_2$  — ТКЛР зв'язки;  $X_3$  — модуль пружності зв'язки;  $X_4$  — температура спікання алмазозного шару.

Обробка результатів планованого імітаційного експерименту дозволила встановити оптимальні значення властивостей основних компонентів та температури спікання алмазозного шару: ТКЛР металофази  $\alpha_{\text{Me}} = (1,2 \div 1,4) \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ; ТКЛР зв'язки  $\alpha_{\text{зв}} = (6,0 \div 6,8) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ; модуль пружності зв'язки  $E_{\text{зв}} = 112 \div 120$  ГПа, температура спікання алмазозного шару  $T_{\text{сп}} = 620 \div 655$  °С.

З використанням симплекс-ґратчастого планування визначено співвідношення «алмазні зерна : зв'язка : пори», яке задовольняє задані умови оптимізації і може змінюватись від 1 : 1,4 : 1,6 до 1 : 2 : 2.

## Експериментальна частина

Методологія розробки керамічної зв'язки із заданими властивостями включала вибір модельних композицій в оксидній системі  $R_2O - R_2O_3 - ZnO - TiO_2 - SiO_2$  (де  $R_2O = Li_2O, Na_2O, K_2O$ ;  $R_2O_3 = Al_2O_3; V_2O_5$ ); прогнозний розрахунок їх технологічних, теплофізичних і фізико-механічних властивостей з використанням відомих методів [11, 12]; розробку складу легкоплавкого склакомпоненту зв'язки на основі розв'язання задачі оптимізації з урахуванням обмежень, прийнятих за результатами 3D-моделювання; визначення складу та виготовлення композиту, а також дослідження топологічних характеристик його поверхні після шліфування (лазерний скануючий мікроскоп *KEYENCE VK-9700K*) і особливостей мікроструктури (лазерний електронний мікроскоп *JSM-6390 LV*). Середній розмір ділянок зносу зерен ( $S_{\text{зп}}$ ) вимірювали з використанням лазерного скануючого мікроскопу; питому втрату алмазів при шліфуванні визначали за стандартною методикою, яка передбачає визначення ступеня зношування алмазозного шару за втратою інструментом ваги після випробувань (ГОСТ 30352—96).

Аналіз складів модельних оксидних композицій, обраних у базовій оксидній системі, та їх властивостей, визначених розрахунковим шляхом, дозволив обрати модельні оксидні композиції для розробки легкоплавких склакомпонентів керамічної зв'язки, що забезпечують задану температуру спікання композиту ( $T_{\text{сп}} = 658 \div 686$  °С) з урахуванням марки та зернистості алмазів (АС6 125/100) і задовольняють ряд технологічних критеріїв, які

обумовлюють консолідацію композиту, виключають термічну деструкцію алмазів при спіканні, поліпшують алмазоутримання та забезпечують умови для самозагострення зерен при шліфуванні.

Як критерії при розробці легкоплавкого склакомпоненту керамічної зв'язки розглядали властивості, які обумовлюють відповідність умовам, визначеним на етапі теоретичних досліджень: температура плавлення ( $T_{\text{пл}} = 600 \div 625$  °С), що забезпечує зниження температури спікання композиту до  $620 \div 655$  °С; відносно невисокий ТКЛР ( $\alpha_{20-600} = (6 \div 7) \cdot 10^{-6}$ , 1/К); підвищений модуль пружності ( $E = 110 \div 120$  ГПа), що досягається за рахунок тонкодисперсної кристалізації склафази. Додатковою вимогою були в'язкість розплаву  $\eta \leq 10^3$  Па·с та його поверхневий натяг  $\sigma \leq 0,3$  Н/м, для забезпечення задовільного змочування зерен та спікання композиту при заданій температурі. Рішення оптимізаційної задачі проводили з урахуванням прийнятих обмежень властивостей. Оптимальний склад визначали шляхом розв'язання системи рівнянь для заданих значень цільової функції. Як результат отримано наступний хімічний склад склакомпонента зв'язки, мас. %: 25 Na<sub>2</sub>O; 5 K<sub>2</sub>O; 5 Li<sub>2</sub>O; 6 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 22 TiO<sub>2</sub>; 34 SiO<sub>2</sub>.

Для виготовлення легкоплавкого склакомпонента керамічної зв'язки використовували кальциновану соду, поташ, борну кислоту, вуглекислий літій, титанові білила та кварцовий пісок Новоселівського родовища (Харківської обл.). З усередненої суміші компонентів варили фриту за температури 900 °С. Як вторинний абразив, здатний підвищити зносостійкість зв'язки, використовували SiC в кількості 18—24 мас. %. Для поліпшення формування напівфабрикату до складу зв'язки вводили 5 мас. % пластифікатору (каолініто-гідрослюдистої глини). Розроблена керамічна зв'язка має наступні властивості:  $T_{\text{пл}} = 620$  °С, ТКЛР =  $6,9 \cdot 10^{-6}$  1/К;  $E = 115$  ГПа.

Компоненти зв'язки, подрібнені до повного проходження крізь сито № 0063, змішували з алмазним порошком АС6 із зернистістю 125/100 мм за його концентрації 50 об. % та брикетували при питомому тиску 80 МПа у вигляді зразків розміром 70×35×10 мм. Композити отримували шляхом спікання в муфельній печі за температури 650 °С впродовж 20 хв.

## Результати та їх обговорення

За результатами диференційно-термічного аналізу встановлено, що при нагріванні склакомпонента керамічної зв'язки



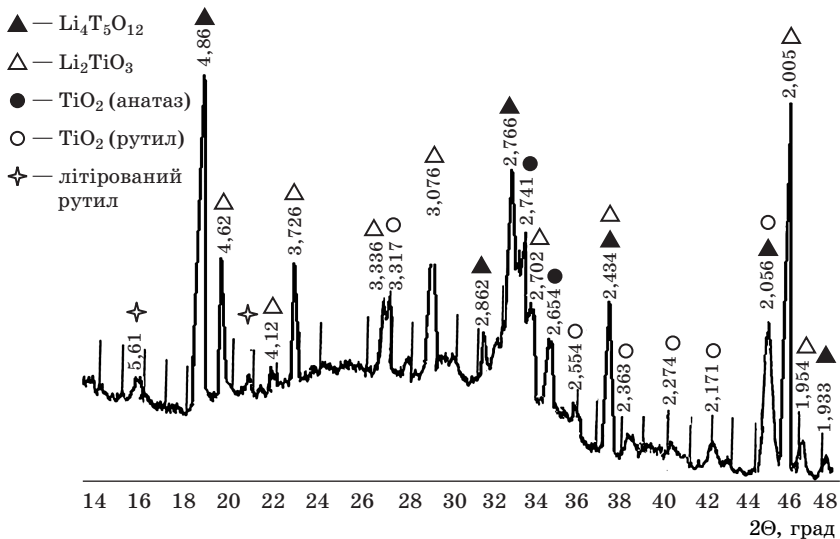


Рис. 2. Фрагмент дифрактограми легкоплавкого склакомпонента керамічної зв'язки

в інтервалі температур 600—620 °С відбувається кристалізація новоутворень. З використанням рентгенофазового аналізу (рис. 2) ці новоутворення ідентифіковано як метатитанат літію  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  і пентатитанат літію  $\text{Li}_4\text{T}_5\text{O}_{12}$ . Широкий рефлекс в позиції кута 15—16 (2θ), а також кута 20—21 (2θ), імовірно, відноситься до літірованого рутилу (форми рутилу, що містить ~ 0,78 % літію).

Результати дослідження цілісності зерен після спікання композиту показали, що при використанні розробленої керамічної зв'язки ступінь руйнування зерен не перевищує 10 %, тоді як при використанні типової зв'язки К1-01 [4] відсоток зруйнованих зерен склав 37 %. Позитивний технічний ефект отримано завдяки зниженню температури спікання композиту (з 750 °С для типової керамічної зв'язки К1-01 до 650 °С для розробленої легкоплавкої зв'язки) і оптимізації його властивостей.

На SEM-знімку ділянки РПК після шліфування (рис. 3, а) при збільшенні  $\times 1500$  зафіксовані площадки зносу зерен, тріщини в зернах і мікровідколи, які утворюють нові ріжучі поверхні (рис. 3, б і з). При збільшенні  $\times 10000$  можна спостерігати морфологію контактної зони зв'язки та зерна (рис. 3, в), яка свідчить про хорошу адгезію зв'язки до алмаза, а також криптокристалічну структуру зв'язки (рис. 3, ж), що загалом

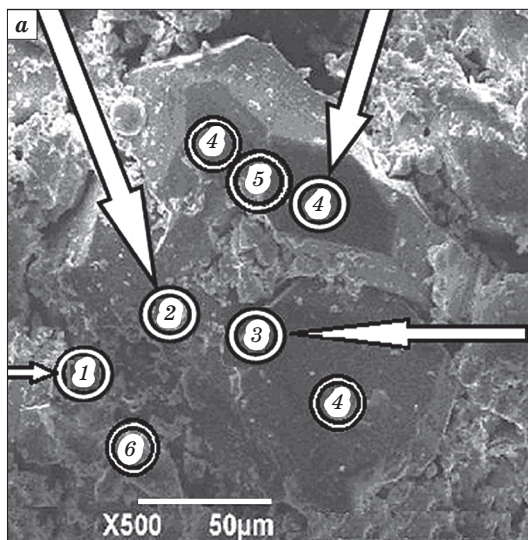
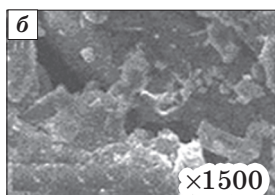
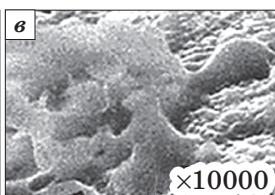


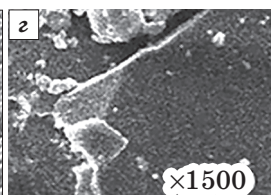
Рис. 3. SEM-знімки ділянок робочої поверхні круга після шліфування



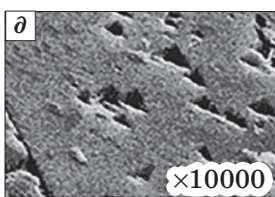
контактна тріщина (ділянка 1)



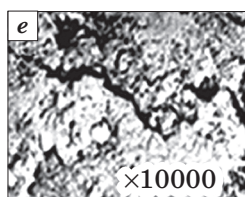
контактна зона зв'язки та зерна (ділянка 2)



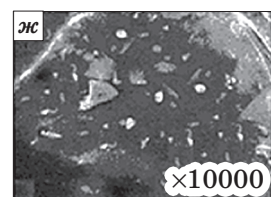
мікроскол в зерні (ділянка 3)



ділянка зносу зерна (ділянка 4)



мікротріщина в зерні (ділянка 5)



криптокристалічна зв'язка (ділянка 6)

підвищує алмазоутримання та міцність алмазозоносного шару. Таке ж збільшення дозволяє визначити характер поверхні ділянок зносу зерен (рис. 3, д), а також розміри мікротріщин у зерні (рис. 3, е), які спричиняють оновлення ріжучих граней в місцях мікросколів.

З використанням розробленої легкоплавкої керамічної зв'язки за температури 650 °С виготовлені алмазні круги, які пройшли випробування при шліфуванні твердого сплаву ВК8. Якісну і кількісну оцінку зносу зерен на різних стадіях шліфування здійснювали за результатами топографічних досліджень робочої поверхні кругів (РПК) після шліфування впродовж 10 с і 3 хв, отриманих з використанням лазерної скануючої мікроскопії. Незначні зміни відносної опорної площі поверхні зразків ( $t_{ps} = 0,45 \div 0,60 \%$ ) свідчать про те, що знос робочої поверхні круга при шліфуванні відбувається не за рахунок випадання зерен зі зв'язки, а внаслідок поступового мікроруйнування тих їх ділянок, які втратили ріжучу здатність під час шліфування.

Залежності критеріїв, за якими оцінюють ступінь самозагострення зерен при шліфуванні (питома витрата алмазів і розміри ділянок зносу зерен), від режимів шліфування свідчать про те, що при шліфуванні твердих сплавів (ВК8) самозагострення зерен більшою мірою проявляється при прискореному режимі обробки: зі збільшенням швидкості шліфування середній розмір ділянок зносу зерен зменшується на  $\sim 25\text{—}30\%$ . При збільшенні швидкості шліфування ( $v > 30$  м/с) спостерігається підвищений знос алмазоносного шару. Зі збільшенням поперечної подачі (понад 0,02 мм/подв. хід) помітно підвищується питома витрата алмазів.

## Висновки

В результаті досліджень розроблена нова керамічна зв'язка на основі композицій системи  $R_2O\text{—}R_2O_3\text{—}ZnO\text{—}TiO_2\text{—}SiO_2$  (де  $R_2O = Li_2O, Na_2O, K_2O$ ;  $R_2O_3 = Al_2O_3; B_2O_3$ ), яка забезпечує спікання алмазоносного шару кругів за температури 620—650 °С. Запропонована методологія розробки легкоплавкої керамічної зв'язки із заданими властивостями попереджає передчасне руйнування алмазних зерен на етапі виготовлення інструмента та збільшує алмазоутримання при шліфуванні. З використанням розробленої легкоплавкої зв'язки виготовлені алмазні круги, які пройшли випробування та підтвердили здатність до раціонального самозагострення при шліфуванні за прискореним режимом (швидкість до 30 м/с, поперечна подача до 0,02 мм/подв. хід). Використаний підхід до проектування складу і структури ААІ на основі кінцево-елементного моделювання дозволив надати рекомендації виробникам алмазних кругів, які підвищили ресурсність інструменту за рахунок раціонального самозагострення при шліфуванні.

## Бібліографічний список

1. Современное оборудование, инструмент и технологии абразивной обработки / Ю. М. Губарев, З. И. Кремень // *Инструмент и технологии*. 2011. № 33, вып. 3. С. 15—21.
2. Проблема повышения производительности при шлифовании и методы ее решения / М. В. Правдик // *Инструмент и технологии*. 2010. № 28, вып. 2. С. 67—72.
3. Управление режущей способностью алмазных кругов как фактор повышения эффективности шлифования изделий из керамики / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова, А. Л. Медведев // *Вестник двигателестроения*. 2012. № 1. С. 141—146.
4. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение* : монография в 6 томах. К. : ИСМ им. В. И. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2003—2007. Т. 3. *Композиционные инструментальные материалы* / А. Е. Шило, Е. К. Бондарев, С. А. Кухаренко и др. К. : ИСМ им. В. И. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005. 280 с.
5. *Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты* / Л. В. Судник, П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко. Минск : Беларуская навука, 2012. 318 с.
6. К вопросу о механизме разупрочнения кристаллов синтетического алмаза при высокотемпературном нагревании / А. Л. Майстренко, А. И. Боримский, Л. Н. Девин, Л. М. Бологова, А. В. Щербаков, А. Г. Сулима // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения* : сб. науч. тр. К. : ИМ им. В. М. Бакуля НАНУ, 2010. Вып. 13. С. 272—279.
7. Термостойкость алмазных материалов / В. И. Бугаков // *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*. 2005. № 5. С. 25—28.
8. *3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования* / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. Х. : НТУ «ХПИ», 2006. 364 с.
9. Principles of 3D modeling of the production and application of diamond composite materials / A. G. Mamalis, A. I. Grabchenko, V. A. Fedorovich, D. O. Fedorenko // *Nanotechnology perception*. Basel : Institute of advanced study, 2012, pp. 132—139.
10. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. К. : Наук. думка, 1976. 416 с.
11. Математичне моделювання та оптимізація об'єктів хімічних технологій тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів : навч. посібник / В. І. Голеус, О. В. Карасик. Дніпропетровськ : Літограф, 2016. 160 с.
12. Расчеты по химии и технологии стекла : справочное пособие / М. А. Матвеев, Г. М. Матвеев, Б. Н. Френкель. М. : Стройиздат, 1972. 240 с.

## References (transliterated)

1. Gubarev Yu. M., Kremen' Z. I. Sovremennoye oborudovaniye, instrument i tekhnologii abrazivnoy obrabotki [Modern equipment, tools and technologies for abrasive processing]. *Instrument i tekhnologii* [Instrument and technology], 2011, no. 33, iss. 3, pp. 15—21 (in Russian).
2. Pravdik M. V. Problema povysheniya proizvoditel'nosti pri shlifovanii i metody yeyo resheniya [The problem of increasing productivity in grinding and methods for

solving it]. *Instrument i tekhnologii* [Instrument and technology], 2010, no. 28, iss. 2, pp. 67—72 (in Russian).

3. Gusev V. V., Kalafatova L. P., Medvedev A. L. Upravleniye rezhushchey sposobnost'yu almaznykh krugov kak faktor povysheniya effektivnosti shlifovaniya izdeliy iz keramiki [Controlling the cutting ability of diamond wheels as a factor in increasing the efficiency of grinding ceramic products]. *Vestnik dvigatelestroyeniya* [Herald of engine building], 2012, no. 1, pp. 141—146 (in Russian).

4. *Sverkhтвердые материалы. Получение и применения. Монография в 6 томах* [Superhard materials. Obtaining and application. Monograph in 6 volumes]. Kiev: ISM im. V. I. Bakulya, IPTS “ALCON” NANU Publ., 2003—2007. Vol. 3. Shilo A. E., Bondarev E. K., Kukhareno S. A. et al. *Kompozitsionnyye instrumental'nyye materialy* [Composite instrumental materials]. Kiev: ISM im. V. I. Bakulya, IPTS “ALCON” NANU Publ., 2005. 280 p. (in Russian).

5. Sudnik L. V., Vityaz' P. A., Il'yushchenko A. F. Almazosoderzhashchiye abrazivnyye nanokompozity [Diamond-containing abrasive nanocomposites]. Minsk: Belaruskaya navuka Publ., 2012. 318 p. (in Russian).

6. Maystrenko A. L., Borimskiy A. I., Devin L. N., Bologova L. M., Shcherbakov A. V., Sulima A. G. K voprosu o mekhanizme razuprochneniya kristallov sinteticheskogo almaza pri vysokotemperaturnom nagrevanii [On the mechanism of softening of synthetic diamond crystals under high-temperature heating]. *Porodorazrushayushchiy i metallobratatyvayushchiy instrument — tekhnika i tekhnologiya yego izgotovleniya i primeneniya. Sb. nauch. tr.* [Breed-destroying and metalworking tools — machinery and technology for its production and use. Coll. sci. proc.]. Kiev: INM im. V. M. Bakulya NANU Publ., 2010, iss. 13, pp. 272—279 (in Russian).

7. Bugakov V. I. Termostoykost' almaznykh materialov [Thermostability of diamond materials]. *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya* [Proceedings of high schools. Non-ferrous metallurgy], 2005, no. 5, pp. 25—28 (in Russian).

8. Grabchenko A. I., Dobroskok V. L., Fedorovich V. A. *3D modelirovaniye almazno-abrazivnykh instrumentov i protsessov shlifovaniya* [3D modeling of diamond-abrasive tools and grinding processes]. Kharkov: NTU “KhPI” Publ., 2006. 364 p. (in Russian).

9. Mamalis A. G., Grabchenko A. I., Fedorovich V. A., Fedorenko D. O. Principles of 3D modeling of the production and application of diamond composite materials. *Nanotechnology perception*. Basel : Institute of advanced study, 2012, pp. 132—139.

10. Pisarenko G. S., Lebedev A. A. Deformirovaniye i prochnost' materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Deformation and Strength of Materials in the Complex Stress State]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1976. 416 p. (in Russian).

11. Golevs V. I., Karasyk O. V. *Matematychnye modelyuvannya ta optymizatsiya ob'yektiv khimichnykh tekhnolohiy tuhoplavkykh nemetalevykh i sylikatnykh materialiv. Navchal'nyy posibnyk* [Mathematical modeling and optimization of objects of chemical technologies of refractory nonmetallic and silicate materials. A manual]. Dnipropetrovsk: Lithograph Publ., 2016. 160 p. (in Ukrainian).

12. Matveev M. A., Matveev G. M., Frenkel B. N. *Raschety po khimii i tekhnologii stekla : cpravochnoye posobiye* [Calculations on the chemistry and technology of glass. A handbook]. Moscow: Stroyizdat [Publishing House of Literature on Construction], 1972. 240 p. (in Russian).