

**В.Г. Полторацький**, канд. техн. наук<sup>1</sup>; **О.О. Бочечка**, член-кор. НАН України<sup>1</sup>;  
**В.І. Лаврінченко**, д-р. техн. наук<sup>1</sup>; **С.П. Старик**, канд. техн. наук<sup>1</sup>; **В.В. Білорусець**<sup>1</sup>;  
**С.О. Лисовенко**, канд. хім. наук<sup>1</sup>; **О.В. Лещенко**<sup>1</sup>; **Я.Л. Сільченко**<sup>1</sup>;  
**В.В. Смоквина**, канд. техн. наук<sup>1</sup>; **О.М. Кошкін**<sup>1</sup>; **О.К. Черевик**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України  
Україна, 04074, Київ, вул. Автозаводська, 2 [vg.poltoratsky@gmail.com](mailto:vg.poltoratsky@gmail.com) [olesh@ism.kiev.ua](mailto:olesh@ism.kiev.ua)  
<sup>2</sup>Roycemore school, 1200 Davis St., Evanston, IL, 60201, USA [okcherevyk@gmail.com](mailto:okcherevyk@gmail.com)

## **ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТЯ З НАНО-, СУБМІКРО-ТА МІКРОПОРОШКІВ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ (сBN) НА ПОВЕРХНІ ЗЕРЕН ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ ДЛЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИХ ШЛІФПОРОШКІВ МЕТОДАМИ СКАНУВАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ І МІКРОАНАЛІЗУ, ІЧ СПЕКТРОСКОПІЇ, РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ**

*Задача дослідження – розвиток та вдосконалення технології формування покриття з нано-, субмікро- та мікропорошків кубічного нітриду бору (сBN) на поверхні зерен шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності для шліфувального інструменту та дослідження цих шліфпорошків методами сканувальної електронної мікроскопії і мікроаналізу, ІЧ-спектроскопії, рентгеноспектрального аналізу.*

*Проведено експериментальні дослідження процесу нанесення поліком-понентного покриття на шліфпорошки синтетичного алмазу в процесі крис-талізації розчинних компонентів з розчину (рідинно-фазовий метод нанесення покриття) з метою розвитку та вдосконалення базової технології формування покриття з сBN. Загалом було створено та досліджено 12 варіантів зразків шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності (AC 15, AC 20 зернистості 125/100, 160/125) – первинних та з нанесеним покриттям з нано-, субмікро- та мікропорошків сBN з різними зв'язуючими різного хімічного складу (оксид бору ( $B_2O_3$ ), силікат натрію ( $Na_2SiO_3$ ), полівініловий спирт, полівініл-бутираль фенолформальдегідний, гідролізований колаген) у різних поєднаннях.*

*Встановлено, що нанесення покриття з КМ нано (нанопорошок сBN) дозволяє фактично втричі зменшити знос алмазних шліфувальних кругів, а з КМ 3/2 (мікропорошок сBN) – вдвічі. Такий покращений алмазний шліфу-вальний інструмент може бути застосований у механообробці новітніх матеріалів, які нині використовуються у машино- та авіабудуванні, випуску пілотованої і безпілотної (дронові) техніки.*

**Ключові слова:** синтетичний алмаз, шліфпорошок, кубічний нітрид бору, сBN, мікропорошок, субмікропорошок, нанопорошок, покриття, термостійкість, зносостійкість.

### **Вступ**

Для досягнення високої різальної здатності шліфувального інструменту необхідно забезпечити збільшення кількості ріжучих зерен (розвинення мікрорельєфу поверхні) у шліфпорошках синтетичного алмазу та/або кубічного нітриду бору (сBN). При цьому важливо, щоб зерна абразиву не лише достатньо виступали над поверхнею робочого шару інструменту, але й міцно утримувалися у зв'язці. Зерна надтвердих матеріалів (НТМ) мають різну морфологію і, відповідно, відрізняються за міцністю. Чим зерна міцніші, тим гладкішою є їхня поверхня, і тому більш важливим стає закріплення такого зерна у зв'язці. Таким чином, міцніші зерна потребують використання міцнішої зв'язки, наприклад, не полімерної, а металічної. Разом з тим, полімерні зв'язки є більш технологічними. Тому саме для таких випадків і застосовують покриття зерен НТМ. Крім того, сучасні технології абразивної

обробки матеріалів потре-бують використання в абразивному інструменту більш міцних порошків з унікальними властивостями термостабільності та зносостійкості, специфічною морфологією зерен абразиву з підвищеною величиною питомої поверхні, яка покращує процес формування захисного покриття зерен для кращого утримання в зв'язці та для досягнення підвищеної хімічної і термічної стійкості [1].

В машинобудуванні порошки синтетичного алмазу як стандартної, так і підвищеної міцності марок АС15–АС20 широко застосовуються в процесах механообробки, однак працездатність будь-якого алмазомісткого інструменту значною мірою визначається станом робочої поверхні зерен шліфпорошку алмазу. Одним з варіантів досягнення цього є створення зносостійкого покриття на поверхні зерен шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності з мікро- та нанопорошків кубічного нітриду бору та речовин із підвищеними адгезійними властивостями – неорганічних та органічних.

Мета даного дослідження – розвиток та вдосконалення технології створення захисного бар'єру між зв'язкою та зерном для уникнення графітизації алмазу як під час виготовлення інструменту, так і в процесі шліфування, а також збільшення величини питомої поверхні зерен алмазу та покращення завдяки цьому надійності утримання зерен в зв'язці та надання можливості використання більш міцних, вказаних вище, шліфпорошків синтетичного алмазу в шліфувальних кругах на полімерній зв'язці для обробки твердих сплавів [2].

Покриття формували методом рідиннофазного нанесення в процесі кристалізації або ущільнення розчинних компонентів з комбінованого розчину-суспензії. До складу покриття входили порошки кубічного нітриду бору (КМ 3/2, КМ 0.5/0 або КМ нано), оксид бору ( $B_2O_3$ ), силікат натрію ( $Na_2SiO_3$ ), полівініловий спирт, полівінілбутіраль фенолформальдегідний та гідролізований колаген у різних комбінаціях.

Процес формування полікомпонентного захисного покриття на поверхні зерен шліфпорошків методом рідинно-фазного нанесення з комбінованого розчину-суспензії з розчинних та нерозчинних компонентів різного хімічного складу та результати досліджень досить детально представлено в роботах [3–6].

#### **Матеріали, обладнання, методи досліджень**

Для проведення досліджень було відібрано усереднені проби первинних матеріалів – шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності: АС15 125/100, АС15 160/125, АС20 125/100. Маса зразка шліфпорошку для досліду: 25–50 каратів (5–10 г).

Також було підготовлено речовини для формування захисного покриття з суміші основного нерозчинного, основного розчинного та варіативних розчинних компонентів різного хімічного складу.

Основним нерозчинним компонентом захисного покриття є мікро- / суб-мікро- / нано порошок кубічного нітриду бору (сBN): КМ 3/2, КМ 0.5/0, КМ нано. Маса зразка порошку сBN для досліду: 2.5–5.0 каратів (0.5–1,0 г).

Основним розчинним компонентом захисного покриття є розчинний у воді оксид бору  $B_2O_3$ .

Варіативними компонентами захисного покриття є такі речовини: розчинні у воді силікат натрію  $Na_2SiO_3$  та полівініловий спирт ( $[CH_2CH(OH)]_n$ ); розчин полімеру полівініл-бутіраля фенолформальдегідного в етиловому спирті (клей БФ-6) ( $[-Ph(OH) - CH_2 - ]_n$ ); розчинний у воді гідролізований колаген (желатин) (природний полімер).

Попередньо нерозчинний основний компонент покриття (мікро / субмікро порошок сBN) було активовано, тобто додатково оброблено в енерго-напруженому подрібнюючому апараті (планетарний млин) [3, 6].

Згідно з результатами попередніх досліджень можна стверджувати, що під час випаровування рідкої фази відбувається кристалізація  $B_2O_3$  з насиченого розчину. Частинки нерозчинного мікро / субмікро / нано порошку кубічного нітриду бору (сBN), що мають

активовану поверхню внаслідок механохімічної обробки, виступають центрами кристалізації  $B_2O_3$ ; на поверхні зерен шліф-порошку алмазу також відбувається закріплення та зростання зерен покриття (кристалів  $B_2O_3$ ). Це зростання обумовлено дифузійною атомів з розчину. Розмір кристалів  $B_2O_3$  – на частинках cBN та на поверхні зерен шліфпорошку – збільшується до утворення суцільного покриття. Так в процесі зростання кристали  $B_2O_3$  захоплюють частинки нерозчинного компонента покриття (cBN). Таким чином утворюються складні кристали комбінованого покриття, де частинки cBN є включеннями в кристалічній масі  $B_2O_3$  [6].

Таким чином, формування покриття відбувається з комбінованого розчину-суспензії ( $cBN + B_2O_3$ ), склад якого було розширено за рахунок введення додаткових розчинних неорганічних ( $Na_2SiO_3$ ), та/або органічних полімерних компонентів (гідролізований колаген, полівінілбутираль фенол-формальдегідний (клей БФ-6), полівініловий спирт).

### Методика експерименту та результати

Спочатку готували суміш для утворення захисного покриття. До 20 мл насиченого водного розчину борного ангідриду ( $B_2O_3$ )<sup>1</sup> додавали порошок активованого нерозчинного нітриду бору (КМ nano або КМ 0,5/0 або КМ 3/2), розтирали до однорідної суспензії. Потім додавали або водорозчинні компоненти (силікат натрію чи желатин), або розчин клею БФ-6 у спирті та розтирали до однорідної суспензії. Попередньо клей БФ-6 додатково розріджували додаванням екстра порції етилового спирту.

Зразок шліфпорошку синтетичного алмазу підвищеної міцності (АС15 125/100 або АС15 160/125 або АС20 125/100) масою 40 ст, на який має бути нанесено покриття, змішували з суспензією суміші розчинних та нерозчинних компонентів із застосуванням магнітної мішалки протягом 10 хв. при нормальних умовах, потім отриману суспензію з компонентів покриття та із зерен шліфпорошку алмазу висушували на піщаній бані, розмішуючи, при температурі 120°C до сухого однорідного стану. Склад деяких сумішей компонентів покриття показано в табл. 1.

Таблиця 1. Зразки шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності, як первинних, так і з нанесеним захисним покриттям, коефіцієнт термостійкості ( $K_T$ ), втрата маси зразків (%)

№ п/п	Шліфпорошок синтетичного алмазу	Компоненти складу покриття	$K_T$	Втрата маси, %
1	2	3	4	5
1	АС15 125/100	КМ 0.5/0 (0.5 г) + $B_2O_3$	0,97	2,5
2	АС15 125/100	КМ 0.5/0 (1.0 г) + $B_2O_3$	0,98	2,4
3	АС15 160/125	КМ 3/2 (1.0 г) + $B_2O_3$ + гідролізований колаген (0.5 г)	0,97	2,6
4	АС20 125/100	КМ 3/2 (1.0 г) + $B_2O_3$	0,98	1,7

<sup>1</sup> концентрація насиченого розчину  $P_{B_2O_3} = 2.2 \text{ г} / 100 \text{ мл}$ .

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4	5
5	AC20 125/100	КМ 3/2 (1.0 г) + B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (0.5 г)	0,98	1,8
6	AC15 160/125	КМ 3/2 (0.75 г) + B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0.20 г) + БФ-6 (0.05 мл)	0,98	1,9
7	AC15 160/125	КМ 3/2 (1.0 г) + B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + ПВС* (0.05 г)	0,98	1,4
8	AC15 160/125	КМ 0.5/0 (1.0 г) + SiO <sub>2</sub>	0,97	2,9
9	AC15 125/100	первинний (без покр.)	0,95	5,3
10	AC20 125/100	первинний (без покр.)	0,95	4,9
11	AC15 160/125	первинний (без покр.)	0,95	5,0
12	AC15 160/125	КМ нано (1.0 г) + B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,98	2,1

\* ПВС – полівініловий спирт

Термостійкість досліджуваних зразків шліфпорошків – первинних та з покриттям – було визначено методом термогравіметрії на відповідній установці (в трубчатій печі), за результатами було вираховано коефіцієнт термостійкості  $K_{TC}$  [7].

Дослідження структурно-морфологічних характеристик зовнішньої структури та кількісного елементного складу зразків шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності, як первинних, так і з нанесеним захисним покриттям було проведено методом сканувальної електронної мікроскопії при різному збільшенні на сканувальному електронному мікроскопі ZEISS EVO 50XVP, укомплектованому енергодисперсійним аналізатором рентгенівських спектрів INCA450 з детектором INCAPentaFETx3 та системою HKL CHANNEL-5 для дифракції відбитих електронів виробництва фірми OXFORD (сканувальна електронна мікроскопія і мікроаналіз (CEMMA)) з додатковим використанням SE-детектора вторинних електронів Еверхарта-Торнлі та високочутливого 4-квadrантного фазового CZ BSD-детектора при різному збільшенні.

Для ідентифікації зв'язків в зернах абразиву та покритті була застосована інфрачервона (ІЧ)–спектроскопія. Вимірювання ІЧ спектрів поглинання виконували на ІЧ Фур'є-спектрометрі Nicolet 6700 із спряженим із ним ІЧ мікроскопом Nicolet Continuum (Thermo Fisher Scientific Inc., США). Використовували методи реєстрації спектрів дифузного відбиття (DRIFT).

Стан поверхні шліфпорошків алмазу та покриттів на ній вивчали за допомогою оптичного мікроскопу Axioscope 5 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Німеччина) та сканувального електронного мікроскопу ZEISS EVO 50 XVP (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Німеччина).

Визначення хімічного складу шліфпорошків алмазу та покриттів проводили на основі даних енергодисперсійного аналізу рентгенівських спектрів з використанням аналізатора Ultim Max 100 (Oxford Instruments plc, Англія).

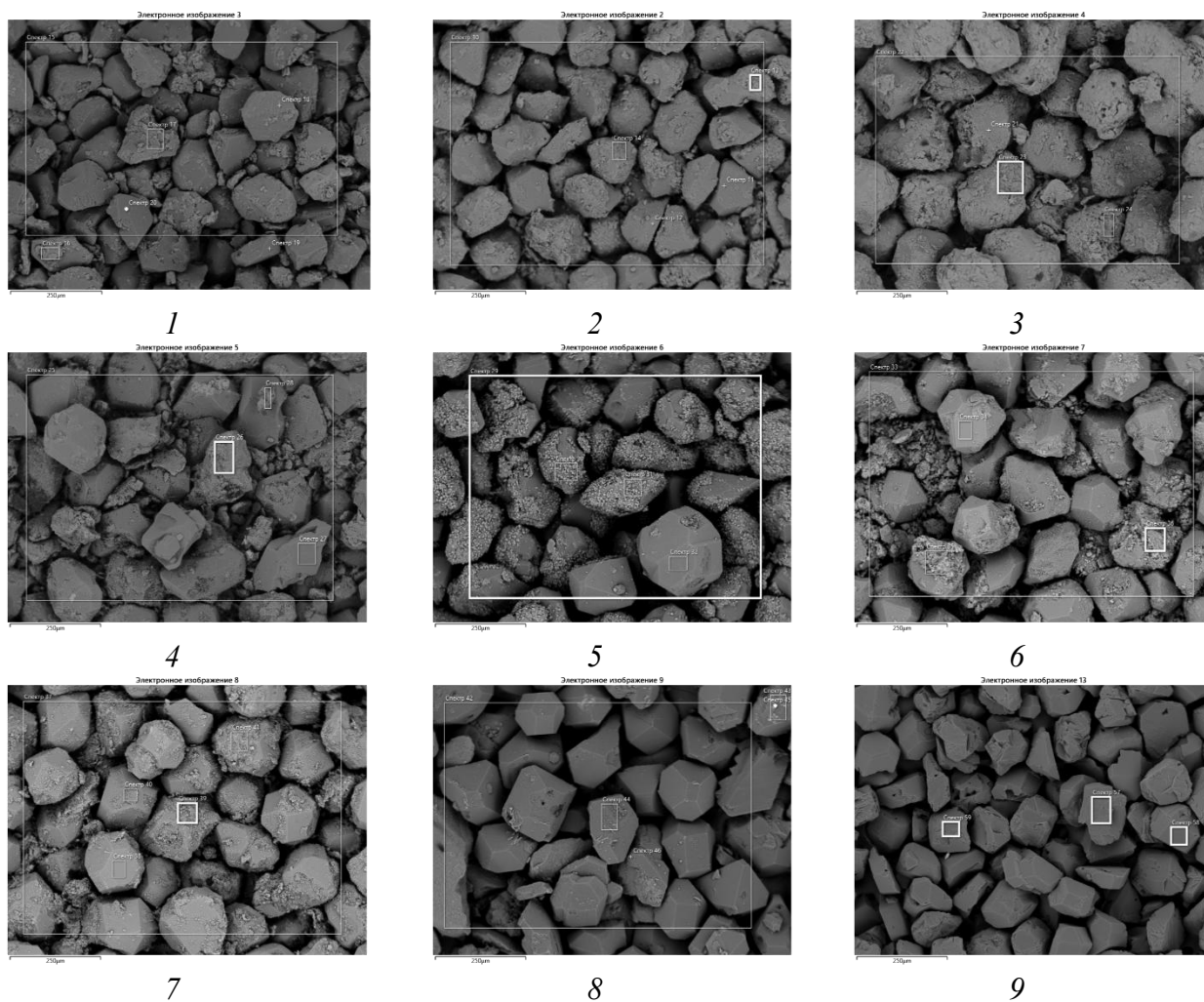
Визначення елементного складу зразків шліфпорошків, як первинних, так і з нанесеним покриттям було виконано методом рентгенографії із застосуванням комплексу рентгенівських дифрактометрів ДРОН-3М, ДРОН-4; ДРОН-2.

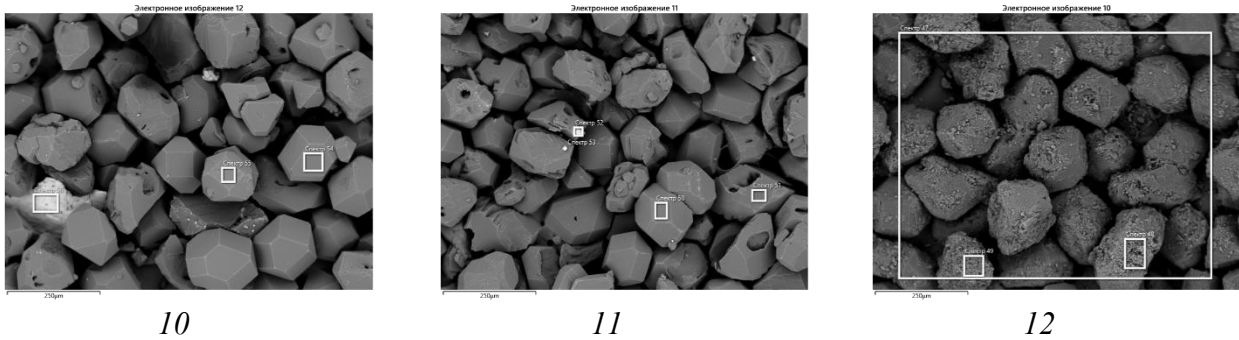
Експлуатаційні показники шліфувальних кругів з порошками синтетичного алмазу підвищеної міцності з нанесеним захисним покриттям (зносостійкість та якість обробленої поверхні) було визначено на стенді, створеному на базі модернізованого універсально-заточного станка моделі ЗВ642, та із використанням профілографа-профілометра *SurfTest SJ-201* (фірма *Mitutoyo*, Японія) [2].

### Сканувальна електронна мікроскопія і мікроаналіз

Методом сканувальної електронної мікроскопії з додатковим використанням *SE*-детектора вторинних електронів Еверхарта-Торнлі та високочутливого 4-квадрантного фазового *CZ BSD*-детектора досліджено шліфпорошки синтетичного алмазу підвищеної міцності: AC15 125/100, AC15 60/125, AC20 125/100, як первинні, так і з нанесеним покриттям (табл. 1).

Результати дослідження структурно-морфологічних характеристик зовнішньої структури зразків шліфпорошків представлено на рис. 1.





10

11

12

Рис. 1. Зерна шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності, як первинних, так і з нанесеним захисним покриттям: 1 - AC15 125/100 (KM 0.5/0+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 2 – AC15 125/100 (KM 0.5/0+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 3 – AC15 160/125 (KM 3/2+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+гідролізований колаген), 4 – AC20 125/100 (KM 3/2+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 5 – AC20 125/100 (KM 3/2+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), 6 – AC15 160/125 (KM 3/2+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+БФ6), 7 – AC15 160/125 (KM 3/2+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ПВС), 8 – AC15 160/125 (KM 0.5/0+SiO<sub>2</sub>), 9 – AC15 125/100 (без покриття), 10 – AC20 125/100 (без покриття), 11 – AC15 160/125 (без покриття), 12 – AC15 160/125 (KM нано+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

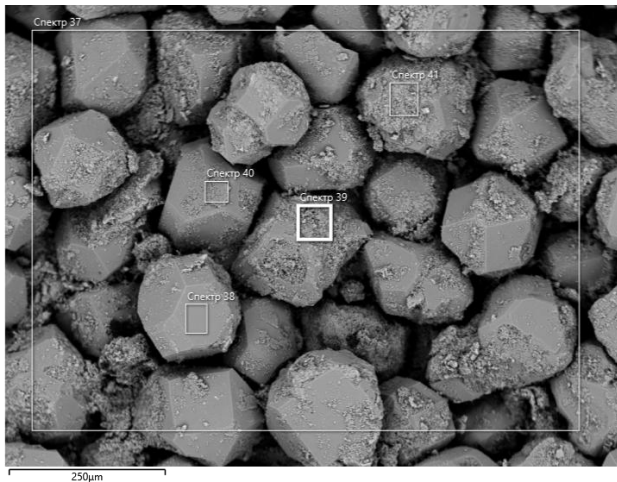
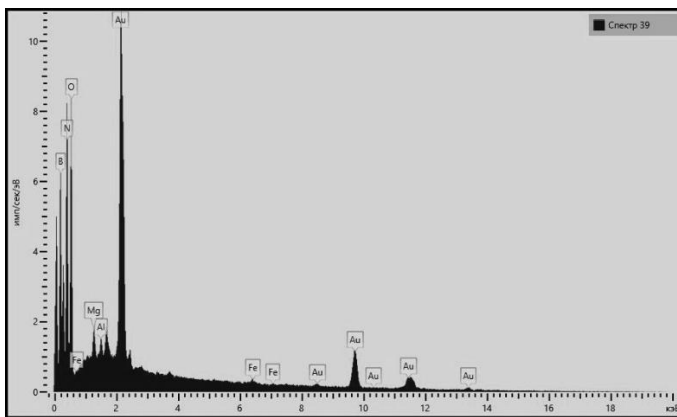


Рис. 2. Зерна шліфпорошку AC15 160/125 з покриттям KM 3/2+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ПВС (зразок № 7).

Результати дослідження показують, що найбільш якісне покриття спостерегається на зразках № 7 та № 12.

Структурно-морфологічні характеристики зовнішньої будови та кількісного елементного складу зразку шліфпорошку AC15 160/125 з нанесеним покриттям KM 3/2+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ПВС показано на рис. 2, 3.

Структурно-морфологічні характеристики зовнішньої будови та кількісного елементного складу зразку шліфпорошку AC15 160/125 з нанесеним покриттям KM нано+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> показано на рис. 4, 5.



Мітка спектру	Спектр 41	Спектр 37	Спектр 38	Спектр 39	Спектр 40
B	36.43	7.35	0.00	37.10	13.60
C		50.50	81.75		38.87
N	33.20	26.51		36.69	32.34
O	29.46	15.26	17.76	25.50	14.37
Mg	0.37	0.11		0.35	0.17
Al	0.25	0.11	0.27	0.20	0.20
Fe	0.30	0.15	0.22	0.17	0.45
Всього	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Рис. 3. Елементний склад поверхні зерен шліфпорошку AC15 160/125 з покриттям KM 3/2+V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ПВС (зразок № 7)

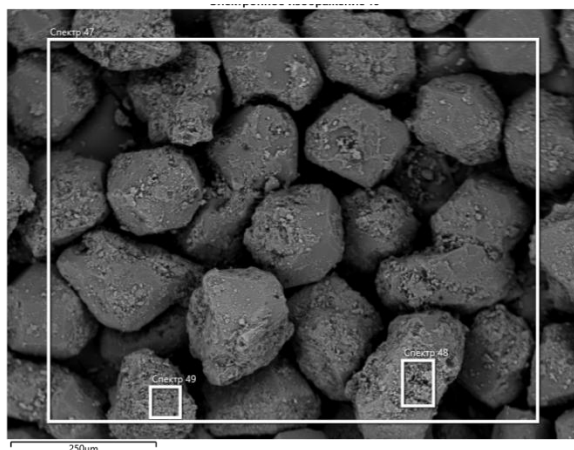
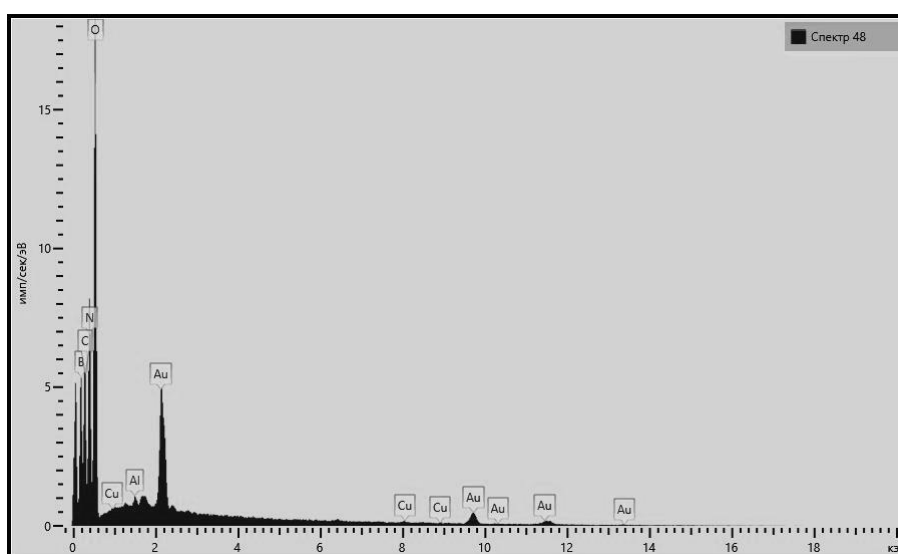


Рис. 4. Зерна шліфпорошку AC15 160/125 з покриттям КМ нано+ $V_2O_5$  (зразок № 12)



Мітка спектру	Спектр 49	Спектр 47	Спектр 48
B	36.24	14.13	23.46
C		38.24	18.84
N	33.22	29.86	26.46
O	30.11	17.43	31.05
Al	0.14	0.09	0.07
Si	0.12		
Fe		0.10	
Cu	0.16	0.15	0.12
Всього	100.00	100.00	100.00

Тип результату – % ваг.

Рис. 5. Елементний склад поверхні зерен шліфпорошку AC15 160/125 з покриттям КМ нано+ $V_2O_5$  (зразок №12)

### ІЧ-спектроскопія

Проведено експериментальні спектрометричні дослідження в середньому ІЧ діапазоні для зразків первинних алмазних абразивних порошків трьох марок в стані поставки:

AC15 125/100, AC15 160/125 та AC20 125/100 (рис. 6). У спектрах всіх зразків спостерігаються смуги поглинання, властиві синте-тичному алмазу: коливання вуглецевої ґратки  $1800\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$  та  $1000\text{--}1450\text{ cm}^{-1}$  домішки азоту. Наявність смуг поглинання, характерних для агрегатів азоту, та відсутність явних поглинань в області  $2800\text{--}2600\text{ cm}^{-1}$ , які властиві домішкам бору, чітко відносить синтетичний алмаз до типу Ia. Відсутність різких піків в області  $4000\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$  свідчить про низький вміст гідроксильних груп (O–H). В області  $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$  спостерігаються слабо виражені піки, пов'язані із C–H зв'язками. Це свідчить про високий рівень чистоти поверхні алмазу, яка слабо функціоналізована воднем.

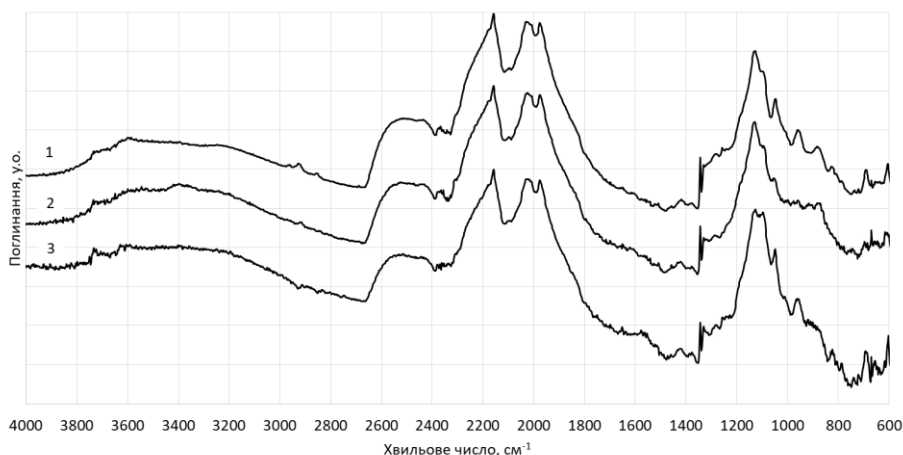


Рис. 6. ІЧ спектри поглинання зразків первинних порошків синтетичного алмазу: спектр 1 – AC15 125/100 (зразок № 9), спектр 2 – AC15 160/125 (зразок № 11), спектр 3 – AC20 125/100 (зразок № 10)

Вигляд ІЧ спектрів поглинання шліфпорошків синтетичного алмазу під-вищеної міцності відчутно змінився після нанесення на їх поверхню захисних покриттів з мікро-, субмікро- та нанопорошків кубічного нітриду бору (сBN) та оксиду бору ( $B_2O_3$ ). В усіх спектрах (рис. 7–15) реєструється сильний піковий сигнал в областях  $\sim 1380\text{ cm}^{-1}$  та  $\sim 1065\text{ cm}^{-1}$ , який відповідає асиметричним та симетричним валентним коливанням зв'язків B–N в кубічній ґратці нітриду бору. Зміщення асиметричних коливань B–N у високо-частотну область може бути спричинено домішками кисню чи молекулами води на поверхні сBN, які змінюють силу поверхневих зв'язків B–N. Особливо це стосується нанокристалічного сBN, де поверхневі ефекти сильніші через великий відносний внесок поверхні. Також всі спектри демонструють смуги поглинання в області  $750\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ , які пов'язані із деформаційними коливаннями зв'язків B–N.

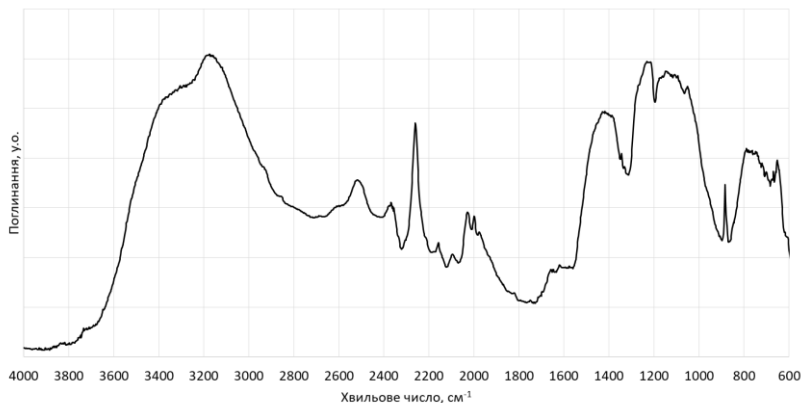


Рис. 7. ІЧ спектри поглинання зразку шліфпорошку синтетичного алмазу AC15 125/100, модифікованого  $B_2O_3$ +KM 0.5/0 (0.5 г). (зразок № 1).

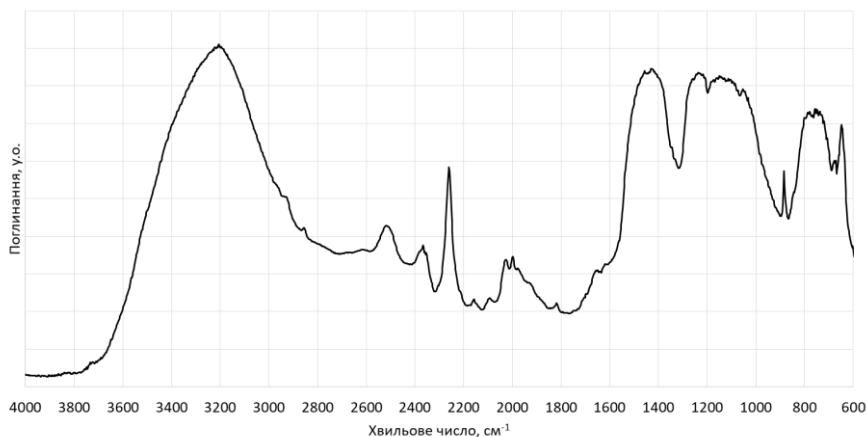


Рис. 8. ІЧ спектри поглинання зразку шліфпорошку синтетичного алмазу AC15 125/100, модифікованого  $V_2O_3+KM$  0.5/0 (1.0 г). (зразок № 2).

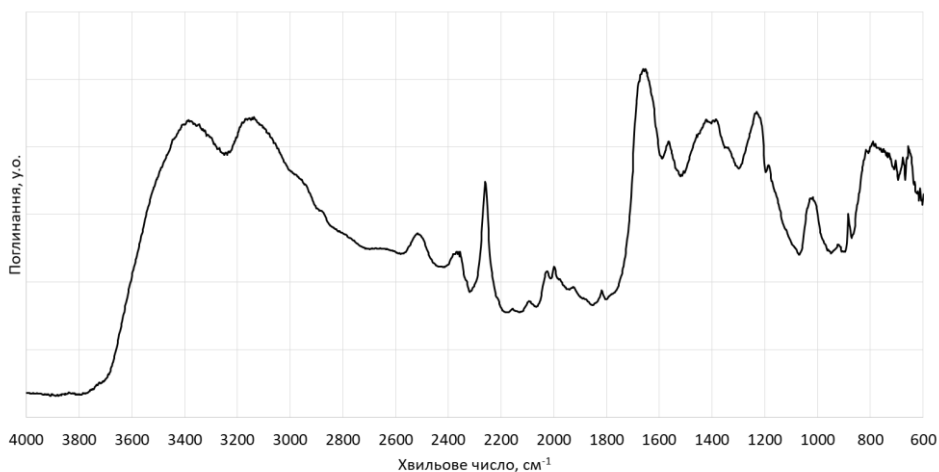


Рис. 9. ІЧ спектри поглинання зразку шліфпорошку синтетичного алмазу AC15 160/125, модифікованого  $V_2O_3+KM$  3/2 (1.0 г) + желатин (0.5 г). (зразок № 3).

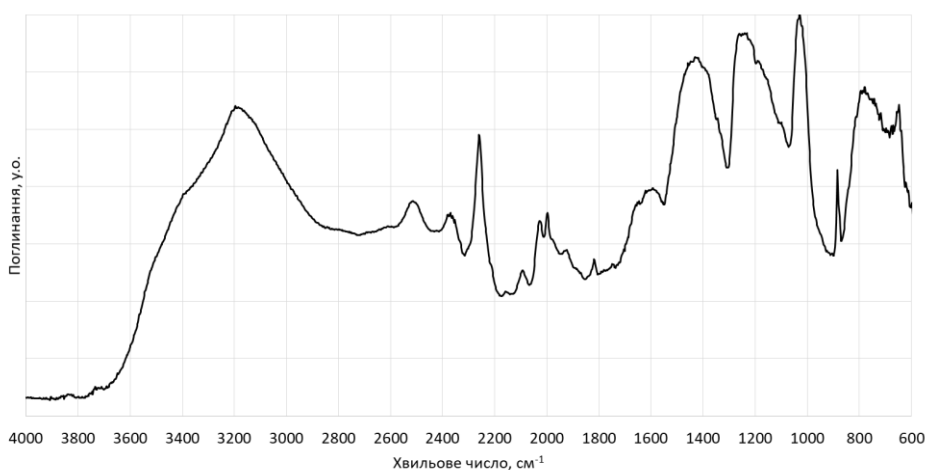


Рис. 10. ІЧ спектри поглинання зразку шліфпорошку синтетичного алмазу AC20 125/100, модифікованого  $V_2O_3+KM$  3/2 (1.0 г). (зразок № 4).

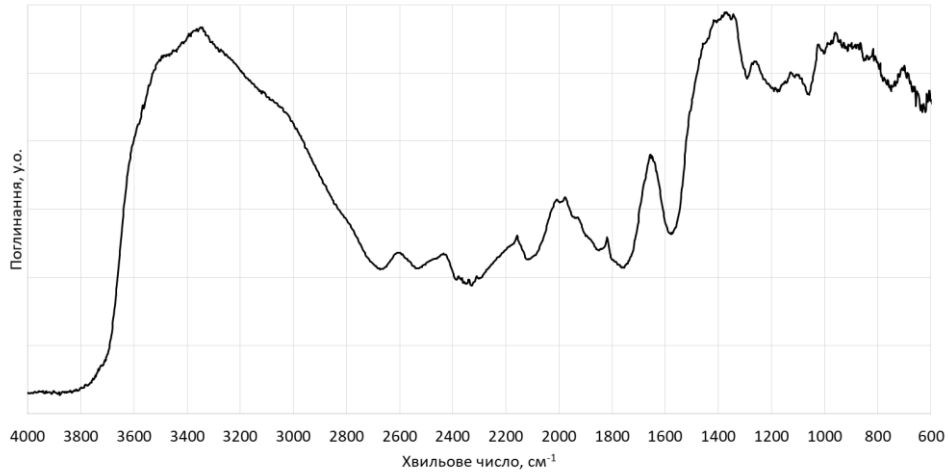


Рис. 11. ІЧ спектри поглинання зразку шліфпорошку синтетичного алмазу AC20 125/100, модифікованого  $B_2O_3+KM\ 3/2$  (1.0 г) +  $Na_2SiO_3$  (0.5 г). (зразок № 5).

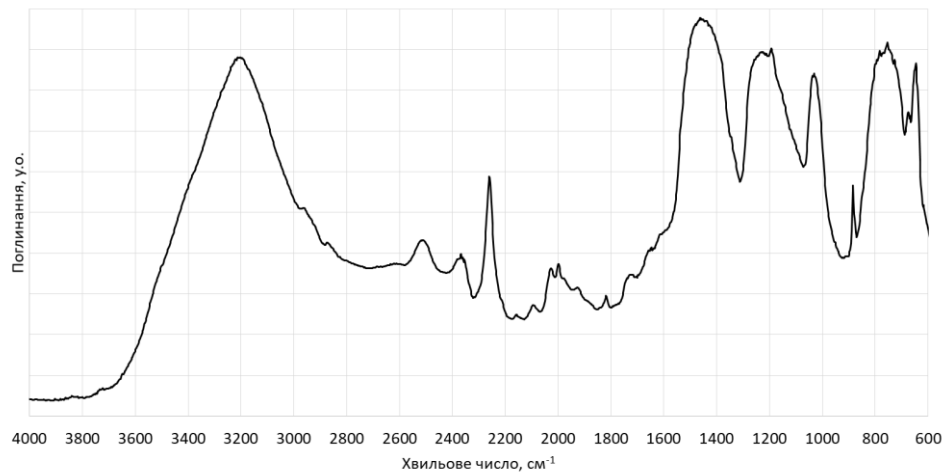


Рис. 12. ІЧ спектри поглинання зразку шліфпорошку синтетичного алмазу AC15 160/125, модифікованого  $B_2O_3+KM\ 3/2$  (0.75 г) + БФ-6 (0.05 мл). (зразок № 6).

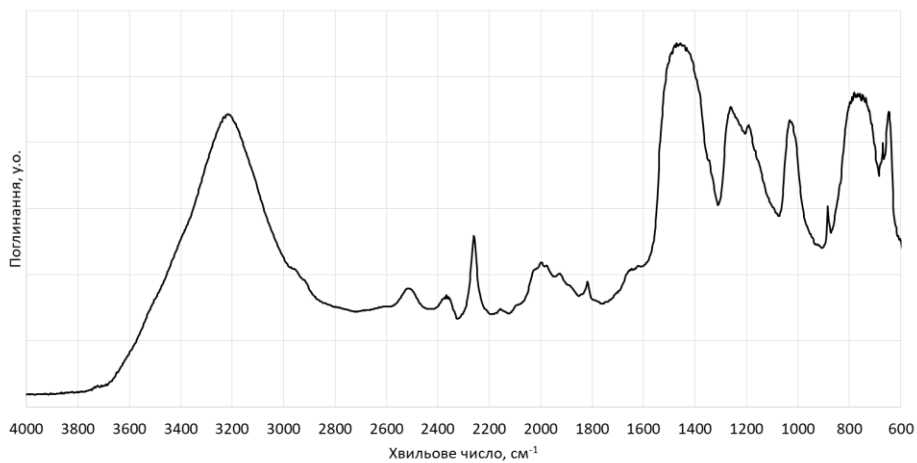


Рис. 13. ІЧ спектри поглинання зразку шліфпорошку синтетичного алмазу AC15 160/125, модифікованого  $B_2O_3+KM\ 3/2$  (1.0 г) + ПВС (0.05 г). (зразок № 7).

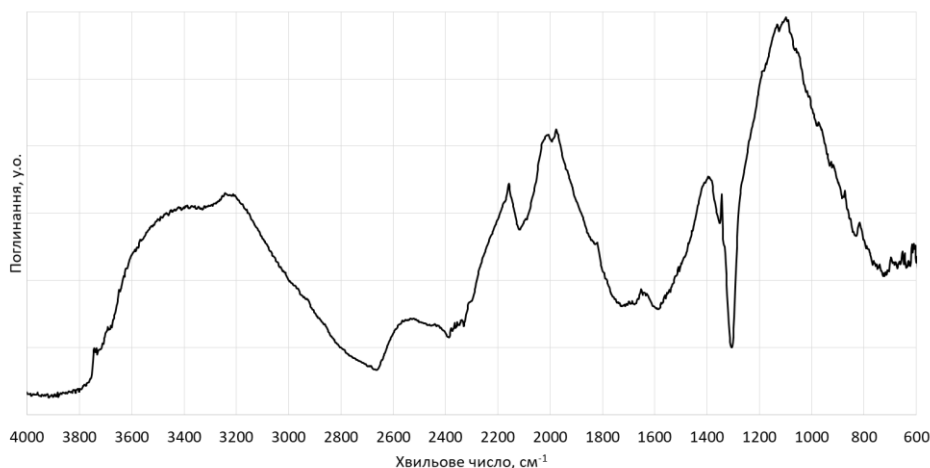


Рис. 14. ІЧ спектри поглинання зразку шліфпорошку синтетичного алмазу AC15 160/125, модифікованого  $B_2O_3+KM$  0.5/0 (1.0 г) +  $SiO_2$ . (зразок № 8).

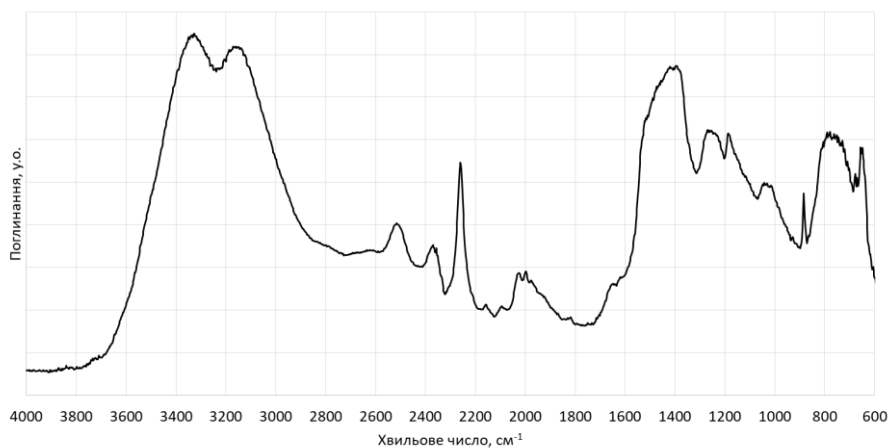


Рис. 15. ІЧ спектри поглинання зразку шліфпорошку синтетичного алмазу AC15 160/125, модифікованого  $B_2O_3+KM$  нано (1.0 г. (зразок № 12).

На всіх спектрах з покриттями, які містять нітрид бору (рис. 7–15), спостерігається вузький та інтенсивний пік на  $883\text{ см}^{-1}$ , який відповідає симетричним валентним коливанням зв'язків B–N в кубічному нітриді бору (cBN). Цей пік є вузьким і інтенсивним завдяки високій впорядкованості кристалічної структури кубічної фази cBN. В структурі cBN атоми бору (B) і азоту (N) утворюють жорсткі ковалентні зв'язки. Ці зв'язки мають високу силу (енергію) і проявляються в інфрачервоній області у вигляді чітких та вузьких смуг. В той же час на ІЧ спектрах з рис. 7–15 не спостерігається відгук від можливих інших фаз нітриду бору, наприклад, таких як гексагональний нітрид бору (hBN) чи його аморфна модифікація, і можна говорити про чистоту cBN.

Особливістю технології нанесення покриттів для модифікування шліф-порошків синтетичного алмазу є використання насиченого водного розчину борного ангідриду ( $B_2O_3$ ). У водному середовищі  $B_2O_3$  практично повністю гідролізується до борної кислоти  $H_3BO_3$  і поліборних форм, тому смуги в ІЧ спектрі, обумовлені безпосередньо  $B_2O_3$  (як у твердому стані), не спостерігаються. Замість цього домінують смуги  $H_3BO_3$  та її похідних. Через хімічну адсорбцію молекул води та борної кислоти, а також за рахунок модифікації поверхневих функціональних груп алмазу внаслідок взаємодії з продуктами гідролізу, на поверхні алмазу формуються поверхневі гідроксильні групи (OH). Такі процеси призводять до

появи в ІЧ спектрі широкої смуги поглинання в області  $3000\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ , яка відповідає коливанням розтягу водневих зв'язків O–H і свідчить про присутність гідроксильних функціональних груп (рис. 7–15).

Гідроксильні групи мають різні енергетичні стани залежно від їх оточення (водневі зв'язки, адсорбція на поверхні алмазу, взаємодія з  $\text{V}_2\text{O}_3$ ), які відображаються у формах ІЧ спектрів в області водневих зв'язків різної сили. Ширший пік ( $3400\text{ см}^{-1}$ ) вказує на коливання сильного водневого зв'язку, наприклад, у воді, яка адсорбована на поверхні або зв'язана з  $\text{V}_2\text{O}_3$ . Вужчий пік ( $3200\text{ см}^{-1}$ ) характерний для слабших водневих зв'язків, наприклад, в структурах борної кислоти чи фенольних груп. Присутність азоту може додатково впливати на характер водневих зв'язків, змінюючи їхню силу та відповідно форму ІЧ спектру. Проте коливання азотовмісних зв'язків N–H в аміній групі для первинних і вторинних амінів мають відгук у ІЧ спектрі в області  $3300\text{--}3400\text{ см}^{-1}$ , яка перекривається сильними водневими зв'язками. І, відповідно, у всіх спектрах, де присутній відгук від гідроксильної групи в області  $3300\text{--}3400\text{ см}^{-1}$ , O–H сигнал домінує в порівнянні з N–H через меншу дипольну зміну азото-вмісного зв'язку.

Коли вода або гідроксильні групи є адсорбованими на поверхні порошку, кількість молекул, здатних здійснювати деформаційні коливання H–O–H, є значно меншою в порівнянні з коливаннями зв'язку O–H. Крім того, така зв'язана вода (молекулярна або гідроксильна) зазвичай присутня в невеликих кількостях у вигляді кластерів чи слабо зв'язаних молекул, що також обмежує інтенсивність деформаційної смуги. Це призводить до дифузного вигляду смуги поглинання  $1630\text{--}1650\text{ см}^{-1}$ , яка відповідає деформаційним коливанням H–O–H і часто виглядає як «плече» у спектрах на рис. 7–15.

Основні області поглинання для зв'язку бору (B) і кисню (O), що можна знайти на спектрах рис. 7–15, такі: смуга поглинання  $1400\text{--}1450\text{ см}^{-1}$  відповідає за асиметричні коливання B–O зв'язку у борній кислоті; в області  $1200\text{--}1300\text{ см}^{-1}$  спостерігаються асиметричні коливання зв'язку B–O, характерні для поліборних іонів, наприклад,  $\text{BO}_3$  трикутників у структурах борних комплексів; пік  $642\text{ см}^{-1}$  відповідає за валентні коливання B–O у  $\text{BO}_4$  тетрадрах, а його висока інтенсивність вказує на те, що розчин містить значні концентрації борооксидів або поліборних іонів.

Спектри на рис. 7–10, 12, 13, 15 містять вузьку і чітку смугу поглинання близько  $2260\text{ см}^{-1}$ , яка є діагностичною для визначення азотовмісних груп і може бути використана як індикатор хімічної модифікації поверхні або присутності специфічних дефектів в структурі матеріалу. В даному випадку модифікованих шліфпорошків алмазу вона свідчить про наявність потрійних зв'язків  $\text{C}\equiv\text{N}$  для вільних валентних коливань нітрильної групи. Відносно висока частота пояснюється великою жорсткістю потрійного зв'язку, який створює сильну дипольну зміну під час коливань. Помітно висока інтенсивність свідчить про значний внесок даної функціональної групи в структуру зразка і, отже, високу концентрацію нітрильних груп на поверхні після обробки і контакту алмазу із азотовмісними сполуками.

Додавання гідролізованого колагену (желатину) як компонента захисного покриття для порошку алмазу суттєво змінює ІЧ спектр поглинання (рис. 9). Желатин – розчинний у воді природний полімер, який складається з поліпептидних ланцюгів, і в його ІЧ спектрі проявляються характерні смуги білків, відомі як амідні смуги (I, II, III): Амід I дає сильну смугу поглинання в області  $1640\text{--}1660\text{ см}^{-1}$ , яка відповідає розтягуванню зв'язків  $\text{C}=\text{O}$  у пептидному зв'язку; Амід II дає смугу поглинання в області  $1560\text{ см}^{-1}$ , яка відповідає згинальним коливанням N–H та розтягуванню  $\text{C}-\text{N}$  зв'язків; Амід III дає смугу поглинання в області  $1220\text{ см}^{-1}$ , яка зумовлена комбінованими коливаннями  $\text{C}-\text{N}$  та N–H. Також желатин містить залишки різних амінокислот, які дають додаткові сигнали в діапазоні  $800\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ .

Пептидний зв'язок ( $\text{C}=\text{O}$  у  $-\text{CO}-\text{NH}-$ ) – це частина амідної групи, де атом кисню зв'язаний із вуглецем, який також ковалентно зв'язаний із азотом. Азот у пептидному зв'язку може брати участь у водневих зв'язках, чим знижує частоту коливань до  $1640\text{ см}^{-1}$  порівняно із частотою  $1730\text{ см}^{-1}$  для звичайного карбонільного зв'язку ( $\text{C}=\text{O}$ ). Спектри на рис. 9 та 11

мають сильно виражений пік для пептидного зв'язку C=O у амідній групі, а спектри на рис. 7, 8, 10, 13–15 показують значно менший відгук. В той же час для спектрів на рис. 7–11, 13–15 не можна говорити про існування карбонільного зв'язку (C=O) в не амідних функціональних групах, оскільки не спостерігаються піки в області 1730 см<sup>-1</sup>. Це можна пояснити більшою хімічною стабільністю амідної групи порівняно з іншими карбонільними сполуками, такими як альдегіди, кетони, кислоти та естери. Ця стабільність обумовлена резонансною структурою, де електронна щільність ділиться між атомами C, O і N, що зменшує реактивність. Звичайні карбонільні групи, наприклад, у кетонах чи альдегідах, менш стабільні і хімічно активніші.

Сполука натрій метасилікат (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) є сіллю силікатної кислоти й має характерний ІЧ-спектр (рис. 11), який визначається переважно вібраціями силі-катионних (Si–O) груп. Інтенсивна смуга в діапазоні 800–1000 см<sup>-1</sup>, характерна для асиметричних коливань зв'язку Si–O, є основною ознакою силікатів. А коливанням згину (деформаційним) зв'язку Si–O–Si відповідає смуга поглинання в області 700 см<sup>-1</sup>. Ці смуги підтверджують наявність силікатної структури у покритті.

Бутираль-фенольний клей (БФ-6) є сумішшю полівінілацеталу (звичай полівінілбутиралу) з додаванням фенолформальдегідної смоли. Додавання його як модифікатора алмазу відображається в ІЧ-спектрі, який включає характерні смуги для кожного з основних компонентів клею (рис. 12). Форма широкої смуги, що відповідає гідроксильним групам (OH), в порівнянні із іншими спектрами, спотворена наявністю фенольних груп фенолформальдегідної смоли і являє чіткий пік на 3200 см<sup>-1</sup>. Така форма пояснюється тим, що гідроксильна група безпосередньо приєднана до атома вуглецю ароматичного (бензольного) кільця, і це впливає на її хімічні властивості. Гідроксильна група в фенолі входить у резонанс з ароматичним кільцем, що впливає на силу зв'язку O–H та, відповідно, його ІЧ-активність. Це зумовлює появу чіткого піку близько 3200 см<sup>-1</sup>, який відрізняється від широкої смуги «зв'язаних» O–H у звичайній воді чи алкоголях. У спектрі з рис. 12 присутні смуги поглинання в області 1500 см<sup>-1</sup> і в діапазоні 900–650 см<sup>-1</sup> вказують на ймовірну наявність бензольного кільця. Смуги 1100–1300 см<sup>-1</sup> відповідають валентним коливанням C–O в фенольних групах.

У порівнянні з ІЧ спектрами вихідних порошків алмазу в області 3000–2800 см<sup>-1</sup> спостерігаються більш інтенсивні смуги, що відповідають розтягу-вальним коливанням C–H зв'язків у метильних і метиленових групах, характерних для обох компонентів клею БФ-6.

Смуга 1730 см<sup>-1</sup> відповідає валентним коливанням зв'язку C=O у карбонільних групах, які можуть походити із залишкових ацетальних або ефірних груп у складі полівінілбутиралу.

Спектр на рис. 13 дуже схожий із попереднім на рис. 12 (БФ-6). БФ-6 і ПВС (полівініловий спирт) дійсно мають певні схожості, оскільки обидва матеріали є полімерами на основі похідних полівінілацетату. Але БФ-6 – це композитний матеріал, що містить полівінілбутираль, фенолформальдегідну смолу і розчинники, а ПВС – це простий полімер, що не містить бензольного кільця у своїй хімічній структурі.

Для порошку аморфного діоксиду кремнію (SiO<sub>2</sub>), ІЧ спектр поглинання (рис. 14) містить інтенсивну широку смугу близько 1100–1000 см<sup>-1</sup>, яка відповідає асиметричному коливанню зв'язків Si–O у структурі кремнезему. Ця смуга характерна для аморфного або частково кристалічного кремнезему. Смуга поглинання на 810 см<sup>-1</sup> відповідає симетричному коливанню Si–O зв'язків. Із ІЧ спектра модифікованих з додаванням SiO<sub>2</sub> шліфпорошків алмазу можна говорити про відсутність взаємодії вуглецю із кремнієм і азотом (відсутні коливання для Si–C–C≡N зв'язків).

Висока концентрація аміногруп у желатині забезпечує значну кількість N–H зв'язків і відповідно їх відгук в ІЧ спектрі у діапазоні 3200–3400 см<sup>-1</sup> (рис. 9). Нітрид бору (особливо в нанорозмірі) може виділяти азот під час механохімічних або термічних процесів. Крім того, нанопорошок має високу реакційну здатність завдяки великій питомій поверхні. Це приводить

до взаємодії азоту із воднем і утворення значної кількості N–H зв'язків, які підсилюють сигнал ІЧ спектрів області 3200–3400  $\text{cm}^{-1}$  (рис. 15).

### Рентгеноспектральний аналіз

Для визначення елементного складу методом рентгенографії досліджено зразки шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності: AC15 125/100, AC15 60/125, AC20 125/100 з нанесеним покриттям (табл. 1). Суміщену рентгенограму показано на рис. 16.

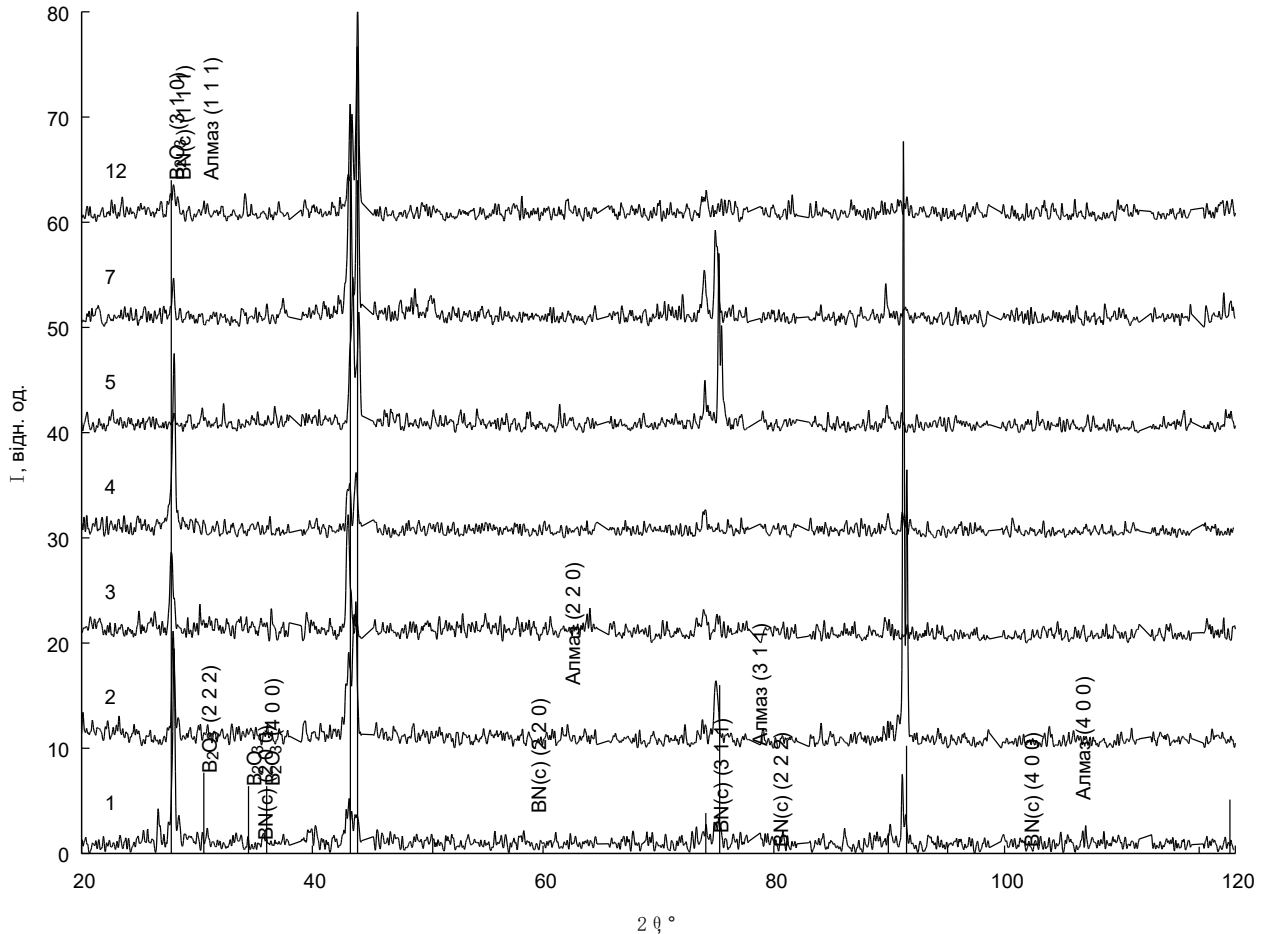


Рис. 16. Суміщена рентгенограма зразків шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності з нанесеним покриттям. Нумерація зразків відповідно до табл. 1

Результати рентгенографії показують, що в усіх зразках шліфпорошків з нанесеним покриттям відмічено наявність cBN та  $\text{V}_2\text{O}_3$ .

Зразки цих шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності, як первинних так і з нанесеним захисним покриттям різного складу, було використано при виготовленні алмазних шліфувальних кругів форморозміру 12A2-45° 125×5×3×32 на полімерній зв'язці В2-08 з відносною концентрацією алмазів в робочому шарі – 100 %. Для обробки було вибрано важкооброблюваний вольфрамо-кобальтовий твердий сплав марки ВК6 з розмірами зразка 63×15×7 мм. Шліфування проводили без охолодження, щоб уникнути сторонніх впливів в процесі обробки.

Режими шліфування: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 0,57 м/хв. (для продуктивності обробки 200  $\text{mm}^3/\text{хв.}$ ) та 1,14 м/хв. (для продуктивності обробки 400  $\text{mm}^3/\text{хв.}$ ). Оцінювалася зносостійкість

шліфувального інструменту за показником віднос-них витрат алмазів ( $q$ ) та шорсткість обробленої поверхні за показником ( $Ra$ ).

Результати шліфування показують, що нанесення покриття з кубічного нітриду бору на поверхню зерен алмазу, використаних для виготовлення шліфувальних кругів, дозволяє знизити знос алмазних кругів.

Встановлено, що нанесення покриття з КМ нано дозволяє фактично втричі зменшити знос алмазних кругів, а з КМ 3/2 – вдвічі [2].

Отже, нанесення покриттів з кубічного нітриду бору на поверхню високоміцних алмазних шліфпорошків (марок АС15–АС20) дозволяє суттєво підвищити зносостійкість алмазних кругів, що може бути викликане покращенням утримання у зв'язуючому алмазних зерен збільшеної міцності. Такий покращений алмазний інструмент може бути застосований у механообробці новітніх матеріалів, які нині використовуються у машино- та авіабудуванні, випуску пілотованої і безпілотної (дронові) техніки.

### **Висновки**

1. Розвинуто та вдосконалено технологію формування покриття з нано-, субмікро- та мікропорошків кубічного нітриду бору (сBN) на поверхні зерен шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності для шліфувального інструменту.

2. Розроблено технологічний процес для формування покриття на поверхні зерен шліфпорошків синтетичного алмазу, до складу якого входить порошок сBN: нано- / субмікро- / мікропорошок – кожен окремо.

3. Сформовано захисне покриття на зернах шліфпорошків синтетичного алмазу із зв'язуючими компонентами: оксид бору ( $B_2O_3$ ), силікат натрію ( $Na_2SiO_3$ ) / полівініловий спирт / полівінілбутіраль фенолформальдегідний / гідролізований колаген.

4. Визначено термостійкість досліджуваних зразків шліфпорошків, як первинних, так і з нанесеним захисним покриттям.

5. Зразки шліфпорошків, як первинних, так і з нанесеним захисним покриттям, було досліджено методами сканувальної електронної мікроскопії, ІЧ-спектроскопії та рентгеноспектрального аналізу.

6. Досліджено експлуатаційні характеристики інструменту – шліфуваль-них кругів – з різальним шаром на основі шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності, як первинних, так і з нанесеним захисним покриттям різного складу. Результати шліфування показують, що нанесення покриття на зерна шліфпорошків дозволяє знизити знос алмазних кругів. Встановлено, що нанесення покриття з КМ нано дозволяє фактично втричі зменшити знос алмазних кругів, а з КМ 3/2 – вдвічі.

7. Встановлено, що нанесення на поверхню зерен шліфпорошків синтетичного алмазу збільшеної в межах порошків марок АС15–АС20 міцності покриття з кубічного нітриду бору дозволяє відчутно підвищити зносостійкість алмазних кругів, що може бути викликане покращенням утримання у зв'язуючому алмазних зерен збільшеної міцності. Такий покращений алмазний інструмент може бути застосований у механообробці новітніх матеріалів, які нині використовуються у машино- та авіабудуванні, випуску пілотованої і безпілотної (дронові) техніки.

V.G Poltoratskiy<sup>1</sup>, O.O Bochechka<sup>1</sup>, V.I. Lavrinenko<sup>1</sup>, S.P. Staryk<sup>1</sup>, V.V. Bilorusets<sup>1</sup>, S.O. Lysovenko<sup>1</sup>,  
O.V. Leshchenko<sup>1</sup>, Ya.L. Silchenko<sup>1</sup>, V.V. Smokvyna<sup>1</sup>, O.M. Koshkin<sup>1</sup>, O.K Cherevyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V.Bakul Institute for Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine  
<sup>2</sup>Roycemore school

**FORMING OF COATINGS OF NANO-, SUBMICRO- AND MICRO- POWDERS OF CUBIC BORON NITRIDE (CBN) ON THE SURFACE OF GRAINS OF SYNTHETIC DIAMOND GRINDING POWDERS OF INCREASED STRENGTH FOR GRINDING TOOLS. STUDY OF THESE GRINDING POWDERS BY METHODS OF SCANNING ELECTRON MICROSCOPY AND MICROANALYSIS, IR SPECTROSCOPY, X-RAY SPECTRAL ANALYSIS**

*The research objective is to develop and improve the technology for forming a coating of nano-, submicro- and micropowders of cubic boron nitride (cBN) on the surface of grains of synthetic diamond grinding powders of increased strength for grinding tools and to study these grinding powders using scanning electron microscopy and microanalysis, IR spectroscopy, and X-ray spectral analysis.*

*Experimental studies of the process of applying a polycomponent coating to synthetic diamond grinding powders during the crystallization of soluble components from a solution (liquid-phase coating method) were conducted in order to develop and improve the basic technology for forming a coating of cBN. In total, 12 variants of samples of synthetic diamond grinding powders of increased strength (AC 15, AC 20, grain size 125/100, 160/125) were created and investigated - initial and coated with nano-, sub-micro- and micropowders of cBN with various binders of different chemical composition (boron oxide (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sodium silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), polyvinyl alcohol, polyvinyl butyral phenol formaldehyde, hydrolyzed collagen) in various combinations. It was established that coating with KM nano (cBN nanopowder) reduces the wear of diamond grinding wheels by three times, and with KM 3/2 (cBN micropowder) - by half. Such an improved diamond grinding tool can be used in the machining of new materials currently used in mechanical and aircraft engineering, the production of manned and unmanned (drone) equipment.*

**Key words:** synthetic diamond, grinding powder, cubic boron nitride, cBN, micropowder, submicropowder, nanopowder, coating, heat resistance, wear resistance.

### Література

1. Лаврінєнко В.І., Петасюк Г.А., Полторацький В.Г., Скрябін В.В., Солод В.Ю., Проц Л.А. Сучасні розробки в отриманні та застосуванні антифрикційних та захисних покриттів з нітриду бору (h-BN та c-BN). *Інструментальне матеріалознавство. Tooling Material Science*. Збірник наукових праць. Вип. 27. Київ: ІНМ ім.В.Н.Бакуля, НАН України, 2024. С. 236–243.
2. Лаврінєнко В.І., Полторацький В.Г., Смоквіна В.В., Бологов П.І., Кошкін О.М., Білорусець В.В., Черевик О.К. Мікро- чи нано: якої дисперсності порошки кубічного нітриду бору бажано застосовувати для покриття поверхні зерен шліфпорошків алмазів для шліфувального інструменту. *Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика (ЯСК-25)*. Тези доповідей 25 Міжнародної науково-практичної конференції, 22–26 вересня 2025 р., с. Поляна, Свалявський р-н, Закарпатська обл. С. 56–59.
3. Полторацький В.Г., Бочечка О.О., Лаврінєнко В.І., Лещєнко О.В., Пасічний О.О., Білоченко В.П., Білорусець В.В. Формування комбіно-ваного багатокомпонентного термостабільного зносостійкого покриття на поверхні зерен шліфпорошків абразивного призначення. *Інструментальне матеріалознавство. Toolin Materials Science*. Збірник наукових праць. Вип. 24. Київ: ІНМ ім.В.Н.Бакуля, НАН України, 2021. – С. 296–307.
4. Полторацький В.Г., Бочечка О.О., Лаврінєнко В.І., Лещєнко О.В., Білоченко В.П., Сільченко Я.Л., Лисовєнко С.О., Пасічний О.О., Ільницька Г.Д., Зайцева І.М. Формування термостабільних зносостійких покриттів на поверхні зерен шліфпорошків з сумішей розчинних та нерозчинних кисне-, силікато- та карбідовмісних активованих компонентів. *Інструментальне матеріалознавство*.

- Tooling Materials Science*. Збірник наукових праць. Вип. 25. Київ: ІНМ ім.В.Н.Бакуля, НАН України, 2022. С. 192–199.
5. Полторацький В.Г., Бочечка О.О., Лавріненко В.І., Лещенко О.В., Білоченко В.П., Сільченко Я.Л., Пасічний О.О., Лисовенко С.О., Старик С.П., Білорусець В.В., Скрябін В.В., Скрябін В.О., Кошкін О.М. Фізико-хімічне складання комбінованих багато-компонентних термостійких зносостійких покриттів на поверхні зерен шліфпорошків абразивного призначення. *Інструментальне матеріалознавство. Tooling Materials Science Збірник наукових праць*. Вип. 26. Київ: ІНМ ім.В.М.Бакуля, НАН України, 2023. С. 180–194.
  6. Полторацький В.Г., Бочечка О.О., Лавріненко В.І., Лещенко О.В., Білоченко В.П., Сільченко Я.Л., Смірнова А.В. Особливості технологічного процесу формування захисного покриття з мікро-, субмікро- та нанопорошків кубічного нітриду бору на поверхні зерен шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності. *Інструментальне матеріалознавство. Tooling Materials Science*. Збірник наукових праць. Вип. 27. Київ: ІНМ ім.В.Н.Бакуля, НАН України, 2024. С. 178–183.
  7. Формування комбінованих багатокомпонентних термостабільних зносо-стійких покриттів з суміші розчинних та нерозчинних речовин: оксидів, силікатів та карбідів на поверхні зерен шліфпорошків абразивного призначення. Технологічна інструкція ТІ 25000.00855. Київ: ІНМ ім.В.Н.Бакуля, НАН України, 2022. 10 с.

Надійшла 14.10.25

## References

1. Lavrinenko, V.I., Petasyk, G.F., Poltoratskiy, V.G., et al. (2024). Suchasni rozrobky v otrymanni ta zastosuvanni antyfryktsiinyh ta zahysnyh pokryttiv z nitrydu boru (h-BN ta c-BN) [Modern developments in the production and application of antifriction and protective coatings made of boron nitride (h-BN and c-BN)]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling Materials Science* (27nd Issue, p. 236–243). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
2. Lavrinenko, V.I., Poltoratskiy, V.G., Smokvyna, V.V., et al. (2025). Mikro- chy nano: yakoi dyspersnosti poroshky kubichnogo nitrydu boru bazhano zastosovuvaty dlia pokryttia poverhni zeren shlifporoshkiv almaziv dlia shlifovalnogo instrumentu [Micro- or nano: what dispersion of cubic boron nitride powders is desirable to use for coating the surface of diamond grinding powder grains for grinding tools]. Proceedings from Quality, standardization, control: theory and practice '25: 25 Mizhnarodna nauково-praktychna konferentsiia (22–26 veresnia 2025 r.) – 25<sup>th</sup> International scientific and practical conference. (pp. 56–59). Kiiv: ATM Ukrainy in Ukrainian].
3. Poltoratskiy, V.G., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2021). Formuvannia kombinovanogo bagatokomponentnogo termostabilnogo pokryttia na poverhni zeren shlifporoshkiv abrazyvnogo pryznachennia [Forming of combined multicomponent thermostable wear-resistant coating on the surface of grains of abrasive grinding powders]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling Materials Science* (24nd Issue, p. 296–307). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
4. Poltoratskiy, V.G., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2022). Formuvannia termostabilnyh znosostiikyh pokryttiv na poverhni zeren shlifporoshkiv z sumishei rozchynnyh ta nerozchynnyh kysne-, sylikato- ta karbidovmisnyh aktyvovanyh komponentiv [Forming of thermostable wear-resistant coatings on the surface of grains of grinding powders from a mixture of soluble and insoluble oxygen-, silicate- and carbide-containing activated components]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling Materials Science* (25nd Issue, p. 192–199). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].

5. Poltoratskiy, V.G., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2023). Fiziko-himichne skladannia kombinovanyh bagatokomponentnyh termostiikykh znosostiikykh pokryttiv na poverhni zeren shlifporoshkiv abrazyvnogo pryznachennia [Physical and chemical assembly of combined multi-component heat-resistant and wear-resistant coatings on the surface of abrasive grinding powder]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling Materials* (Science Issue 26, p. 180–194). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
6. Poltoratskiy, V.G., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2024). Osoblyvosti tehnologichnogo protsesu formuvannia zahysnogo pokryttia z mikro-, submikro- ta nanoporoshkiv kubichnogo nitrydu boru na poverhni zeren shlifporoshkiv syntetychnogo almazu pidvyshchenoi mitsnosti [Features of the technological process of forming a protective coating of micro-, submicro- and nanopowders of cubic boron nitride on the surface of grains of synthetic diamond grinding powders of increased strength]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling Materials Science* (27nd Issue, p. 178–183). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
7. *Formuvannia kombinovanykh bahatokomponentnykh termostabilnykh znosostiikykh pokryttiv z sumishi rozchynnykh ta nerozchynnykh rehovyn: oksydiv, sylikativ ta karbidiv na poverhni zeren shlifporoshkiv abrazyvnogo pryznachennia [Forming of combined multi-component thermostable wear-resistant coatings from a mixture of soluble and insoluble substances: oxides, silicates and carbides on the surface of grains of abrasive grinding powders]*. TI 25000.00855. (2022). V. Bakul ISM, NAS of Ukraine [in Ukrainian].

УДК 621.762.5

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-258-266

**Андрій ПАЦИК**, аспір.; **Микола БЕЖЕНАР**, д-р техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2, 04074, м. Київ, e-mail: pacik.andr@gmail.com, bezhenar@ukr.net*

### **ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ХІМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРИ ОДЕРЖАННІ РСВН КОМПОЗИТІВ РЕАКЦІЙНИМ СПІКАННЯМ З АЛЮМІНІЄМ ЗА ВИСОКОГО ТИСКУ**

*Виконано термодинамічний аналіз хімічної взаємодії при високому тиску кубічного нітриду бору з алюмінієм та тугоплавкими сполуками титану. Показано, що така взаємодія можлива в області температур до 2300 K і тисків до 7,7 ГПа. Ізобарно-ізотермічний потенціал (енергія Гіббса)  $\Delta G$  є від'ємний для даного діапазону тисків і температур. Із підвищенням температури абсолютне значення  $\Delta G$  зростає, із підвищенням тиску абсолютне значення  $\Delta G$  також зростає, тобто підвищення тиску і температури сприяє хімічній взаємодії в розглянутих системах.*

**Ключові слова:** РСВН-композити, спікання, тиск, температура, ізобарно-ізотермічний потенціал, енергія Гіббса.

При одержанні полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору (РСВН) часто пропонують як добавки для спікання тугоплавкі сполуки перехідних металів IVa - VIa груп, іноді разом з металами, що мають відносно невисокі температури плавлення (Al, Si, метали групи Fe та ін.) [1]. В останньому випадку відбувається спікання за участю рідкої фази. При цьому вибір складу добавок і їх кількісних співвідношень як правило базується на тому, щоб в результаті їх фізико-хімічної взаємодії з нітридом бору утворювалася тверда кераміка, яка забезпечує високу міцність зв'язку по границях зерен cBN. Провідні фірми-