

# Інструмент, порошки, пасти

---

УДК 621.921.34

**Т. О. Пріхна, Г. Д. Ільницька\*, В. І. Лавріненко\*\*,  
І. М. Зайцева, М. М. Шейко, В. В. Смоквина,  
В. В. Тимошенко**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

\*gil-ism@ukr.net

\*\*lavrinenko@ism.kiev.ua

## **Поліпшення фізико-механічних характеристик порошків синтетичного алмазу, синтезованого із застосуванням феросплавів, для підвищення зносостійкості алмазного правлячого інструменту**

*Досліджено фізико-механічні та експлуатаційні характеристики порошків синтетичного алмазу, отриманого в ростовій системі Fe–Co–C. Показано, що шліфпорошки алмазу різних марок, синтезовані в цій системі, завдяки високим значенням питомої магнітної сприйнятливості внутрішньокристалічних включень сплавів-розчинників, мають сильні магнітні властивості. Встановлено, що характеристики міцності шліфпорошків алмазу, синтезованого в системі Fe–Co–C, різних марок, як вихідних, так і після високотемпературних обробок, зі збільшенням в них внутрішньокристалічних домішок і включень сплаву-розчинника приблизно у 2,9 рази зменшуються, показник міцності шліфпорошків алмазу знижується не менше ніж у 3 рази, а коефіцієнт їхньої термостабільності в 1,5 разів. Під час розділення алмазних шліфпорошків зернистості 630/500, марки AC125 за дефектністю поверхні зерен алмазу, отримано фракції розділення, що різняться між собою за дефектністю поверхні і показниками міцності, водночас зі збільшенням дефектності поверхні зерен алмазу від 0,07 до 0,57 % показник міцності за статичного стиснення зерен алмазу знижується в 1,8 рази, а також знижується їх термостабільність і збільшується вміст домішок в шліфпорошку. Правлячий інструмент, оснащений елітними шліфпорошками алмазу зернистості 315/250 марки AC200, що отримані після розділення вихідного шліфпорошку марки AC125, має високу зносостійкість. Питомі витрати зерен алмазу під час правлення склали 11,8 мг/кг, що в 5,25 разів нижче аніж питомі витрати у разі застосування вихідних шліфпорошків алмазу марки AC125.*

© Т. О. ПРИХНА, Г. Д. ІЛЬНИЦЬКА, В. І. ЛАВРІНЕНКО, І. М. ЗАЙЦЕВА, М. М. ШЕЙКО, В. В. СМОКВИНА,  
В. В. ТИМОШЕНКО, 2022

**Ключові слова:** фізико-механічні характеристики порошків синтетичного алмазу, внутрішньокристалічні включення сплавів-розчинників, ростова система із застосуванням феросплавів, розділення алмазних порошків за значеннями дефектності поверхні, зносостійкість правлячого інструменту.

У попередніх роботах [1, 2] авторами було показано, що для адекватної оцінки властивостей шліфпорошків синтетичного алмазу та можливості їх спрямованої зміни важливим є врахування умов синтезу монокристалів алмазу, а саме у якій ростовій системі їх отримували. В [1] було досліджено шліфпорошки алмазу невеликої міцності (АС6 і АС20), які застосовують в шліфувальних кругах для обробки виробів машинобудування. Останнім часом у виробництві все більшого поширення набувають операції врізного профільного шліфування, що забезпечують найбільшу продуктивність обробки та високі точність і стабільність якості оброблюваних виробів. Водночас зростає роль алмазних правлячих роликів, що мають формувати прецизійний профіль шліфувального круга з мінімальними витратами часу. В цих інструментах застосовують порошки алмазу більш високої міцності – АС100–АС250. Відомо, що на ефективність роботи правлячого інструменту сильно впливають фізико-механічні властивості шліфпорошків синтетичного алмазу, якими оснащують правлячі ролики [3]. Раніше авторами [2] було показано, що можна ефективно впливати на властивості зерен алмазу, синтезованого саме із застосуванням феросплавів.

Виходячи з вимог до сучасного алмазного інструменту, основними характеристиками якості шліфпорошків алмазу є зернистість та зерновий склад, а також характеристики міцності: показник міцності і термостабільність. Однак для поліпшення роботи алмазного інструменту велике значення має отримання шліфпорошків алмазу однорідних за цими характеристиками [4–6]. В результаті вдосконалення процесу синтезу отримано високоміцні шліфпорошки алмазу марок до АС300 [7–9]. Зазвичай такі високоміцні шліфпорошки алмазу виготовляють із застосуванням під час їхнього синтезу феросплавів як каталізаторів розчинення вуглецю.

Метою даної роботи було дослідження фізико-механічних властивостей високоміцних (АС80–АС250) шліфпорошків синтетичного алмазу, що застосовують для оснащення прецизійного правлячого інструменту.

Дослідження проводили на порошках алмазу зернистостей 630/500, 400/315 і 315/250 різних марок<sup>1</sup>. Алмазні шліфпорошки оцінювали за зерновим складом, показником міцності  $P$  під час статичного стиснення зерен алмазу, дефектністю поверхні зерен алмазу (коефіцієнтом поверхневої активності), електрофізичними характеристиками (питомим електроопором  $\rho$ , питомою магнітною сприйнятливістю  $\chi$ ), а також за вмістом домішок у вигляді неспалимого залишку [10–14]. Елементний склад домішок і включень в шліфпорошках алмазу визначали за допомогою рентгенофлуоресцентного інтегрального аналізу з використанням растрового електронного мікроскопа BS-340 і енергодисперсного аналізатора рентгенівських спектрів Link-860, а елементний склад домішок – за допомогою програми кількісного аналізу ZAF-4FLS (Велика Британія) [15]. Термостійкість шліфпорошків алмазу оцінювали за коефіцієнтом термостабільності  $K_{т.с}$ , який дорівнює відношенню показника міцності алмазного порошку за статичного стиснення його зерен після термообробки ( $P_T$ ) до цього показника до термообробки ( $P$ ) і є характеристи-

---

<sup>1</sup> Всі порошки, що досліджували автори, було отримано з алмазу, синтезованого в системі Fe–Co–C.

кою алмазних порошків, що дозволяє оцінювати здатність порошку зберігати характеристики міцності після нагрівання [16]. Коефіцієнт однорідності за міцністю ( $K_{\text{одн.міц.}}$ ) певної зернистості і марки визначали за сумарним вмістом зерен, руйнівне навантаження яких знаходиться в певних інтервалах для номінальної марки відповідно до ДСТУ 3292–95 та ТУ У 28.4-05417344-075–2003 [10, 17, 18].

Коефіцієнт однорідності за лінійними розмірами ( $K_{\text{одн.л.р.}}$ ) певної зернистості оцінювали за сумарним вмістом зерен із середнім лінійним розміром в пробі. За лінійний розмір зерна алмазу  $\rho$  приймали напівсуму довжини  $l$  і ширини  $b$  проєкції зерна:  $\rho = (l + b)/2$  [19]. Оцінку дефектності поверхні шліфпорошків алмазу за коефіцієнтом поверхневої активності  $K_a$  виконували за [14]. Для оцінки однорідності шліфпорошків алмазу за міцністю ( $K_{\text{одн.міц.}}$ ) і розмірами ( $K_{\text{одн.л.р.}}$ ) розроблено комп'ютерну програму розрахунку показників міцності  $P$  і розміру  $\rho$ , яка дозволяє отримати інформацію про склад і однорідність порошку за  $P$  і  $\rho$  [5].

Як приклад останнього було проведено аналіз високоміцного шліфпорошку алмазу марки АС200 зернистості 315/250 за міцністю  $P$  (рис. 1).

Як видно на рис. 1, шліфпорошок алмазу марки АС200 зернистості 315/250 містить зерна алмазу, які розподіляють за міцністю відповідно маркам від АС80 до АС250, середньозважений показник міцності цього порошку  $P_{\text{ср}} = 259,28$  Н, однорідність за міцністю становить 40 %.

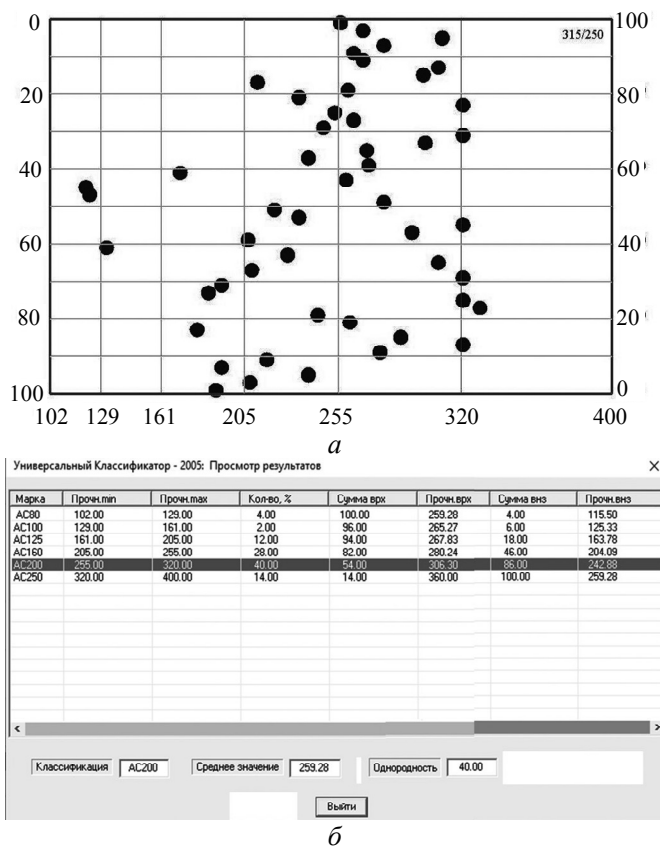


Рис. 1. Електронні таблиці аналізу порошку алмазу за міцністю марки АС200 зернистості 315/250: вміст зерен алмазу з різною міцністю в пробі порошку (а), склад порошку алмазу за міцністю (б), графічне представлення розподілу зерен порошку за міцністю (в).

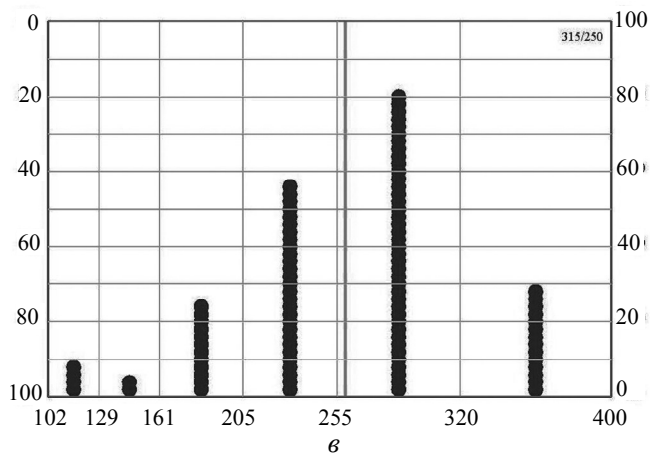


Рис. 1. (Продовження).

Результати досліджень вказаних вище фізико-механічних характеристик шліфпорошків алмазу різних марок АС80–АС250 зернистості 315/250, представлено в табл. 1.

**Таблиця 1. Властивості алмазних шліфпорошків зернистості 315/250 різних марок**

Характеристика	Марка алмазних шліфпорошків за ДСТУ 3292					
	АС250	АС200	АС160	АС125	АС100	АС80
Питома магнітна сприйнятливості $\chi \cdot 10^8$ , м <sup>3</sup> /кг	3,4	11,7	32,3	49,9	63,4	116,9
Показник міцності за кімнатної температури $P$ , Н	386,7	259,3	234,5	186,7	155,5	120,7
Коефіцієнт термостабільності $K_{т.с}$ , %	91	89	83	78	68	61
Коефіцієнт однорідності за міцністю $K_{одн.міц}$ , %	52	40	41	38	24	20
Коефіцієнт поверхневої активності $K_a$ , %	0,07	0,11	0,15	0,24	0,98	1,45
Вміст включень $\beta$ , % (за масою)	0,245	0,313	0,429	0,523	0,608	0,832

Аналіз даних табл. 1 показав, що зі зменшенням вмісту включень збільшується міцність алмазних шліфпорошків (марки АС250–АС80). Але у разі збільшення вмісту включень від 0,245 до 0,832 % (за масою) коефіцієнт термостабільності  $K_{т.с}$  зменшується від 91 до 61 %, коефіцієнт однорідності за міцністю – від 52 до 20 %. Водночас дефектність поверхні шліфпорошків різних марок, яка оцінюється за коефіцієнтом поверхневої активності  $K_a$  [14], збільшується від 0,07 до 1,45 %. Кількісне визначення  $K_a$  здійснюють за відношенням маси часток речовини, що утримується на дефектних мікроділянках поверхні зерен матеріалу, до всієї маси порошкового матеріалу (у відсотках).

З табл. 1 також видно, що шліфпорошки синтетичного алмазу зернистості 315/250 марок АС250–АС80 відрізняються і за магнітними властивостями. Питома магнітна сприйнятливості шліфпорошків алмазу з ростом вмісту

включень підвищується від  $3,4 \cdot 10^{-8}$  до  $116,9 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. Для вивчення зміни магнітних властивостей шліфпорошків синтетичного алмазу в залежності від вмісту в них внутрішньокристалічних домішок і включень визначали елементний склад і загальний вміст внутрішньокристалічних домішок і включень в зернах алмазу різних марок (табл. 2).

**Таблиця 2. Елементний склад внутрішньокристалічних домішок і включень в шліфпорошках алмазу зернистості 315/250 різних марок**

Марка	Елементний склад, % (за масою)									Зальний вміст включень, % (за масою)
	Si	Ca	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	
AC250	–	–	–	0,002	0,147	0,089	0,005	0,002	–	0,245
AC200	–	0,002	–	0,010	0,183	0,117	0,007	0,002	0,002	0,323
AC160	–	0,002	–	0,010	0,235	0,165	0,010	0,005	0,002	0,429
AC125	–	0,005	0,004	0,015	0,268	0,212	0,012	0,005	0,002	0,523
AC100	–	0,006	0,007	0,048	0,283	0,229	0,026	0,007	0,002	0,608
AC80	0,006	0,011	0,014	0,064	0,367	0,323	0,036	0,008	0,003	0,832

У табл. 2 показано, що шліфпорошки синтетичного алмазу зернистості 315/250 марок AC250–AC80 різняться між собою за елементним складом і за загальним вмістом внутрішньокристалічних домішок і включень. В процесі вивчення шліфпорошків синтетичного алмазу зернистості 315/250 різних марок, синтезованих у різних ростових системах, визначали магнітну сприйнятливості кожного досліджуваного порошку, а за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу – елементний склад домішок і включень. Сума всіх виявлених елементів відповідає загальному вмісту включень, а сума елементів сплаву-розчинника дає можливість оцінити їх вміст в порошку алмазу. За розробленою раніше методикою [6] проведено розрахунок магнітної сприйнятливості  $\chi_{\text{вкл}}$  домішок і включень в шліфпорошках різних марок з урахуванням існуючих залежностей:

$$\beta_a + \beta_{\text{вкл}} = 100 \%;$$

$$\chi_{\text{вих}} \cdot 100 = \chi_a \beta_a + \chi_{\text{вкл}} \beta_{\text{вкл}},$$

тобто

$$\chi_{\text{вих}} \cdot 100 = \chi_a \beta_a + \chi_{\text{вкл}} (100 - \beta_a);$$

$$\chi_{\text{вкл}} = \frac{\chi_{\text{вих}} \cdot 100 - \chi_a \beta_a}{100 - \beta_a},$$

де  $\beta_a$  і  $\beta_{\text{вкл}}$  – вміст алмазу і включень, відповідно, в зернах синтетичного алмазу;  $\chi_{\text{вих}}$ ,  $\chi_a$ ,  $\chi_{\text{вкл}}$  – магнітна сприйнятливості зерен синтетичного алмазу, алмазу ( $\chi_a = -0,62 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг) і включень відповідно.

Вимірювання  $\chi_{\text{вих}}$  і визначення елементного складу домішок і включень  $\beta_{\text{вкл}}$  дозволило розрахувати магнітну сприйнятливості включень  $\chi_{\text{вкл}}$ . За аналізом елементного складу домішок і включень в зернах алмазу було розраховано вміст елементів сплаву-розчинника у вигляді суми елементів заліза і кобальту для системи Fe–Co–C (табл. 3).

З табл. 3 видно, що порошки алмазу різних марок різняться між собою за вмістом внутрішньокристалічних домішок і включень, а також за магнітними характеристиками і характеристиками міцності. Водночас елементи сплаву-

розчинника переважають і складають від 96,3 до 82,9 % від загальної кількості наявних домішок і включень в порошках алмазу цих систем. Це свідчить про те, що шліфпорошки алмазу для розчинення вуглецю, саме за рахунок високих значень питомої магнітної сприйнятливості внутрішньокристалічних домішок і включень  $\chi_{\text{вкл}}$ , які містяться в кристалах алмазу, мають високі магнітні показники.

**Таблиця 3. Фізико-механічні характеристики порошків алмазу марок АС80–АС250 зернистості 315/250**

Марка	$\chi_{\text{вих}} \cdot 10^8, \text{ м}^3/\text{кг}$	$\chi_{\text{вкл}} \cdot 10^8, \text{ м}^3/\text{кг}$	$P, \text{ Н}$	Вміст домішок і включень		
				сплаву-розчинника Fe–Co		загальний, % (за масою)
				% (за масою)	%	
АС250	3,4	1640	386,7	0,236	96,3	0,245
АС200	11,7	3814	259,3	0,300	92,9	0,323
АС160	32,3	7673	234,5	0,400	93,2	0,429
АС125	49,9	9659	186,7	0,480	91,8	0,523
АС100	63,4	10529	155,5	0,512	84,2	0,608
АС80	116,9	14124	120,7	0,690	82,9	0,832

Залежність міцності за кімнатної температури й коефіцієнта термостабільності  $K_{\text{т.с}}$  шліфпорошків синтетичного алмазу, отриманого в системі Fe–Co–C, зернистості 315/250 різних марок від вмісту в них внутрішньокристалічних домішок і включень сплаву-розчинника Fe–Co показано на рис. 2.

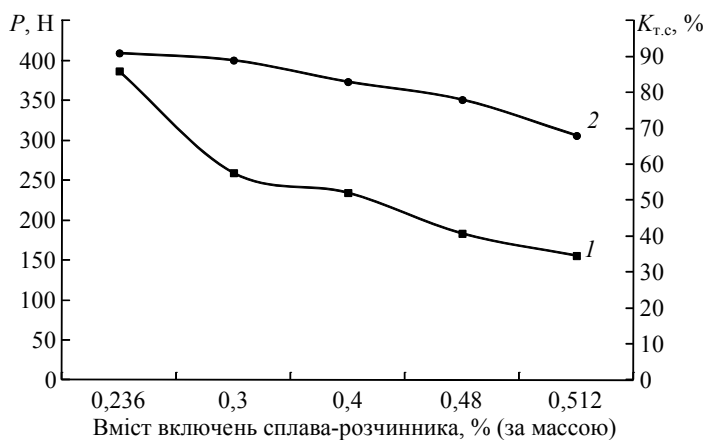


Рис. 2. Залежність характеристик міцності (1) і термостійкості (2) шліфпорошків синтетичного алмазу, зернистості 315/250 різних марок від вмісту в них внутрішньокристалічних домішок і включень сплаву-розчинника Fe–Co.

Як видно на рис. 2, для високоміцних зерен алмазу різних марок як вихідних, так і після високотемпературних обробок (про що свідчить зміна коефіцієнта термостабільності), зі збільшенням в них внутрішньокристалічних домішок і включень сплаву-розчинника у  $\sim 2,9$  рази, показник міцності шліфпорошків алмазу зменшується в 3,2 рази, а коефіцієнт їхньої термостабільності – в 1,5 разів.

Для поліпшення характеристик міцності й підвищення однорідності за міцністю і лінійними розмірами розроблено спеціальні методи розділення шліфпорошків алмазу за ступенем дефектності їхньої поверхні ( $K_a$ ) [7, 9].

Синтетичні алмазні порошки за рахунок наявності в них внутрішньокристалічних металічних включень сплаву-розчинника вуглецю мають природну магнітну сприйнятливості  $\chi_{\text{пр}}$  ( $\chi_{\text{вих}}$ ). У разі використання адгезійно-магнітного способу сортування після закріплення на поверхні зерен алмазу феромагнітних мікрочастинок порошку з магнітною сприйнятливості  $\chi_{\text{ф.п}}$  виникає загальна магнітна сприйнятливості  $\chi_{\text{заг}}$ . Оскільки ця характеристика відноситься до всіх вимірюваних порошків алмазу, то набута магнітна сприйнятливості  $\chi_{\text{наб}} = \chi_{\text{пр+ф.п}}$  визначається як  $\chi_{\text{пр+ф.п}} = \chi_{\text{заг}} - \chi_{\text{пр}}$ . Для шліфпорошків синтетичного алмазу марки АС160 зернистості 315/250 визначали  $\chi_{\text{пр}}$ ,  $\chi_{\text{заг}}$  і розраховували  $\chi_{\text{пр+ф.п}}$  (табл. 4).

**Таблиця 4. Фізико-механічні характеристики шліфпорошків синтетичного алмазу зернистості 315/250 марки АС160**

Фракція розділення	Вихід, %	$P, \text{H}$	$\chi_{\text{пр}} \cdot 10^8, \text{м}^3/\text{кг}$	$\chi_{\text{заг}} \cdot 10^8, \text{м}^3/\text{кг}$	$\chi_{\text{пр+ф.п.}} \cdot 10^8, \text{м}^3/\text{кг}$
1	8,5	251	21,1	31,2	10,1
2	12,4	242	35,5	47,5	12,0
3	36,5	221	72,4	93,4	21,0
4	32,0	211	119,6	164,6	45,0
5	10,6	188	195,1	255,5	60,2
Вихідний	100,0	219,5	117,7	155,8	37,9

Як свідчать дані табл. 4, для шліфпорошків синтетичного алмазу значення набутої магнітної сприйнятливості  $\chi_{\text{пр+ф.п}}$  менше  $\chi_{\text{пр}}$ . На підставі проведених досліджень розділення кристалів алмазу з відносно гладкою поверхнею і високою міцністю кількість феромагнітних частинок, що закріпилися, не перевищує 0,1 % від маси алмазного порошку. За такої умови  $\chi_{\text{пр+ф.п}}$  може бути рівною або суттєво нижчою  $\chi_{\text{пр}}$ , що різко знижує ефективність розділення алмазних порошків як за дефектністю їхньої поверхні, так і за міцністю.

Для підвищення ефективності розділення шліфпорошків необхідно внести зміни в процес розділення порошків. Для цього було вдосконалено спосіб адгезійно-магнітного сортування алмазних шліфпорошків, де була передбачена обробка поверхні зерен шліфпорошків алмазу шляхом нанесення електропровідних тонкодисперсних частинок і адгезійного закріплення їх на поверхні зерен алмазу для створення набутих електричних властивостей і умов проведення процесу розділення порошку в електричному полі. Нанесення електропровідних тонкодисперсних частинок розміром не більше 1000 нм на поверхню зерен алмазу здійснюють за концентрації цих частинок не менше 5 % [8, 9]. Створення сильної контрастності за електричними властивостями зерен шліфпорошків алмазу може бути забезпечено за умови, що електроопір електропровідного порошку значно нижче електроопору шліфпорошків алмазу. Для забезпечення міцної адгезійної взаємодії електропровідних частинок з поверхнею зерен алмазу необхідно, щоб електропровідний порошок містив в достатній кількості частинки, розміри яких співмірні з розмірами дефектів на поверхні алмазних кристалічних частинок, тобто повинні бути на один-два порядки менше розміру зерен шліфпорошку алмазу.

Було проведено порівняльні випробування двох способів сортування: адгезійно-електричного і адгезійно-магнітного. Для цього було обрано шліфпорошок синтетичного алмазу марки АС100 315/250, який на початку розділяли за вдосконаленим способом, а потім за відомим [7, 9]. На поверхню зерен алмазу марки АС100 315/250 наносили тонкодисперсний порошок нікелю в співвідношенні 10:1. Частинки порошку нікелю, що не закріпилися, відділяли на вібрості. Після розділення на електросепараторі ЕС-2 за напруги електричного поля 15 кВ отримували дві фракції: провідну і непровідну. Для кожної фракції визначали вихід ( $y$  %), питомий електроопір порошку алмазу вихідного  $\rho_a$ , електроопір порошку алмазу з тонкодисперсним порошком нікелю  $\rho_{a+н.п.}$ , показник міцності  $P$  за кімнатної температури, однорідність за міцністю  $K_{одн.міц}$  і термостійкість у вигляді коефіцієнта термостабільності  $K_{т.с}$  (табл. 5).

**Таблиця 5. Результати розділення шліфпорошків алмазу марки АС100 зернистості 315/250, в електричному полі**

Фракція розділення	Вихід, %	$\rho_{a(н.п.+е.п.)} \cdot 10^{-3}$ , Ом·м	$\rho_a \cdot 10^{-10}$ , Ом·м	$P$ , Н	$K_{одн.міц}$ , %	$K_{т.с}$ , %	Марка
Непровідна	22	0,03	3,0	261,0	42,9	78	АС160
Провідна	78	2	2,0	115,1	35,2	34	АС80
Вихідна	100	–	2,2	155,5	17,6	45	АС100

В результаті проведених випробувань встановлено, що показник міцності непровідної фракції зерен алмазу з виходом 12,5 % складав 261 Н, що відповідає марці АС160 [10], однорідність порошку за міцністю – 42,9 %, коефіцієнт термостабільності – 78 %.

Водночас було проведено розділення зерен алмазу марки АС100 315/250 з використанням феромагнітного порошку для нанесення на їхню поверхню вихідного порошку алмазу з  $\chi_a$  і створення посилених набутих магнітних властивостей з  $\chi_{a+ф.п.}$ . Розділення проводили на магнітному сепараторі 138Т з отриманням магнітної та немагнітної фракцій, у яких визначали показник міцності  $P$  за кімнатної температури, однорідність за міцністю  $K_{одн.міц}$  і термостійкість за коефіцієнтом термостабільності  $K_{т.с}$ . (табл. 6).

**Таблиця 6. Результати розділення шліфпорошків алмазу, марки АС100, зернистості 315/250, в магнітному полі**

Фракція розділення	Вихід, %	$\chi_{a+ф.п.} \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$\chi_a \cdot 10^8$ , м <sup>3</sup> /кг	$P$ , Н	$K_{одн.міц}$ , %	$K_{т.с}$ , %	Марка
Немагнітна	18	2,5	20	204,0	26,8	78	АС160
Магнітна	82	22	228	111,2	35,2	34	АС80
Вихідна	100	–	181	155,5	17,6	45	АС100

Вихід немагнітної фракції склав 10,8 % з міцністю 204 Н (див. табл. 6). За такої умови однорідність за міцністю зерен алмазу немагнітної фракції складала 26,8 %, що в 1,6 рази нижче, ніж за розділення новим розробленим способом. Таким чином, аналіз зміни властивостей шліфпорошків алмазу, отриманих в процесі їх сортування за дефектністю зерен, показав, що розділення шліфпорошків алмазу за дефектністю поверхні супроводжується зміною їхніх основних технологічних характеристик, насамперед міцності і термостійкості.



Із застосуванням процесу розділення в електричному полі було проведено дослідження зміни електроопору шліфпорошків алмазу всіх отриманих фракцій природного  $\rho_{\text{пр}}$  та після розділення  $\rho_p$ , визначено відмінності в електроопорі суміжних фракцій і оцінено значення контрастності. Контрастність розділення шліфпорошків синтетичного алмазу зернистості 315/250 оцінювали за коефіцієнтом контрастності [20]

$$K_k = \frac{\rho_{p_{i+1}} - \rho_{p_i}}{\rho_{p_i}},$$

де  $\rho_{p_{i+1}}$  і  $\rho_{p_i}$  – електроопір суміжних фракцій.

Контрастність значень  $\rho_p$  суміжних фракцій знижується в міру збільшення міцності порошків алмазу від п'ятої фракції розділення до першої. У міру зниження  $\rho_{\text{пр}}$  зменшується ефективність розділення, але зростає її селективність. З цього випливає, що інтервал зміни напруги в електричному сепараторі має збільшуватися зі збільшенням значення набутого електроопору зерен алмазу. Необхідно відзначити, що прецизійне регулювання межі розділення можливе у разі зміни напруги в електричному сепараторі. В результаті проведених досліджень показано, що розділення шліфпорошків алмазу зернистості 315/250 марки АС100, за дефектністю їхньої поверхні і за міцністю з використанням металічного електропровідного порошку нікелю для створення набутих електричних властивостей  $\rho_{a+\epsilon,п}$  дозволило отримати шліфпорошки марок від АС160 до АС65, що відрізняються між собою за міцністю від 261,0 до 97,8 Н і з високою однорідністю за характеристиками міцності (табл. 7).

**Таблиця 7. Результати розділення в електричному полі шліфпорошків алмазу, марки АС100 зернистості 315/250**

Фракція розділення	Вихід, %	$\rho_{a+\epsilon,п} \cdot 10^{-10}$ , Ом·м	$\rho_p \cdot 10^{-3}$ , Ом·м	$K_k$ , %	$K_a$ , %	$P$ , Н	$K_{\text{одн. міц.}}$ , %	$K_{\text{т.с.}}$ , %	Марка
1	3,7	12,7	9,5		0,09	261,0	77,6	91	АС160
2	16,7	10,5	18,5	0,49	0,22	186,7	77,1	81	АС125
3	29,6	6,4	55,7	0,67	0,57	155,5	74,1	75	АС100
4	30,9	3,1	97,5	0,75	1,14	120,7	71,7	71	АС80
5	19,1	1,5	190,3	0,95	2,10	97,8	64,4	65	АС65
Вихідна	100,0	6,6	75,1		0,79	142,8	42,1	49	АС100

Для отримання високоміцних шліфпорошків алмазу з високою однорідністю за міцністю та лінійними розмірами було виконано розділення шліфпорошків алмазу зернистості 630/500, 400/315 і 315/250 марки АС125, за розробленою технологією отримання елітних шліфпорошків.

Після виготовленні високоміцних термостійких шліфпорошків синтетичного алмазу, з високою однорідністю за міцністю та лінійними розмірами спочатку для підвищення термостійкості зерен алмазу було проведено магнітну сепарацію вихідних порошків за різної напруженості магнітного поля з метою відділення порошків з високою магнітною сприйнятливістю, що відповідає більш високому вмісту внутрішньокристалічних металічних включень сплаву-розчинника вуглецю в зернах алмазу. Решту порошків алмазу сортували за дефектністю поверхні їхніх зерен. Під час розділення шліфпорошків за дефектністю поверхні зерен для підвищення контрастності власти-

востей шліфпорошків алмазу застосовували електропровідні тонкодисперсні порошки. Для збільшення вмісту основної фракції і підвищення коефіцієнта однорідності за розмірами зерен алмазу використовується остаточна класифікація за зернистостями на ситах ряду R-20 з метою виділення вузьких класів зернистостей або додаткова класифікація за формою зерен алмазу на вібраційному столі.

Результати розділення в магнітному полі шліфпорошків алмазу марки AC125 630/500, наведено в табл. 8.

**Таблиця 8. Результати розділення в магнітному полі шліфпорошків алмазу зернистості 630/500 марки AC125**

Фракція розділення	Вихід, %	$\chi \cdot 10^8$ , м <sup>3</sup> /кг	<i>P</i> , Н	<i>K</i> <sub>т.с.</sub> , %	<i>K</i> <sub>одн.міц.</sub> , %	Неспалимий залишок, %	Марка
1 (магнітна)	10,5	9,4	221,1	69	51	0,27	AC80
2 (магнітна)	11,6	7,2	268,4	88	54	0,18	AC100
3 (магнітна)	71,5	6,4	290,2	90	56	0,15	AC125
4 (немагнітна)	6,4	3,2	308,6	90	54	0,12	AC125
Вихідна	100,0	6,6	285,3	86	38	0,19	AC125

Після розділення в магнітному полі в фракції 1 виявили зерна алмазу з високою питомою магнітною сприйнятливістю, з великим вмістом домішок в зернах алмазу, що і стало причиною низької термостійкості (*K*<sub>т.с.</sub> = 69 %). Видалення з загальної вихідної маси 10,5 % зерен алмазу з  $\chi = 9,4 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг сприяло отриманню решти маси зерен алмазу (89,5 %) з магнітною сприйнятливістю  $6,1 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг, показником міцності за статичного стисненні зерен 292,8 Н і з коефіцієнтом термостабільності *K*<sub>т.с.</sub> = 86 %. Після видалення зерен алмазу з низьким коефіцієнтом термостабільності решта зерен алмазу була розділена за дефектністю їх поверхні. Результати розділення зерен алмазу за дефектністю поверхні зерен алмазу марки AC125 630/500 наведено в табл. 9.

**Таблиця 9. Результати розділення за дефектністю поверхні зерен алмазу зернистості 630/500 марки AC125**

Фракція розділення	Вихід, %	<i>K</i> <sub>а.</sub> , %	$\chi \cdot 10^8$ , м <sup>3</sup> /кг	<i>P</i> , Н	<i>K</i> <sub>т.с.</sub> , %	<i>K</i> <sub>одн.міц.</sub> , %	<i>K</i> <sub>одн.л.р.</sub> , %	Неспалимий залишок, %	Марка
1	9,0	0,07	1,4	373,5	96	80	77	0,09	AC160-E
2	10,7	0,14	3,2	331,8	93	80	75	0,11	AC125-E
3	58,4	0,20	6,5	301,2	90	76	75	0,12	AC125-E
4	6,4	0,39	7,9	246,7	85	65	69	0,19	AC100
5	5,0	0,57	11,4	212,8	72	64	63	0,24	AC80
Вихідна	89,5	–	6,1	292,8	86	45	57	0,16	AC125

Як видно з табл. 9, після розділення алмазних шліфпорошків за дефектністю поверхні зерен алмазу зернистості 630/500, марки AC125 отримано п'ять фракцій, що відрізняються між собою за значенням *K*<sub>а.</sub>, що дозволило виділити з вихідної маси зерен алмазу шліфпорошки алмазу з різними характеристиками міцності. Встановлено, що зі збільшенням дефектності поверхні зерен алмазу знижуються їхні характеристики міцності. Так, зі збільшенням *K*<sub>а.</sub> від 0,07 до 0,57 % показник міцності за статичного стиснення зерен алмазу зни-

жується в 1,8 рази і водночас знижується коефіцієнт їхньої термостабільності  $K_{т.с}$  та збільшується вміст домішок в шліфпорошку. Показано, що після розділення за дефектністю поверхні зерен алмазу, за коефіцієнтом однорідності, за міцністю шліфпорошки алмазу відрізняються у порівнянні із вихідними порошками приблизно 1,8–1,4 рази, за коефіцієнтом однорідності за лінійними розмірами – 1,35–1,11 рази.

Шліфпорошки алмазу перших трьох фракцій розділення зернистості 630/500 марки АС125 відповідно до технічних умов ТУ У 23.9-05417377-367:2020 “Шліфпорошки з синтетичних алмазів елітні для оснащення алмазного інструменту” можна віднести до елітних порошків [21]. Аналогічні результати отримано під час розподілу шліфпорошків алмазу зернистості 400/315 та 315/250 марки АС125 на 5 фракцій.

Результати розділення шліфпорошків алмазу зернистості 630/500, 400/315 і 315/250 марки АС125 за міцністю на фракції представлено на рис. 3.

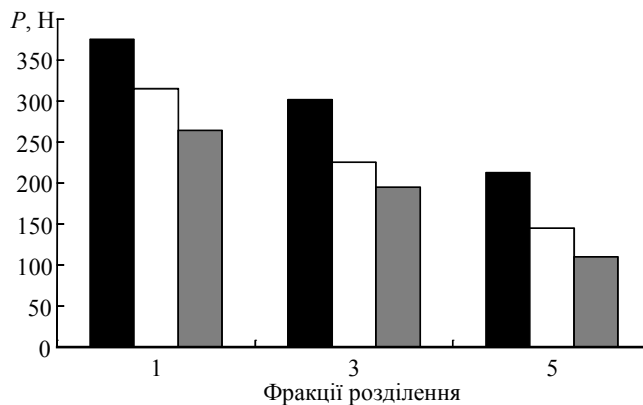


Рис. 3. Міцність шліфпорошків алмазу зернистості 630/500 (■), 400/315 (□), 315/250 (▨) для різних фракцій розділення.

На рис. 4 показано залежність міцності зразків фракцій розділення алмазу зернистості 630/500–315/250 від дефектності їх поверхні.

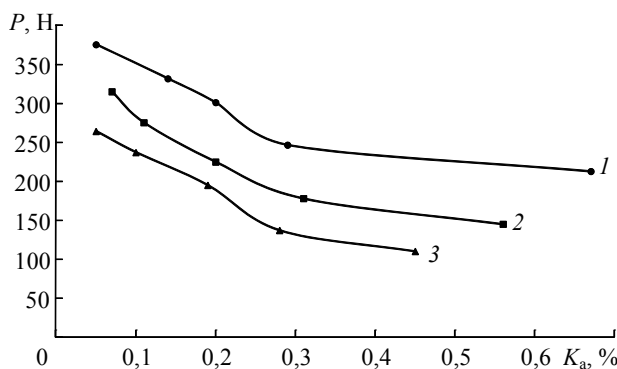


Рис. 4. Залежність міцності шліфпорошків алмазу зернистості 630/500 (1), 400/315 (2), 315/250 (3) від дефектності їх поверхні.

У разі збільшення дефектності поверхні зерен алмазу зернистостей 630/500, 400/315 і 315/250 знижуються характеристики їхньої міцності (див.

рис. 4). У разі збільшення  $K_a$  від 0,05 до 0,57 % показник міцності за статичного стиснення зерен алмазу знижується відповідно в 1,75, 2,17 і 2,40 разів.

Дослідження характеристик міцності (термостійкості та однорідності за міцністю) шліфпорошків алмазу зернистості 315/250 марки АС125 після їх розділення за дефектністю поверхні показало, що отримані фракції розділення відрізняються між собою за термостійкістю в 1,7 рази, а за коефіцієнтом однорідності за міцністю в порівнянні з вихідними порошками в 1,48–1,23 рази (рис. 5).

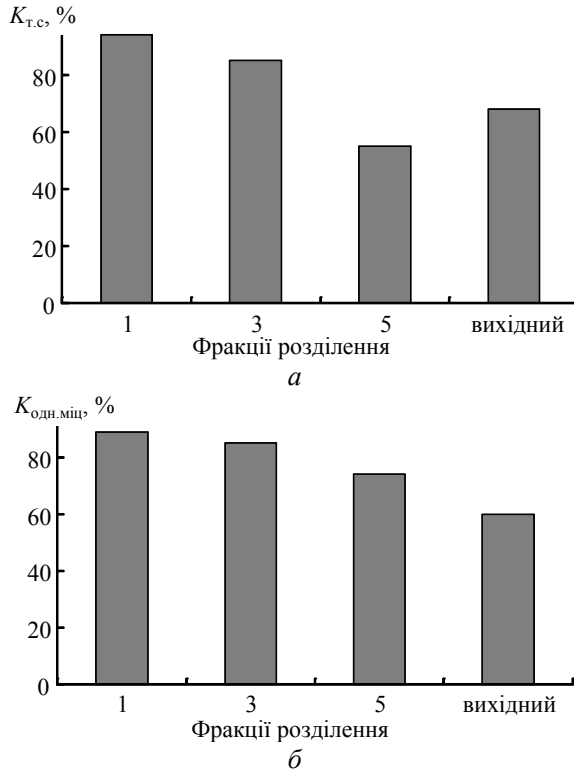


Рис. 5. Зміна характеристик міцності шліфпорошків алмазу зернистості 315/250 марки АС125: фракції розділення за термостійкістю (а) і за однорідністю за міцністю (б).

Вихідні шліфпорошки алмазу зернистості 315/250 марки АС125 і після розподілу за дефектністю поверхні АС200-Е і АС80 було використано для оснащення правлячих роликів. Виготовлені правлячі ролики випробували на зносостійкість на круглошліфувальному верстаті мод. 3Б151 зі спеціально замовленими абразивними кругами ПП 600×63×305 24А40СТ1К6 підвищеної твердості (СТ1) з визначеними режимами правки: швидкості обертання круга – 35 м/с, поздовжньою подачею – 1,0 м/хв, поперечною подачею – 0,02 мм/хід. Результати випробувань наведено в табл. 10.

За результатами випробування шліфпорошки алмазу елітної марки АС200-Е зернистості 315/250 ( $P = 264$  Н,  $K_{т.с} = 94$  %,  $K_{одн.міц} = 89$  % і  $K_{одн.лр} = 82$  %) показали найвищу зносостійкість. Питомі витрати зерен алмазу під час правлення склали 11,8 мг/кг, що в 5,25 разів нижче, ніж питомі витрати вихідних шліфпорошків марки АС125. Шліфпорошки алмазу марки АС80 з низькими термостійкістю і однорідністю за міцністю та лінійними розмірами мали найвищі витрати зерен алмазу під час випробуванні правлячого інструменту, оснащеного ними.

**Таблиця 10. Результати фізико-механічних та експлуатаційних характеристик шліфпорошків алмазу зернистості 315/260**

Марка	Характеристики міцності			$K_{\text{одн.л.р}}, \%$	Питомі витрати зерен алмазу, мг/кг
	$P, \text{H}$	$K_{\text{T.с}}, \%$	$K_{\text{одн.міц}}, \%$		
AC200-E	264,0	94	89	82	11,8
AC80	110,0	55	74	70	81,0
AC125	186,7	68	60	65	62,0

### ВИСНОВКИ

Шліфпорошки алмазу різних марок завдяки високим значенням питомої магнітної сприйнятливості внутрішньокристалічних включень сплавів-розчинників мають сильні магнітні властивості.

Показник міцності шліфпорошків алмазу різних марок у разі збільшення у  $\sim 2,9$  рази внутрішньокристалічних домішок і включень сплаву-розчинника знижується не менше, ніж у 3 рази, а коефіцієнт їхньої термостабільності – в 1,5 разів (як вихідних, так і після високотемпературних обробок).

Під час розділення алмазних шліфпорошків за дефектністю поверхні зерен алмазу зернистості 630/500 марки AC125 отримано фракції розділення, що відрізняються за дефектністю поверхні і за різними характеристиками міцності.

У разі збільшення дефектності поверхні зерен алмазу знижуються їхні характеристики міцності. Так, у разі збільшенні  $K_a$  від 0,07 до 0,57 % показник міцності за статичного стисненні зерен алмазу знижується в 1,8 рази, водночас знижується їхня термостабільність ( $K_{\text{T.с}}$ ) і збільшується вміст домішок в шліфпорошку.

Отримані фракції розділення шліфпорошків алмазу зернистості 315/250 марки AC125 за дефектністю поверхні зерен алмазу відрізняються за термостійкістю в 1,7 рази, а за коефіцієнтом однорідності за міцністю в порівнянні з вихідними порошками в 1,48–1,23 рази. Правлячий інструмент, оснащений елітними шліфпорошками алмазу зернистості 315/250 марки AC200, отриманими після розділення вихідного шліфпорошку марки AC125, мав високу зносостійкість. Питомі витрати зерен алмазу під час правлення склали 11,8 мг/кг, що в 5,25 разів нижче, ніж питомі витрати вихідних шліфпорошків алмазу марки AC125.

T. O. Prikhna, H. D. Ilnytska, V. I. Lavrinenko, I. N. Zaitseva,  
M. N. Sheiko, V. V. Smokvyna, V. V. Tymoshenko

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine

Improving the physical and mechanical properties of synthetic diamond powders synthesized using ferroalloys to increase the wear resistance of the diamond ruling tool

*Physico-mechanical and operational characteristics of synthetic diamond powders obtained in the Fe–Co–C growth system have been studied. It is shown that diamond grinding powders of different brands synthesized in this system, due to the high values of the specific magnetic susceptibility of intracrystalline inclusions of solvent alloys, have strong magnetic properties. It is established that the strength characteristics of diamond grinding powders of different brands synthesized in the Fe–Co–C system, both initial and after high-temperature treatments, with an increase in intracrystalline impurities and inclusions of solvent alloy decreases by about 2.9 times, the strength of diamond grinding powders is reduced by at least 3*

times, and the coefficient of their thermal stability by 1.5 times. During the separation of diamond grinding powders with a grain size of 630/500, AS125 grade by surface defect of diamond grains synthesized in the Fe–Co–C growth system, separation fractions differing in surface defect and strength indicators were obtained, while diamond grain surface defect increased from 0.07 to 0.57 %, the strength of static compression of diamond grains is reduced by 1.8 times, as well as their thermal stability is reduced and the content of impurities in the grinding powder increases. The control tool, equipped with elite grinding powders of diamond grain size 315/250 brand AS200, obtained after separation of the original grinding powder brand AS125, has high wear resistance. The specific consumption of diamond grains during the reign was 11.8 mg/kg, which is 5.25 times lower than the specific costs when using the original diamond grinding powder of AS125 diamond.

**Keywords:** physical and mechanical characteristics of synthetic diamond powders, intracrystalline inclusions of solvent alloys, growth system with the use of ferroalloys, separation of diamond powders according to the values of surface defect, wear resistance of the ruling tool.

1. Shulzhenko A.A., Prikhna T.O., Ilnytska H.D., Lavrinenko V.I., Borymskii O.I., Sokolov A.N., Tkach V.N., Smokvyna V.V., Zaitseva I.N., Tymoshenko V.V. Comparison of the dimensional, physical, mechanical, and operational characteristics of AS6 and AS20 synthetic diamond powders synthesized in the Ni–Mn–C and Fe–Si–C systems. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no.1. P. 1–11.
2. Ильницкая Г.Д., Прихна Т.А., Лавриненко В.И., Смоквина В.В., Зайцева И.Н. Влияние термической обработки на физико-механические свойства алмазов, синтезированных с применением ферросплавов. *Труди міжнародної наукової конференції "Матеріали для роботи в екстремальних умовах-9"*, Київ: НТУУ "КПІ", 18–19 груд. 2019 р. С. 29–32.
3. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 т. / под общей ред. Н.В. Новикова. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2007. Том 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / под ред. А.А. Шепелева. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2007. 340 с.
4. Novikov N.V., Shulzhenko A.A., Bogatyreva G.P., Sokolov A.N., Nevstruev G.F., Ilnitckay G.D. Uniformity of superhard material grinding powders. *NATO Innovat. Superhard Mater. Sustainable Coat. Adv. Manufact.* 2005. P. 391–402.
5. Новиков Н.В., Невструев Г.Ф., Ильницкая Г.Д. Оценка качества порошков сверхтвердых материалов. Ч. 1: Теоретические основы метода оценки характеристик качества. *Сверхтв. материалы.* 2006. № 5. С. 74–83. Ч. 2: Практическое применение нового метода оценки характеристик качества. *Сверхтв. материалы.* 2006. № 6. С. 58–67.
6. Физические свойства алмаза. Справ. Киев: Наук. думка, 1987. С. 85–89.
7. Ильницкая Г.Д. Влияние структуры кристаллов алмаза на физико-механические свойства алмазных порошков. *Надтверді матеріали: створення та застосування.* Київ: ІНМ НАН України, 2007. С. 189–196.
8. Ильницкая Г.Д., Богатырева Г.П., Невструев Г.Ф. Получение высококачественных алмазных шлифпорошков. *Сб. науч. тр. "Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов"*. Киев: ИСМ НАН Украины, 2005. С. 63–71.
9. Новіков М.В., Богатирьова Г.П., Невструев Г.Ф., Ильницкая Г.Д. Спосіб розподілу зернистого матеріалу за дефектністю поверхні зерен. Пат. 25515, Україна. МПК В03С 7/00, В03С 1/00 № 200703803. Заявл. 05.04.2007; Опубл. 10.08.2007. Бюл. № 12.
10. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Чинний 01.01.96. Київ: Держстандарт України. 1995. 71 с.
11. М 88 України 90.256–2004. Методика визначення питомої магнітної сприйнятливості порошків надтвердих матеріалів (НТМ). Київ: ІНМ НАН України, 2004. 9 с.
12. М 23.9-303:2014. Методика определения удельного электрического сопротивления дисперсных порошков сверхтвердых материалов. Киев: ИСМ НАН Украины, 2014. 6 с.
13. Ильницкая Г.Д. Оценка дефектности поверхности алмазов по адгезионным свойствам. *Физико-химические свойства сверхтвердых материалов и методы их анализа.* Киев: ИСМ НАН Украины, 1987. С. 33–39.
14. М88 Украины 90.258–2004. Методика определения коэффициента поверхностной активности порошков сверхтвердых материалов (СТМ). Киев: ИСМ НАН Украины, 2004. 11 с.

15. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Москва: Мир, 1984. 348 с.
16. М 26.8-299:2010. Определение коэффициента термостабильности шлифпорошков синтетических алмазов. Методика; Введ. 01.01.10. Киев: ИСМ НАН Украины, 2010. 7 с.
17. ТУ У 28.4-05417344-075-2003. Шлифпорошки синтетических алмазов марок АС200, АС250, АС300, АС350, АС400. Технические условия. Введ. 01.09.03. Киев: Госстандарт Украины, 2003. 10 с.
18. М 28.5-272:2008. Методика аналитической оценки прочностных характеристик шлифпорошков сверхтвердых материалов (СТМ). Киев: ИСМ НАН Украины, 2008. 14 с.
19. М 28.5-271:2008. Методика аналитической оценки линейных размеров зерен порошков сверхтвердых материалов (СТМ). Киев: ИСМ НАН Украины, 2008. 18 с.
20. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. Москва: Недра, 1984. 208 с.
21. ТУ У 23.9-05417377-367:2020. Шліфпорошки з синтетичних алмазів елітні для оснащення алмазного інструменту. Технічні умови. Київ: ІНМ НАН України, 2020. 8 с.

Надійшла до редакції 16.04.21

Після доопрацювання 17.06.21

Прийнята до опублікування 17.07.21