

Інструмент, порошки, пасти

УДК 549.211.002.61:546.26.162

**Г. А. Петасюк*, Г. Д. Ільницька, Г. А. Базалій,
Н. О. Олійник, Ю. В. Сирота**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

*petasyuk@ukr.net

Флотаційне розділення як спосіб покращення однорідності порошків синтетичного алмазу за морфометричними характеристиками, формою зерен та зерновим складом

Виконано аналіз застосування флотаційного розділення для порошків синтетичного алмазу, приведеного у різних публікаціях. Встановлено, що прикладне застосування цього методу фокусується загалом на збагаченні продукту синтезу алмазу та на покращенні якості уже виготовлених кондиційних порошків синтетичного алмазу за окремими їхніми характеристиками, зокрема за статичною міцністю зерен. Представлено результати порівняльного кількісного дослідження шорсткості проекції зерен, інших морфометричних характеристик і технологічних властивостей, пінного і камерного продуктів флотаційного розділення кондиційного шліфпорошку АС20 100/80. Вперше на кількісному рівні встановлено, що порошки пінної фракції мають менші показники шорсткості проекції зерен та їхнього питомого периметра у порівнянні з камерною фракцією. Саме ці морфометричні характеристики опосередковано відповідають за розвиток поверхні зерен, тобто за їхню шорсткість. Показано, що відомі науково-методичні засоби опосередковано-аналітичного діагностування морфометричних характеристик та технологічних властивостей алмазних шліфпорошків дозволяють отримувати достовірну інформацію для прийняття рішення щодо якості флотаційного розділення та доцільності повторного чи багатоступеневого застосування флотаційного розділення.

Ключові слова: алмазний шліфпорошок, флотація, розділення, морфометричні характеристики, технологічні властивості, однорідність.

ВСТУП

Флотація – спосіб розділення сумішей твердих дрібних частинок, що належать різним речовинам, а також виділення крапель дисперсної фази з емульсій, заснований на їхній різній змочуваності і здатності накопичуватися на поверхні розділу фаз. Теоретичні основи флотації викладено в [1–3].

© Г. А. ПЕТАСЮК, Г. Д. ІЛЬНИЦЬКА, Г. А. БАЗАЛІЙ, Н. О. ОЛІЙНИК, Ю. В. СИРОТА, 2024

Флотацію традиційно використовують у гірничорудній промисловості як засіб збагачення корисних копалин (руд кольорових металів, рідкісних і розсіяних елементів, вугілля, самородної сірки) [1–3]. До інших сфер застосування флотації відносяться розділення мінералів комплексних руд, переробка алмазонасних кімберлітів, розділення солей, очищення стічних вод і, зокрема, для виділення крапель масел і нафтопродуктів. Деякі застосування флотації з наведеного його переліку, які одночасно становлять і предмет наукових досліджень, можна знайти у [4–9].

Що стосується порошків синтетичного алмазу, то флотацію застосовують найчастіше як спосіб збагачення продукту синтезу та покращення якості уже виготовлених кондиційних алмазних шліф- і мікропорошків методом флотаційного розділення (сортування) [10–12].

Дослідженнями [10] встановлено, що у разі флотаційного розділення графіту та алмазу така сполука, як декан, має найбільшу вибірковість серед вуглеводнів газової фракції, тому застосування декану як збирача сприяє збільшенню селективності флотаційного процесу і знижує втрати алмазу з відвальним продуктом до 3–4 %¹

В [11, 12] з використанням методичного апарату планування експерименту та базуючись на результатах досліджень [10] проводили оптимізацію технологічних параметрів процесу флотаційного розділення продукту синтезу алмазу із застосуванням як реагента-збирача графіту саме декану. Методом Бокса-Вілсона [13] було визначено оптимальні режими флотаційного розділення графіту та алмазу деканом: тривалість ультразвукової обробки – 20 хв; витрата повітря – 2 л/хв; тривалість флотації – 1 год 45 хв; витрата декану – 0,5 г/кг сухого матеріалу. Показано, що за дотримання таких режимів флотації вміст алмазу у відвальному продукті не перевищував допустимих норм і становив 0,2 %, а вихід відвального продукту (графіту) становить 40–45 % у разі загального вилучення алмазу 97–99 %.

В [14] вивчали доцільність сумісного використання гравітаційного та флотаційного розділення до виділення графіту з його сумішей із синтетичним алмазом. Результати показали, що комбіноване застосування цих двох методів дозволяє отримувати концентрати із вмістом алмазу понад 80 % і вилученням ~ 93 %. Зазначено, що попереднє збагачення гравітаційним і флотаційним методами дозволяє виключити складну багатоступеневу хімічну обробку синтетичного алмазного матеріалу. В [15] подібні дослідження було доповнено вимірюваннями дзета-потенціалу як самої суміші, так і її складових залежно від рН розчину.

Одним із перших (якщо взагалі не першим) науковим дослідженням за тематикою застосування флотації до кондиційних порошків синтетичного алмазу як способу отримання більш якісних за певними характеристиками їхніх фракцій, була робота Г. П. Богатирьової [16], де було започатковано застосування флотації до сортування шліфпорошків синтетичного алмазу за міцністю їхніх зерен і вперше виявлено, що зерна шліфпорошку синтетичного алмазу з гладкою поверхнею, покриті плівкою реагента-збирача, виносилися на поверхню разом із бульбашками повітря (пінний продукт). Зерна алмазів з шорсткою поверхнею, на яких закріпився реагент-подавлювач, добре змочувалися водою і залишалися в камері флотомашини (камерний продукт). Було встановлено, що міцність камерного продукту на 25–35 % нижча за міцність пінного, який містить до 80 % зерен з гладкою поверхнею граней. Флотацій-

¹ Тут і далі вміст алмазу, відвальних продуктів, а також зерен порошків алмазу різних фракцій приведено в % (за масою).

ний спосіб сортування у поєднанні з класифікацією за формою зерен на вібростолі дозволяє збільшити вихід продуктів високої міцності. Констатували, що найбільш шорсткі (найменш міцні) алмазні зерна, які мають більш розвинену поверхню, доцільно застосовувати в інструменті на пористій зв'язці. Працездатність інструмента на такій зв'язці в 1,5 рази вища за працездатність інструмента, виготовленого з несортованих алмазів.

Для більш ефективного розділення порошків синтетичного алмазу методом флотації за статичною міцністю їхніх зерен розроблена спеціальна конструкція флотомашини з ультразвуковою камерою [18].

З часом тематична спрямованість дослідження флотації у сфері алмазних порошків розширялась. В сучасних публікаціях, одночасно з більш глибоким вивченням феномену флотації стосовно алмазних порошків [19], вивчають і прикладні її аспекти. Здебільшого це стосується використання флотації як способу покращення якості уже виготовлених кондиційних алмазних порошків не тільки за статичною міцністю, але і за абразивною здатністю та за окремими морфометричними характеристиками. Характерним є використання за такої умови однорідності [20, 21] як методичного апарату оцінювання якості.

Значний науково-прикладний інтерес складає розширення досліджень з вивчення на кількісному рівні як більш широкого кола характеристик і властивостей, які можна коригувати методом флотації, так і класу крупності порошків синтетичного алмазу.

Так, в [20] проводили дослідження морфометричних характеристик і однорідності за ними, технологічних властивостей (кількості ріжучих кромки зерен і середнього значення кутів їхнього загострення, зовнішньої питомої поверхні та числа зерен в одному караті, абразивної здатності) кондиційного за ДСТУ [22] мікропорошку синтетичного алмазу АСМ 40/28 і отриманих флотацією його фракцій. Приведено результати розділення мікропорошків методом флотації, порівняльного дослідження характеристик вихідного порошку та продуктів його розділення, аналізу адекватності середніх значень морфометричних характеристик та оцінки однорідності за системно-критеріальним методом [23]. Показано, що в результаті сортування початкового мікропорошку суттєво підвищилася однорідність за розмірними характеристиками та показником форми зерен отриманих його фракцій. Проводили випробування порошків на їхню абразивну здатність. Більш високу абразивну здатність камерного і пінного продуктів флотації в порівнянні з початковим мікропорошком автори пов'язують із вищою однорідністю зазначених фракцій.

Проведений огляд публікацій показав, що тематична спрямованість відомих публікацій у сфері алмазних порошків фокусується переважно на двох прикладних аспектах флотації. Перший із них стосується збагачення продукту синтезу алмазу, другий – способу покращення якості уже виготовлених кондиційних порошків синтетичного алмазу за окремими їхніми характеристиками, зокрема за статичною міцністю зерен. Активний інтерес до цієї тематики досліджень проявляли у 70–80 роках минулого століття, коли відбувалося становлення і освоєння промислового синтезу алмазу. В пов'язаних із цим публікаціях предметом вивчення переважно було максимальне вилучення з продукту синтезу непрореагованого графіту та інших небажаних побічних продуктів, що утворилися в процесі синтезу. Подібні дослідження мали на меті мінімізацію залишків продуктів хімічної очистки в технологічному процесі видобування алмазу з продукту синтезу та виділення з кондиційних шліфпорошків синтетичного алмазу фракцій з більш високим показником статичної міцності. Крім статичної міцності в публікаціях того часу увагу

привертала і шорсткість зерен. Саме меншою шорсткістю зерен пояснювали у публікаціях того періоду феномен більшої статичної міцності зерен пінної фракції у порівнянні з камерною фракцією флотаційного розділення. Проте автори не зробили кількісної оцінки шорсткості, обмежуючись, очевидно, візуальним спостереженням стану поверхні зерен. На підставі проведеного огляду можна також констатувати, що відомими дослідженнями охоплено два основні і важливі з точки зору абразивної обробки класи алмазних порошків – шліф- і мікропорошки. Проте для мікропорошків перелік (сукупність) досліджуваних характеристик набагато ширший (більший), ніж для шліфпорошків. Тому варто для наукового і прикладного застосування провести подібні за обсягом вивчених характеристик і технологічних властивостей дослідження і для шліфпорошків синтетичного алмазу, зокрема для шліфпорошку АС20 100/80, який досліджували в [19]. Такі дослідження були метою цієї роботи, водночас, додатково до переліку технологічних властивостей, за якими в [19] вивчали вплив флотації, було включено і показники зернового складу.

МАТЕРІАЛИ, ТЕХНІЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ЗАСОБИ

Як показав проведений огляд, у відомих публікаціях, які стосувалися впливу флотації як способу покращення якості шліфпорошків синтетичного алмазу, дослідження проводили за такими характеристиками, як статична міцність зерен, їхня форма та стан поверхні. В даній роботі подібні дослідження були проведені для всього обсягу морфометричних характеристик і формоподібності проекції зерен включно з однорідністю алмазних порошків за цими двома групами характеристик та за їхніми технологічними властивостями, серед яких було розглянуто зовнішню питому поверхню, число зерен в одному караті, характеристики ріжучих кромок. Також розглянуто показники зернового складу шліфпорошків за стандартом ДСТУ [22] і міцність зерен у разі статичного стискання за методикою цього стандарту та із застосуванням приладу ДА-2 [24].

Визначення морфометричних характеристик виконували з допомогою приладу DiaInspect.OSM [25]. Перелік і геометричне тлумачення цих характеристик, їхній поняттєвий сенс є в описово-методичних матеріалах фірми-виробника до приладу DiaInspect.OSM, в оригінальних публікаціях його розробників [26–28] та в публікаціях [21, 29]. Автоматизована ідентифікація геометричної форми проекції зерен та кількісне оцінювання ступеню формоподібності виконували за пошуково-аналоговим методом [30]. Однорідність алмазних шліфпорошків за морфометричними характеристиками визначали системно-критеріальним методом [23], однорідність за формоподібністю проекції зерен – методом, викладеним в [31].

Визначення технологічних властивостей досліджуваних шліфпорошків (зовнішньої питомої поверхні, числа зерен в одному караті, характеристики ріжучих кромок та показників зернового складу шліфпорошків) здійснювали з використанням опосередковано-аналітичних методів [32–35].

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ, ЇХНІЙ АНАЛІЗ ТА ОБГОВОРЕННЯ

DiaInspect-фотографії зерен досліджуваних порошків показано на рис. 1.

За допомогою приладу DiaInspect.OSM визначали наступні морфометричні показники зерен: мінімальний F_{\min} та максимальний F_{\max} діаметри Фере, висоту зерна h , компактність (форм-фактор фактичного зображення) C_r , Фере-подовження F_{el} (аналог коефіцієнта форми за стандартом [22]), коефіцієнт сплюсненості $K_{\text{спл}}$, периметр $P_{\text{п}}$, загальну площу $A_{\text{зар}}$ та шорсткість проекції зерна R_g , питомий периметр $P_{\text{пт}}$. Висоту зерен визначали за допомогою при-

ладу DiaInspect.OSM в мультифокусному режимі його роботи. Числову інформацію із зазначених вище характеристик наведено у табл. 1.

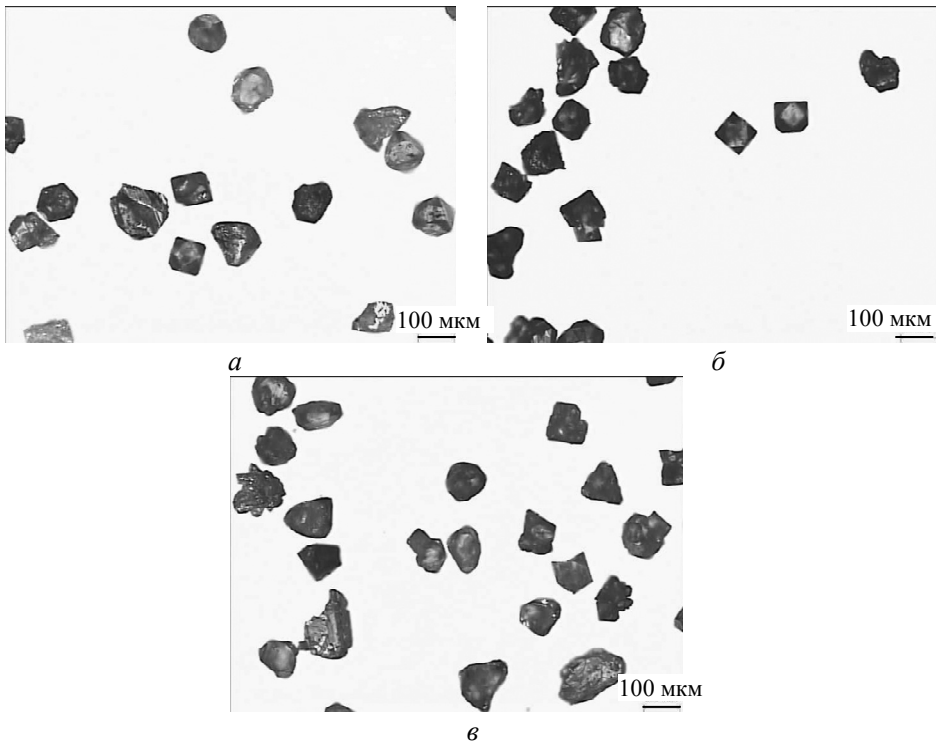


Рис. 1. DiaInspect-фотографії зерен шліфпорошків досліджуваних зразків мікропорошків синтетичного алмазу AC20 100/80: початковий порошок (а), пінний продукт флоатації (б), камерний продукт флоатації (в).

Коефіцієнт сплюсненості зерен, як і їхня висота, є характеристикою зерна як 3D об'єкту, тому його визначають за введеною в [36] залежністю

$$K_{\text{спл}} = 1 - \frac{h^2}{F_{\text{min}} F_{\text{max}}}, \quad (1)$$

що відображає ступінь відхилення фактичної 3D форми зерна від правильної 3D форми. Ідеально правильною формою приймається така його форма, якщо всі три розмірні параметри зерна, які визначають через максимальний і мінімальний діаметри проєкції зерна та його висоту, рівні між собою. Такою фігурою є, наприклад, куля ($F_{\text{min}} = h = F_{\text{max}} = D$, де D – діаметр кулі), для якої вираховане за формулою (1) значення $K_{\text{спл}} = 0$. Для куба з довжиною ребра a , $F_{\text{min}} = h = a$, $F_{\text{max}} = a\sqrt{2}$ обчислення за формулою (1) дають такий результат: $K_{\text{спл}} = 0,2929$. Для порівняння у випадку пластиноподібного паралелепіпеда розміром $a \times 2a \times 0,5a$ ($F_{\text{min}} = a$, $h = 0,5$, $F_{\text{max}} = a\sqrt{5}$) маємо $K_{\text{спл}} = 0,8882$.

На підставі отриманих даних було проведено розрахунок за допомогою розроблених комп'ютерно-аналітичних методів однорідності досліджуваних шліфпорошків за морфометричними характеристиками та за статичною міцністю зерен. Крім того, було встановлено середні значення статичної міцності P , середні значення кутів загострення ϕ , град і кількості n , шт. ріжучих кромок зерен, число зерен N , шт. в одному караті, показник зовнішньої питомої поверхні $F_{\text{пт}}$, м²/кг та середній об'єм V зерна (див. табл. 1). Методом

комп'ютерно-діагностичного сита [35] було визначено показники зернового складу шліфпорошків АС20 100/80 початкового та отриманих флотацією його фракцій (табл. 2).

Таблиця 1. Характеристики шліфпорошку АС20 100/80 і отриманих флотацією його фракцій

Морфометричні та технологічні показники	Шліфпорошок АС20 100/80 і продукти його флотації					
	початковий		пінний		камерний	
	середнє значення	одно-рідність	середнє значення	одно-рідність	середнє значення	одно-рідність
F_{max} , мкм	133,71	0,6927	137,74	0,7197	138,59	0,7211
F_{min} , мкм	102,83	0,7017	104,63	0,7258	105,09	0,7154
h , мкм	86,85	0,7017	90,89	0,7258	91,76	0,7154
C_r	1,2881	0,7202	1,3146	0,6953	1,3108	0,7050
F_{el}	1,3060	0,5816	1,3244	0,5731	1,3249	0,5912
$K_{спл}$	0,4514	0,7049	0,4141	0,7428	0,4219	0,7653
Rg	1,0609	0,7188	1,0569	0,7450	1,0615	0,7317
$A_{зар}$, мкм ²	9874,8	0,6268	10426,8	0,6105	10271,3	0,6002
$P_{п}$, мкм	397,67	0,7169	411,95	0,6787	409,46	0,6795
$P_{пг}$, м/м ²	0,0408	0,7121	0,0404	0,6944	0,0411	0,6868
V , мкм ³	589310	–	629930	–	654840	–
P , Н	17,3777	0,2985	16,0509	0,3359	12,5443	0,2903
N , шт.	96932	–	90713	–	87233	–
$F_{зпп}$	21,05	–	20,96	–	20,61	–
n , шт.	10,5	–	10,1	–	10,2	–
ϕ , град	107,851	–	105,227	–	105,604	–

Таблиця 2. Показники зернового складу шліфпорошків АС20 100/80 початкового та отриманих флотацією його фракцій

Межі розмірного інтервалу зернистості, мкм		Зерновий склад шліфпорошків і продуктів флотації, %		
		початковий	пінний	камерний
30	40	0	0	0
40	50	0,01	0,02	0,01
50	63	0,31	0,50	0,36
63	80	31,22	19,16	17,63
80	100	58,68	65,63	64,34
100	125	9,45	13,57	16,82
125	160	0,33	1,12	0,84
160	200	0	0	0

В табл. 3 представлено числову інформацію для порівняльного аналізу формоподібності проекції зерен шліфпорошку АС20 100/80 і отриманих флотацією його фракцій.

Аналіз отриманих результатів показав, що розмірні характеристики (максимальний і мінімальний діаметри Фере, площа і периметр проекції) пінного та камерного продуктів флотації дещо більші, ніж у початкового порошку. Це

очевидно можна пояснити перерозподілом у процесі флотації зернового складу початкового шліфпорошку АС20 100/80, зумовленого флотаційним його розділення на дві фракції. В камерному продукті виявилися більш крупні зерна, які мають і більший об'єм. Зазначений перерозподіл характеризується наступними змінами. У початковому порошку частка зерен основної фракції (100/80) становила 58,68 % (див. табл. 2). У пінному і камерному продуктах частка зерен цієї фракції збільшилась до 65,53 і 64,34 % відповідно. Протилежна за характером тенденція зміни частки зерен має місце у випадку додаткової до основної фракції (80/63). Показники зернового складу для цієї фракції є такими: 31,22 % для початкового порошку та 19,164 і 17,63 % для пінного і камерного продуктів відповідно (див. табл. 2). Натомість показник крупної фракції (125/100) пінного продукту виявився рівним 14,69 %, камерного продукту – 17,66 %. Для початкового порошку цей показник був рівним 9,78 %. Таким перерозподілом і можна пояснити збільшений середній об'єм зерен пінної та камерної фракцій.

Таблиця 3. Показники диференціальної формоподібності $f_k^{(n)}$, % та відносна похибка ідентифікації $\Delta_k^{(n)}$, % проєкції зерен шліфпорошку АС20 100/80 і отриманих флотацією його фракцій

Базові фігури-аналоги*	Початковий АС20 100/80		Пінний продукт		Камерний продукт	
	$f_k^{(n)}$	$\Delta_k^{(n)}$	$f_k^{(n)}$	$\Delta_k^{(n)}$	$f_k^{(n)}$	$\Delta_k^{(n)}$
1	17,61	15,70	15,08	16,06	15,56	16,26
2	19,56	17,90	18,63	18,39	18,57	18,79
3	1,15	28,14	1,27	29,09	0,88	27,87
4	45,77	8,91	45,75	9,66	46,05	9,52
5	4,20	10,50	4,69	11,07	5,40	11,52
6	0	0	0	0	0	0
7	0,30	29,49	1,65	32,29	1,51	33,64
8	0,10	4,80	0,38	4,55	0,25	5,02
9	4,90	27,58	7,22	28,32	6,90	28,72
10	0	0	0	0	0	0
11	1,90	5,69	2,03	5,49	1,25	5,24
12	4,50	9,22	3,30	9,04	3,64	9,48
$u_{f/z}$	38,16		38,35		38,60	

* 1 – овалоподібні фігури (коло + еліпс); 2 – прямокутник; 3 – ромб; 4 – трапеція; 5 – квадрат; 6 – правильний п'ятикутник; 7 – правильний шестикутник; 8 – правильний восьмикутник; 9 – трикутник; 10 – паралелограм; 11 – напівправильний дванадцятикутник; 12 – напівправильний восьмикутник.

В [16] відмічали, що статична міцність зерен пінного продукту флотації шліфпорошку зернистістю 400/315 на 33–105 % більша від статичної міцності зерен камерного продукту. Феномен такого ефекту пояснюється більш гладкими гранями зерен пінного продукту флотації. За даними табл. 1 факт меншої шорсткості зерен пінного продукту можна підтвердити і кількісно. У сукупності новітніх морфометричних характеристик алмазних порошоків відповідальними за ступінь шорсткості зерен є такі характеристики як шорст-

кість (відношення фактичного периметра проекції зерна до периметра опуклої його проекції) та питомий периметр (відношення фактичного периметра зерна до площі його проекції). Порівняльний аналіз даних табл. 1 і візуально-го спостереження (див. рис. 1) показує, що показники обох цих характеристик для камерного продукту більші, ніж для пінного продукту (1,0569 та 0,0404 проти 1,0615 та 0,0411 відповідно). Це і є доказом того, що зерна пінного продукту флотації мають більш гладку поверхню. Статична міцність зерен пінного продукту флотації шліфпорошку зернистістю 100/80 також була більшою на 28 % від статичної міцності зерен камерного продукту (див. табл. 1). Крім того, кращу якість пінного продукту у порівнянні з камерним засвідчує і більший в 1,16 рази показник однорідності за статичною міцністю. Не в останню чергу цьому сприяє менший варіаційний розмах значень статичної міцності зерен пінної фракції (див. рис. 2).

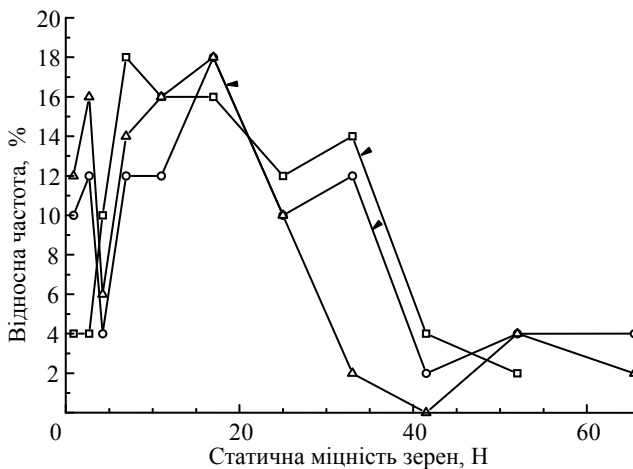


Рис. 2. Криві диференціального розподілу статичної міцності за інтервалами її значень для зерен шліфпорошку АС20 100/80 початкового (о) та отриманих флотацією його пінної (□) і камерної (Δ) фракцій.

Якщо порівняти за технологічними властивостями початковий порошок з кожним із продуктів його флотації, то різниця між показниками властивостей початкового порошку і обох його фракцій значно більша, ніж пінного і камерного продуктів між собою. Показники статичної міцності та характеристик ріжучих кромek для початкового шліфпорошку дещо більші, ніж пінної і камерної фракцій. Такий же характер співвідношення зберігається і для числа зерен в одному караті та зовнішньої питомої поверхні. Водночас за показниками всіх технологічних властивостей виділені флотацією фракції початкового порошку дуже близькі між собою з незначною перевагою пінної фракції. Ця перевага може бути сприятливою для більшої ефективності виготовленого із цих фракцій абразивного інструменту.

Що стосується форми проекції зерен пінного і камерного продуктів флотації, то вони мають близькі за значенням показники диференціальної формоподібності проекції зерен (див. табл. 2). Проте пінна фракція має дещо більші показники формоподібності для проекцій у формі трикутника, а також правильного шестикутника та напівправильних восьми- і дванадцятикутника. У цьому контексті суттєвим є більша частка зазначених вище трьох останніх форм проекції у складі пінної фракції. Саме така форма проекції характерна для шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності [37]. Цей факт

може слугувати ще одним аргументом для обґрунтування того, чому зерна пінної фракції мають більшу міцність у порівнянні з камерною фракцією.

На підставі такого порівняльного аналізу пінної і камерної фракції можна зробити і ще один важливий висновок, який стосується якості розділення початкового порошку. Якщо взяти сумарну частку зерен із проекцією зазначених вище трьох форм, то для пінної фракції вона складає 6,98 %, а камерної фракції – 6,4 %. Значення є близькими, але тут важливо те, що в камерному продукті все ще залишаються зерна підвищеної міцності, тобто зерна з проекцією у формі, близькій до правильного шестикутника та напівправильних восьми- і дванадцятикутника, що підтверджується і візуальним порівнянням знімків зерен початкового порошку і продуктів його флотації (див. рис. 1). Це дозволяє зробити висновок про доцільність подальшого повторного або багатоступеневого флотаційного розділення на рівні продуктів розділення, зокрема камерної його фракції. Це дозволить підвищити загальний вихід пінної фракції, зерна якої мають вищу статичну міцність, і сприятиме підвищенню якості флотаційного розділення.

Крім показників диференціальної формоподібності проекції зерен ще одним показником якості флотаційного розділення здатна слугувати однорідність порошоків за цією морфометричною характеристикою. Однорідність початкового порошку становила 38,16 %, пінного і камерного продуктів його розділення – 39,35 % (збільшення в 1,031 рази) та 39,60 % (збільшення в 1,038 рази) відповідно (див. табл. 3). Як бачимо, однорідність продуктів розділення дещо більша, ніж однорідність початкового порошку, що очікувано і зрозуміло. Чим більші значення цих співвідношень, тим кращою можна вважати якість флотаційного розділення. Більший показник однорідності пінного продукту у порівнянні з камерним вказує і на кращу його якість. Підтвердженням тому є менший показник сплюсненості зерен пінного продукту – 0,4141, у порівнянні з камерним продуктом – 0,4219 (див. табл. 1). Чим ближчим до нуля є значення цього показника, тим більш близькою до правильної є форма зерен.

Ще однією додатковою ознакою якості флотаційного розділення може бути прийнято співвідношення між показниками однорідності за морфометричними характеристиками початкового порошку та пінної і камерної фракції його флотаційного розділення. Аналіз даних табл. 1 показує, що за більшістю морфометричних характеристик пінна і камерна фракції більш однорідні у порівнянні з початковим порошком. Це також може бути підтвердженням того, що флотаційне розділення покращує якість початкових порошоків. Водночас обидва ці продукти розділення за морфометричними характеристиками досить близькі між собою, в чому може бути прихований резерв подальшого покращення якості отримуваних флотаційним розділенням шліфпорошків.

ВИСНОВКИ

Вперше на кількісному рівні підтверджено, що флотаційне розділення є ефективним засобом покращення якості за морфометричними характеристиками й технологічними властивостями вже виготовлених кондиційних шліфпорошків синтетичного алмазу.

Наявні і створені в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України науково-методичні засоби дозволяють отримувати достовірну інформацію для прийняття рішення щодо якості флотаційного розділення та вирішення питання відносно доцільності чи недоцільності подальшого повторного чи багатоступеневого застосування флотаційного розділення.

G. A. Petasyuk, H. D. Ilnytska, G. A. Bazalii, N. O. Oleinyk,
Yu. V. Syrota

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Flotation separation as a method of improving the uniformity
of synthetic diamond powders according to their morphometric
characteristics, grain shape and grain composition

A review of publications on the application of flotation separation in the field of synthetic diamond powders was performed. It has been established that the applied orientation of known publications in this field of materials science focuses mainly on the enrichment of the product of diamond synthesis and on improving the quality of already produced conditioned powders of synthetic diamond according to their individual characteristics, in particular, the static strength of the grains. The results of a comparative quantitative study of grain projection roughness, other morphometric characteristics and technological properties of foam and chamber products of flotation separation of conditioned abrasive powder AC20 100/80 are presented. For the first time, on a quantitative level, it was established that powders of the foam fraction have lower roughness indicators of grain projection and their specific perimeter compared to the chamber fraction. It is these two morphometric characteristics that are indirectly responsible for the development of the grain surface, that is, for their roughness. It has been demonstrated that the available scientific and methodical means of indirect analytical diagnosis of morphometric characteristics and technological properties of diamond grinding powders, available according to well-known publications, allow obtaining reliable information for making a decision about the quality of flotation separation and the feasibility of repeated or multi-stage application of flotation separation.

Keywords: diamond grinding powder, flotation, separation, morphometric characteristics, technological properties, uniformity.

1. Глембоцкий В.А., Классен В.И. Флотационные методы обогащения. Москва: Недра. 1981. 304 с.
2. Kawatra, S.K., Eisele T.C. Coal Desulfurization: High-Efficiency Preparation Methods, New York: Taylor and Francis, 2001. 360 p.
3. Смирнов В.О., Білецький В.С. Флотацийні методи збагачення корисних копалин. Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. 468 с.
4. Shireesha M., Rama N., Harini P., Mounika A., Dinesh K. Recovery of coal by froth flotation equipment. *Int. J. Sci. Eng. Manag.* 2017. Vol. 2, iss. 3. P. 75–78.
5. Das B., Mohanty J.K. Mineralogical characterization and beneficiation studies of pyrophyllite from Orissa, India. *J. Miner. Mater. Char. Eng.* 2009. Vol. 8, no. 4. P. 329–338.
6. Anashkina N.E., Bunin I.Z., Khachatryan G.K. Influence of high-voltage electromagnetic pulses on technological properties of diamond crystals and kimberlite rock-forming minerals. *J. Polish Mineral Eng. Soc. Inżynieria Mineralna.* 2019. July–December. P. 133–138.
7. Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин: навчальний посібник. Київ: Ліра-К, 2020. 634 с.
8. Bourgeois J.C., Walsh M.E., Gagnon G.A. Treatment of drinking water residuals: comparing sedimentation and dissolved air flotation performance with optimal cation ratio. *Water Res.* Vol. 38, iss. 5. 2004. P. 1173–1182.
9. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Бунин И.Ж., Миненко В.Г., Коваленко Е.Г., Подкаменный Ю.А. Комбинированные процессы извлечения алмазов из метасоматически измененных кимберлитовых пород. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* 2017. № 2. С. 1–12.
10. Карнаузов Н.М., Гатилова Е.Г., Богатырева Г.П. Адсорбция аполярных собирателей на синтетическом алмазе и графите. *Синтетические алмазы.* 1969. Вып. 5. С. 14–18.
11. Богатырева Г.П. Определение режимов обратной флотации синтетических алмазов методом Бокса-Уилсона. Сверхтвердые материалы для промышленности. Киев: ИСМ АН УССР, 1973. С. 36–38.
12. Богатырева Г.П. Исследование флотационных свойств синтетических алмазов и разработка процесса их сортировки по прочности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 1976. 22 с.

13. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. Москва: Наука, 1967. 340 с.
14. Stachurski J., Małysa E., Ociepa Z. Metoda grawitacyjno-flotacyjna oddzielania grafitu od diamentow syntetycznych. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*. 1992. Vol. 25. P. 47–58.
15. Małysa E., Ociepa Z., Stachurski J. Studies of floatability of graphite and synthetic diamond. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*. 1999. Vol. 15, no. 1. 149–165.
16. Богатырева Г.П. Сортировка алмазов по прочности флотацией. *Синтетические алмазы*. 1972. Вып. 3. С. 23–25.
17. Прихна А. И., Богатырева Г.П., Невструев Г.Ф., Сохина Л.А. Пути совершенствования технологии изготовления алмазного инструмента на базе механизации и автоматизации производственных процессов: тезисы докл. *Республ. науч.-техн. совещ.* Киев, 1976. С. 62–63.
18. Новиков Н.В., Никитин Ю.И., Богатырева Г.П. Технологии и методы сортировки шлиф-порошков из синтетических алмазов по форме и шероховатости поверхности зерен. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр.* Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. Вып. 11. С. 141–150.
19. Олійник Н.О., Ільницька Г.Д., Базалій Г.А. Зміна фізико-механічних характеристик шліфпорошку алмазу марки АС20 зернистості 100/80 під впливом флотаційного розділення. *Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали 23-го Міжнар. наук.-техн. семінару*, 15–16 бер. 2023 р. Київ: АТМ України, 2023. С. 81–83.
20. Bogatyreva G.P., Petasyuk G.A., Bazalii G.A., Shamraeva V.S. On morphometric uniformity of diamond micron powders. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, no. 2. P. 126–134.
21. Новиков Н.В., Невструев Г.Ф., Ільницька Г.Д., Куш В.И., Колодницький В.Н. Оценка качества порошков сверхтвердых материалов. Часть 2. Практическое применение нового метода оценки характеристик качества. *Сверхтв. материалы*. 2006. № 6. С. 58–67.
22. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Чинний від 01.01.96.
23. Петасюк Г.А. Системно-критеріальний метод кількісної оцінки однорідності надтвердих дисперсних матеріалів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2003. № 5. С. 101–105.
24. Лошак М., Александрова Л., Косенчук Т. Міцність кристалів алмазу за статичного навантаження. *Метрологія та прилади*. 2013. № 2 (40). С. 11–15.
25. Dialnspect.OSM. Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis 2010. Operation guide Version 1.2.8. Отримано з <https://vdiament.de/languages/diainspect-osm.html>
26. Vollstaedt H., List E. Controlling the stability of superabrasive powders. *Proc. 4th Zhengzhou Int. Superhard Materials and Related Products Conf. (4th ZISC)*. Zhengzhou, P.R. China, 2003.
27. List E., Frenzel J., Vollstädt R. Ein neues System zur Ermittlung der Einzelkornfestigkeit von Schleifkörnungen. *Industrie Diamanten Rundschau*. 2006. 40 II. P. 6–21.
28. List E., Frenzel J., Vollstädt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders. *Ind. Diamond Rev.* 2006. Vol. 66, no. 1. P. 42–47.
29. Петасюк Г.А. Діагностика морфометричних характеристик порошків надтвердих матеріалів засобами цифрової обробки зображень. *Відбір і обробка інформації*. 2009. Вип. 30 (106). С. 138–145.
30. Petasyuk G.A. A system-analogue method of identification of geometric shape of the abrasive grain projection. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 4. P. 277–287.
31. Petasyuk G.A., Bochechka O.O. Generalized index of the shape-similarity of the diamond powders grains projection. *Powder Technol.* 2019. Vol. 353. P. 125–131.
32. Petasyuk G.A., Bogatyreva G.P. Extrapolation_analytical method for determination of outer specific surface of powders of superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2007. Vol. 30, no. 6. P. 375–383.
33. Petasyuk G.A., Sirota Yu.V. Analytical determination of a number of particles per carat for diamond powders on the basis of an extrapolation-affine 3D grain model. *J. Superhard Mater.* 2012. Vol. 34, no. 3. P. 200–208.
34. Petasyuk G.A. Interpretative and applied aspects of some morphological characteristics of superabrasive powders. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, no. 2. P. 128–139.

35. Novikov N.V., Nikitin Y.I., Petasyuk G.A. Computer-based diagnostic sieve for identification of grit size and grit size distribution in microscopic samples of diamond grits. *J. Superhard Mater.* 2003. Vol. 25, no. 3. P. 68–78.
36. Poltoratskiy V.G., Petasyuk G.A., Safonova M.N., Bochechka A.A., Tkach V.N., Shamraeva V.S. A novel composite abrasive material of unmarketable natural diamond powder. *J. Superhard Mater.* 2014. Vol. 36, no. 2. P. 136–144.
37. Petasyuk G.A. New fraction-averaging approach to the diagnostics of the technological properties of high-strength synthetic diamond powders. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 6. P. 453–456.

Надійшла до редакції 07.07.23

Після доопрацювання 14.09.23

Прийнята до опублікування 18.09.23