

of operational characteristics of diamond powders and composite materials based on them]. Novosibirsk: Izdatelstvo Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi Akademii nauk [in Russian].

11. Kivilis, S. S. (1980). *Plotnometry [Density meters]*. Moskva: Energiia [in Russian].

УДК 549.211.002.61:546.26.162

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-156-165

Г.А. Петасюк, д-р техн. наук; **Г.Д. Ільницька**, **Н.О. Олійник**, кандидати технічних наук¹; **О.М. Сизоненко**, д-р техн. наук²; **Г.А. Базалій**, **О.У. Петасюк**¹

¹*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська 2, 04074, м. Київ, e-mail: petasyuk@ukr.net*

²*Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, проспект Богоявленський, 43 а,
Миколаїв, Україна, 54018, e-mail: sizonenko43@rambler.ru*

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ОДНОРІДНОСТІ АЛМАЗНИХ ПОРОШКІВ, ОТРИМУВАНИХ ФЛОТАЦІЙНИМ РОЗДІЛЕННЯМ ПОЧАТКОВОГО ЇХ ЗРАЗКА

Проведено огляд публікацій із застосування флотаційної сепарації в сфері синтетичних алмазних порошків. Встановлено, що прикладна матеріалознавча спрямованість відомих публікацій зосереджена на збагаченні продукту синтезу алмазу та на підвищенні якості синтетичних алмазних порошків. Мета подібних досліджень полягала у виділенні із стандартних порошків синтетичного алмазу фракцій з більшою статичною міцністю зерен або абразивністю. Окрім статичної міцності та абразивності, у публікаціях також акцентувалася увага на шорсткості зерна. Саме більша статична міцність і абразивність зерен пінної фракції в порівнянні з камерною фракцією флотаційної сепарації пояснюється меншою шорсткістю зерен пінної фракції. Проте автори не дають кількісної оцінки шорсткості. У пропонуваній роботі наведені результати порівняльного кількісного дослідження шорсткості проекції зерен та інших морфометричних характеристик пінного і камерного продуктів флотаційної сепарації стандартного мікропорошку АСМ 40/28. Також проаналізовано технологічні властивості цих двох фракцій, виділених флотацією, їх однорідність за морфометричними характеристиками. Вперше на кількісному рівні встановлено, що порошки пінної фракції мають менший показник питомого периметру порівняно з камерною фракцією. Саме ця морфометрична характеристика опосередковано відповідає за шорсткість поверхні зерен. Встановлено, що порошок пінної фракції більш однорідний за морфометричними характеристиками. Стверджується, що однорідність алмазних порошків може слугувати критерієм оцінювання якості флотаційного розділення порошків синтетичного алмазу. В подальшому подібні дослідження слід продовжити в напрямку створення науково-методичних основ апріорного оцінювання доцільності проведення повторного чи багатоступеневого флотаційного розділення.

Ключові слова: алмазні порошки, флотація, морфометричні характеристики, технологічні властивості, однорідність

Вступ

Флотація (франц. flottation, від flotter – плавати) – спосіб розділення сумішей твердих дрібних частинок, що належать різним речовинам, а також виділення крапель дисперсної фази з емульсій, заснований на їх різній змочуваності і здатності накопичуватися на поверхні розділу фаз. Процес розділення дрібних твердих часток (головним чином мінералів) заснований на відмінності їх в змочуваності водою. Теоретичні основи флотації викладені в роботах [1–3]. При флотації бульбашки газу або краплі масла прилипають до погано

змочуваних водою часток і піднімають їх до поверхні [1]. Краще всього флотацією розділяються зерна розміром 0,1–0,04 мм [1, 3]. Дрібніші частки розділяються гірше, а частки дрібніше 5 мкм погіршують флотацію крупніших часток.

Флотація традиційно використовується 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 алмазоносних кімберлітів; розділення солей; очищення стічних вод, зокрема для виділення крапель масел і нафтопродуктів. Деякі застосування флотації з наведеного переліку, які одночасно становлять і предмет наукових досліджень, можна знайти, наприклад, у публікаціях [4–9].

Що стосується порошоків синтетичного алмазу, то тут флотація застосовується головним чином як спосіб збагачення продукту синтезу [10–13] та покращення якості уже виготовлених кондиційних алмазних шліф- і мікропорошків за окремими їх технологічними властивостями, зокрема за статичною міцністю зерен при їх стисканні [14] та за абразивною здатністю [15]. Обґрунтування можливості і доцільності та розробка науково-методичних основ застосування флотації у сфері порошоків синтетичного алмазу було покладено роботами д.т.н. Богатирьової Г.П. [10, 11, 14, 15–17].

Одним із перших (якщо взагалі не першим) науковим дослідженням, присвяченим тематиці застосування флотації до кондиційних порошоків синтетичного алмазу як способу отримання більш якісних за певними характеристиками їх фракцій, була робота д.т.н. Богатирьової Г.П. [14]. В ній вивчалось застосування флотації до сортування шліфпорошків синтетичного алмазу за міцністю їх зерен. Проведеними дослідженнями встановлено, що зерна з плоскими гладкими гранями значно міцніші за зерна такої ж форми, але з шорсткими гранями. Зерна шліфпорошка синтетичного алмазу з гладкою поверхнею, покриті плівкою реагента-збирача, разом із бульбашками повітря виносилися на поверхню (пінний продукт). Зерна алмазів з шорсткою поверхнею, на яких закріпився реагент-подавлювач, добре змочувалися водою і залишалися в камері флотомашини (камерний продукт). Результати проведених досліджень показали, що міцність камерного продукту на 25–35% нижча за міцність пінного, який містить до 80% зерен з гладкою поверхнею граней. В [18] зазначається, що метод флотації забезпечує сортування алмазних порошоків за рівнем шорсткості зерен. Найбільш шорсткі (найменш міцні) алмазні зерна, що характеризуються більш розвиненою поверхнею, доцільно застосовувати в інструменті на пористій зв'язці. Працездатність інструменту на такій зв'язці в 1,5 рази вища за працездатність інструменту, виготовленого з несорттованих алмазів.

Значний науково-прикладний інтерес складає розширення досліджень з вивчення на кількісному рівні більш широкого кола характеристик і властивостей, які можуть коригуватись методом флотації. Так, в роботі [15] проводилось дослідження морфометричних характеристик і однорідності за ними, технологічних властивостей (зовнішня питома поверхня та абразивна здатність) кондиційного за [19] мікропорошка синтетичного алмазу АСМ 40/28 і отриманих флотацією його фракцій. Відмічається, що процес флотаційного розділення ґрунтується на відмінностях енергетичного стану поверхні частинок алмазу. При цьому частинки алмазу з більш гладкою (менш енергетичною) поверхнею адсорбують аполярні димери жирної кислоти за рахунок сил Ван-дер-Ваальса, а частинки алмазу з розвиненою дефектною поверхнею (більш енергетичною) – полярні за рахунок „водневого зв'язку”. Внаслідок цього, більш гладкі частки потрапляють у пінний продукт флотаційного розділення, а шорсткі – у камерний. Присутність солі Мора збільшує селективність дії жирної кислоти за рахунок адсорбції іонів заліза на шорсткій поверхні частинок алмазу, що сприяє адсорбції полярних димерів і іонів жирної кислоти. Наводяться результати розділення мікропорошків методом флотації, дослідження характеристик вихідного порошку та продуктів його розділення, аналізу адекватності середніх значень морфометричних характеристик, яка оцінювалась однорідністю за системно-критеріальним методом [20]. Показано, що в

результаті сортування початкового мікропорошку суттєво підвищилася однорідність за розмірними характеристиками пінної і камерної фракцій флотаційного його розділення. Проводились випробування порошоків на їх абразивну здатність. Більш висока абразивна здатність камерного і пінного продуктів флотації в порівнянні із початковим мікропорошком пов'язується авторами із вищою однорідністю зазначених фракцій. Доведено доцільність використання флотаційного методу розділення як інструменту підвищення однорідності алмазних мікропорошків за морфометричними характеристиками.

Проведений огляд публікацій показав, що тематична спрямованість відомих публікацій у сфері алмазних порошоків фокусується головним чином на двох зазначених вище прикладних аспектах флотації. Активний інтерес до цієї тематики досліджень проявлявся у 70–80 роках минулого століття, коли відбувалося становлення і освоєння промислового синтезу алмазу. Подібні дослідження, як уже відзначалося, мали на меті мінімізацію частки хімічної очистки в технологічному процесі видобування алмазу із продукту синтезу та виділення із кондиційних шліфпорошків синтетичного алмазу фракцій із більш високим показником статичної міцності. Крім статичної міцності, в публікаціях того часу увагу привертала і шорсткість зерен. Саме меншою шорсткістю зерен пояснюється у публікаціях того періоду феномен більшої статичної міцності зерен пінної фракції у порівнянні із камерною фракцією флотаційного розділення. Проте автори не дають кількісної оцінки шорсткості, обмежуючись, очевидно, візуальним спостереженням стану поверхні зерен.

Найбільш близьке до повного за врахованими морфометричними характеристиками та технологічними властивостями дослідження флотаційного розділення було виконано для мікропорошка АСМ 40/28 [15]. Але щодо обсягу задіяних морфометричних характеристик та технологічних властивостей із загального їх переліку це дослідження все ж таки не було повним. Тому складає великий науковий і прикладний інтерес доповнення виконаних в роботі [15] досліджень результатами і для інших, відмінних від зовнішньої питомої поверхні, технологічних властивостей (характеристик різальних кромки, числа зерен в одному караті). Саме це і є метою цієї роботи. При цьому додатково до переліку технологічних властивостей, за якими в роботі [15] проводилися дослідження на них впливу флотації, буде включено і показники зернового складу.

Матеріали, технічні та методичні засоби

Дослідження проводились на стандартному за [19] алмазному мікропорошку АСМ 40/28. Флотаційне розділення здійснювали в розчині солі Мора з використанням як збирача і піноутворювача жирної кислоти ряду C_7-C_9 [17]. Випробування на абразивну здатність (А) виконували за методикою стандарту [19] ДСТУ 3292.

Морфометричні характеристики діагностували за допомогою приладу *DiaInspect.OSM* фірми *VOLLSTADT DIMANT GmbH* [21]. Цей прилад дозволяє в автоматичному режимі встановлювати значення (діагностувати) більше 20 характеристик абразивних порошоків за результатами вимірювання проби в кількості до 1999 зерен включно. При виконанні цієї роботи діагностувалися такі характеристики: площа загальна і площа світлої частини проекції зерна, периметри фактичного і опуклого його контурів, максимальний (F_{max}) і мінімальний (F_{min}), діаметри Feret, висота зерен (H), форм-фактори фактичного (C_r) та опуклого зображення проекції зерна, Feret-подовження (F_{el} , аналог коефіцієнта форми за стандартом [19]), шорсткість проекції зерен (R_g). Крім того, шляхом використання результатів *DiaInspect*-діагностування визначали інші морфометричні характеристики, зокрема периметр фактичної (P) та опуклої (P_c) проекції зерна, площа проекції (A_r) зерна, питомий периметр ($P_{пт}$), середній розмір (D_m) зерен та їх еквівалентний діаметр (D_e), коефіцієнт сплюсненості зерен ($K_{спл}$), відносна частка світлої частини проекції зерна в загальній її площі (*relAreal*). Повний перелік і геометричне тлумачення цих характеристик, їх поняттєвий сенс подаються в описово-методичних матеріалах фірми-виробника до приладу *DiaInspect.OSM*, в оригінальних публікаціях його розробників [22–24] та в публікаціях авторів цієї статті, наприклад, в [15, 25].

Висота зерен визначалась за допомогою приладу DialInspect.OSM в мультифокусному режимі його роботи. Числова інформація із зазначених вище характеристик подається у табл. 1. Перераховані вище характеристики описують величину зерен (F_{max} , F_{min} , D_m , D_e , H), їх форму (C_r , F_{el} , $K_{спл}$) та топографію поверхні ($P_{пт}$, Rg).

Коефіцієнт сплюсненості зерен, як і їх висота, є безрозмірною характеристикою зерна як 3D об'єкту і визначається за введеною в [26] залежністю

$$K_{спл} = 1 - \left[\frac{H^2}{(F_{min} F_{max})} \right]. \quad (1)$$

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

Однорідність алмазних мікропорошків за морфометричними характеристиками визначалась системно-критеріальним методом [20], результати представлені у табл. 1.

Таблиця 1. Середні значення (С. з.) морфометричних характеристик і показники однорідності (одн.) за ними, значення показників технологічних властивостей стандартного мікропорошка АСМ 40/28 та отриманих флотацією його фракцій

Морфометричні характеристики	Початковий		Пінний продукт		Камерний продукт	
	С. з.	одн.	С. з.	одн.	С. з.	одн.
F_{max} , МКМ	30,07	0,4987	39,96	0,6535	39,48	0,6085
F_{min} , МКМ	21,16	0,5118	28,51	0,6879	27,96	0,6665
C_r	1,3329	0,6497	1,3339	0,5875	1,3442	0,6414
H/F_{min}	15,87	0,5118	21,38	0,6879	20,97	0,6665
F_{el}	1,4426	0,4506	1,4164	0,3623	1,4322	0,5047
$K_{спл}$	0,6014	0,7601	0,5949	0,7670	0,5990	0,7579
Rg	1,0604	0,7126	1,0574	0,7610	1,0586	0,7367
D_m , МКМ	25,62	0,5520	34,23	0,7365	33,72	0,6976
D_e , МКМ	23,99	0,5537	31,96	0,7405	31,39	0,7069
A_t , МКМ ²	567,29	0,3258	822,26	0,5870	815,96	0,5380
P , МКМ	87,20	0,5058	115,98	0,6644	114,35	0,6515
P_c , МКМ	82,29	0,5140	109,59	0,6735	107,94	0,6300
$P_{пт}$, 1/М	0,3088	0,4499	0,1510	0,4481	0,1687	0,4482
$relAreal$	0,4269	0,23257	0,1997	0,16381	0,2409	0,4442
N , шт.	7178300		4762500		4827500	
n , шт.	9,35		8,96		8,82	
ϕ , град.	102,64		101,90		100,88	

Визначення технологічних властивостей досліджуваних мікропорошків (числа зерен в одному караті (N), кількості (n) різальних кромки і середнього значення кутів їх загострення (ϕ) та показників зернового складу) здійснювалось з використанням опосередковано-аналітичних методів [27–29].

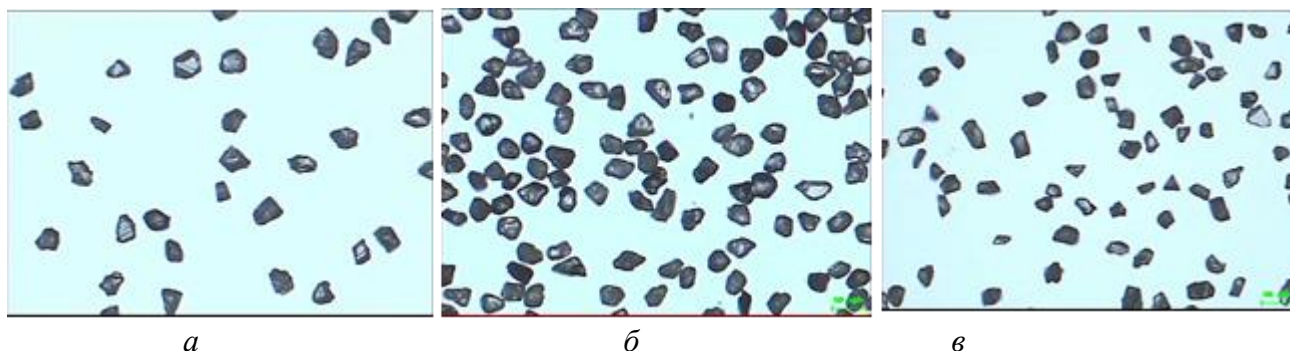
Отримані результати, їх аналіз та обговорення

Результати розрахунків подаються у таблицях 1 та 2.

Таблиця 2. Показники зернового складу мікропорошку АСМ 40/28 початкового та отриманих флотацією його фракцій

№ розмірного інтервалу	Межі розмірного інтервалу, мкм		Середина розмірного інтервалу, мкм	Зерновий склад мікропорошків початкового та продуктів його флотації, %		
	ліва	права		початковий	пінний	камерний
1	0,00	1,00	0,50	0,00	0,00	0,00
2	1,00	2,00	1,50	0,00	0,00	0,00
3	2,00	3,00	2,50	0,00	0,00	0,00
4	3,00	5,00	4,00	0,00	0,00	0,00
5	5,00	7,00	6,00	16,45	0,40	1,75
6	7,00	10,00	8,50	10,07	0,40	1,65
7	10,00	14,00	12,00	4,00	0,20	1,55
8	14,00	20,00	17,00	2,83	0,20	1,15
9	20,00	28,00	24,00	7,74	8,85	7,55
10	28,00	40,00	34,00	48,58	76,29	67,73
11	40,00	60,00	50,00	10,32	13,66	18,61
12	60,00	80,00	70,00	0,00	0,00	0,00

В результаті проведення флотаційного розділення стандартного алмазного мікропорошку АСМ 40/28 у пінний продукт виділено 72,5% початкового порошку, у камерний – 27,5%. DiaInspect-фотографії зерен досліджуваних порошоків показані на рисунку.



DiaInspect-фотографії зерен досліджуваних зразків мікропорошків синтетичного алмазу АСМ 40/28 (а – початковий порошок; б – пінний продукт флотації; в – камерний продукт флотації)

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки. Розмірні характеристики (максимальний і мінімальний діаметри Фере, висота зерен, площа і периметр проекції) пінного та камерного продуктів флотації дещо більші, ніж у початкового порошку. Це очевидно можна пояснити перерозподілом зернового складу початкового мікропорошку АСМ 40/28, зумовленим флотаційним його розділенням на дві фракції. Зазначений перерозподіл характеризується наступними змінами. У початковому порошку частка зерен

основної фракції (40/28) становила 48,58% за їх кількістю (табл. 2). У пінному і камерному продуктах частка зерен цієї фракції збільшилась до 76,29% та 67,73% відповідно.

Протилежна за характером тенденція зміни частки зерен має місце у випадку додаткової до основної фракції (28/20). Показники зернового складу для цієї фракції є такими: 7,74% для початкового порошку та 8,85% і 7,55% для пінного і камерного продуктів відповідно (табл. 2). Натомість показник крупної фракції (60/40) пінного продукту виявився рівним 13,66%, камерного продукту – 18,61%. У випадку початкового порошку цей показник був рівним 10,32%. Саме таким перерозподілом можна пояснити збільшені розмірні характеристики зерен пінної та камерної фракцій.

В роботі [16] відмічалось також, що грані зерен пінного продукту флотації є більш гладкими, тобто менш шорсткими. В наших дослідженнях на підставі даних табл. 1 факт меншої шорсткості зерен пінного продукту можна підтвердити і на кількісному рівні. У сукупності новітніх морфометричних характеристик алмазних порошків відповідальними за ступінь шорсткості проекції зерен є такі характеристики як шорсткість (відношення фактичного периметру проекції зерна до периметру опуклої його проекції) та питомий периметр (відношення фактичного периметру зерна до площі його проекції). Порівняльний аналіз даних табл. 1 і візуальне порівняння (див. рисунок) показують, що показники обох цих характеристик для камерного продукту дещо більші, ніж у випадку пінного продукту (1,0586 та 0,1687 проти 1,0574 та 0,151 відповідно). Це і є доказом того, що зерна пінного продукту флотації мають більш гладку поверхню. Крім того, кращу якість пінного продукту у порівнянні із камерним засвідчують і переважно більші показники однорідності за морфометричними характеристиками.

Якщо порівняти за розглядуваними технологічними властивостями початковий порошок з кожним із продуктів його флотації, то різниця між показниками цих властивостей початкового порошку і обох його фракцій значно більша, ніж у випадку окремого порівняння пінного і камерного продуктів між собою. Виняток складає лише число кутів загострення різальних кромek, показники яких практично рівні для всіх трьох фракцій мікропорошку. Середнє значення кутів загострення різальних кромek зерен для початкового мікропорошку дещо більше, ніж для отриманих пінної і камерної фракцій. Такий же характер співвідношення, але більш виражений, зберігається і у випадку числа зерен в одному караті. 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 мікропорошків цих фракцій абразивного інструменту.

І ще однією додатковою ознакою якості флотаційного розділення може бути прийнято співвідношення між показниками однорідності за морфометричними характеристиками початкового порошку та пінної і камерної фракцій його флотаційного розділення. Аналіз даних табл. 1 показує, що за більшістю морфометричних характеристик пінна і камерна фракції більш однорідні у порівнянні із початковим порошком. Це може бути підтвердженням того, що флотаційне розділення покращує якість початкових порошків. В той же час обидва ці продукти розділення за морфометричними характеристиками в нашому випадку досить близькі між собою, в чому може бути захований резерв подальшого покращення якості отримуваних флотаційним розділенням мікропорошків (повторне та багатоступеневе флотаційне розділення).

Висновки

1. Вперше на кількісному рівні підтверджено, що флотаційне розділення є ефективним засобом покращення якості за морфометричними характеристиками і технологічними властивостями уже виготовлених кондиційних мікропорошків синтетичного алмазу.

2. Наявні і створені в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ науково-методичні засоби дозволяють отримувати достовірну інформацію для прийняття рішення щодо якості алмазних порошоків, отримуваних флотаційним розділенням, за їхніми морфометричними характеристиками та технологічними їх властивостями.

3. В подальшому подібні дослідження слід продовжити в напрямку створення науково-методичних основ апіорного оцінювання доцільності проведення повторного чи багатоступеневого флотаційного розділення.

G. Petasyuk, H. Pnytska, N. Oliinyk¹, O. Syzonenko², G. Bazalii, O. Petasyuk¹

¹*V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine*

²*Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine*

COMPARATIVE STUDY OF THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES AND UNIFORMITY OF DIAMOND POWDER OBTAINED BY FLOTATION SEPARATION OF THEIR INITIAL SAMPLE

A review of publications on the application of flotation separation in the field of synthetic diamond powders was conducted. It has been established that the applied materials science orientation of known publications is focused on the enrichment of the diamond synthesis product and on improving the quality of synthetic diamond powders. The purpose of such research was to isolate fractions with greater static grain strength or abrasiveness from standard synthetic diamond powders. In addition to static strength and abrasiveness, the publications also focused on grain roughness. The greater static strength and abrasiveness of the grains of the foam fraction in comparison with the chamber fraction of flotation separation is explained by the lower roughness of the grains of the foam fraction. However, the authors do not provide a quantitative estimate of roughness. The proposed work presents the results of a comparative quantitative study of grain projection roughness and other morphometric characteristics of foam and chamber products of flotation separation of standard micropowder ASM 40/28. The technological properties of these two fractions separated by flotation, their homogeneity according to morphometric characteristics were also analyzed. For the first time, it was established on a quantitative level that powders of the foam fraction have a lower specific perimeter compared to the chamber fraction. It is this morphometric characteristic that is indirectly responsible for the roughness of the grain surface. It was established that the powder of the foam fraction is more homogeneous in terms of morphometric characteristics. It is claimed that the homogeneity of diamond powders can serve as a criterion for evaluating the quality of flotation separation of synthetic diamond powders. In the future, similar studies should be continued in the direction of creating scientific and methodological bases for a priori assessment of the feasibility of repeated or multi-stage flotation separation.

Key words: *diamond powders, flotation, morphometric characteristics, technological properties, uniformity*

Література

1. Глембоцкий В.А., Классен В.И. Флотационные методы обогащения. М.: Недра. 1981. 304 с.
2. Kawatra, S. K., and Eisele, T. C., Coal Desulfurization: High-Efficiency Preparation Methods. New York: Taylor and Francis, 2001. 360 p.
3. Смирнов В.О., Білецький В.С. Флотаційні 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. *International Journal of Science, Engineering and Management (IJSEM)*. 2017. Vol 2, N 3, 75–78.
5. Das B. , Mohanty J.K.. Mineralogical Characterization and Beneficiation Studies of Pyrophyllite from Orissa. *India Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2009. Vol. 8, N4. P. 329–338,
6. Anashkina N.E., Bunin I.ZH., Khachatryan G.K. Influence of High-Voltage

- Electromagnetic Pulses on Technological Properties of Diamond Crystals and Kimberlite Rock-Forming Minerals. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*. 2019. July–December. P. 133–138.
7. Сабанова М.Н., Орехова, Горлова О.Е., Глаголева И.В. Влияние реагентов на основе диалкилдитиофосфатов на флотацию меди из пиритсодержащих шлаков. *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2018. № 4. С. 4–14.
 8. Ксенофонтов, Б. С. Использование многостадийной модели флотации и разработка флотокомбайнов типа КБС для очистки воды. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 160 с.
 9. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Бунин И.Ж., Миненко В.Г., Коваленко Е.Г., Подкаменный Ю.А.. Комбинированные процессы извлечения алмазов из метасорматически измененных кимберлитовых пород. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ)*. 2017. № 2. С. 1–12.
 10. Карнаухов Н.М. Гатилова Е.Г., Г.П. Богатырева. 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*. К.: ИСМ АН УССР, 1973. С. 36–38.
 12. Józef Stachurski, Ewa małyśa, Zofia Ociepa. Metoda grawitacyjno-flotacyjna oddzielania grafitu od diamentow syntetycznych. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*. 1992. Vol. 25. P. 47–58.
 13. E. Małyśa, Z. Ociepa, J. Stachurski. Studies of floatability of graphite and synthetic diamond. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*. 1999. Vol. 15, N1. P. 149–165.
 14. Богатырева Г.П. Сортировка алмазов по прочности флотацией. *Синтетические алмазы*. 1972. Вып. 3. С. 23–25.
 15. Bogatyreva G.P., Petasyuk G.A., Bazalii, Shamraeva V. S. On Morphometric Uniformity of Diamond Micron Powders. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, N 2. P. 126–134.
 16. Богатырева Г.П. Исследование флотационных свойств синтетических алмазов и разработка процесса их сортировки по прочности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1976. 22 с.
 17. Богатырева Г.П., Гатилова Е.Г. О механизме взаимодействия жирных кислот C₇-C₉ с поверхностью синтетических алмазов. *Синтетические алмазы*. 1972. № 6. С. 39–42.
 18. 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 *Республиканское научно-техническое совещание: тезисы докладов*. Киев, 1976. С. 62–63.
 19. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Зі змінами та поправками. Чинний від 1997-01-01. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1996.
 20. H.A. Petasyuk System-criterional method for quantitative estimation of the homogeneity of superhard dispersed materials system-criterional method for quantitative estimation of the homogeneity of superhard dispersed materials *Materials Science*. 2003. Vol. 39, N 5. P. 727–732.
 21. DiaInspect.OSM. Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis 2010. Operation guide Version 1.2.8. URL: <https://vdiamant.de/languages/diainspect-osm.html>.
 22. Vollstaedt, H., List, E.: Controlling the Stability of Superabrasive Powders. *Proceedings of the 4th Zhengzhou International Superhard Materials and Related Products Conference (4th ZISC)*. Zhengzhou, P.R. China, 2007.
 23. List, E., Frenzel, J., Vollstädt, R. Ein neues System zur Ermittlung der Einzelkornfestigkeit

- von Schleifkörnungen, *Industrie Diamanten Rundschau*. 2006. Vol. 40 II. P. 6–21.
24. List, E., Frenzel, J., Vollstadt, H. A new system for single particle strength testing of grinding powders. *Industrial diamond review*. 2006. N 1. P. 42–47.
25. Петасюк Г. А. Діагностика морфометричних характеристик порошків надтвердих матеріалів засобами цифрової обробки зображень. *Відбір і обробка інформації*. 2009. Вип. 30 (106). С. 138–145.
26. 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. *Journal of Superhard Materials*. 2014. Vol. 36, N 2. P. 136–144.
27. 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. *Journal of Superhard Materials*. 2012. Vol. 34, N 3. P. 200–208.
28. Petasyuk G.A. Interpretative and applied aspects of some morphological characteristics of superabrasive powders. *Journal of Superhard Materials*. 2010. N 2. P. 128–139.
29. 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. *Journal of Superhard Materials*. 2003. Vol. 25, N 3, P. 68–78.

Надійшла 09.07.23

References

1. Glembotsky, V.A., & Klassen V.I. (1981). *Flotatsionnye metody obohashcheniia [Flotation enrichment methods]*. (2th ed.). Nedra [in Russian].
2. Kawatra, S. K., & Eisele, T. C. (2001). *Coal Desulfurization: High-Efficiency Preparation Methods*. Taylor and Francis.
3. Smyrnov, V.O., & Biletskii, V.S. (2010). *Flotatsiini metody zbahachennia korysnykh kopalyn [Flotation methods of mineral enrichment]*. Skhidnyi vydavnychii dim [in Ukrainian].
4. Shireesha, M., Rama, N., Harini, P., et al. (2017). Recovery of Coal by Froth Flotation Equipment. *International Journal of Science, Engineering and Management (IJSEM)*. 2(3), 75–78.
5. Das, B., & Mohanty, J.K.. (2009). Mineralogical Characterization and Beneficiation Studies of Pyrophyllite from Orissa. *India Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 8(4), 329–338.
6. Anashkina N.E., Bunin I.ZH., & Khachatryan G.K. (2019). Influence of High-Voltage Electromagnetic Pulses on Technological Properties of Diamond Crystals and Kimberlite Rock-Forming Minerals. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society Inżynieria Mineralna*, July–December. 133–138.
7. Sabanova M.N., Orekhova, Gorlova O.E., & Glagoleva I.V. (2018). Vliianie reagentov na osnove dialkilditiofosfatov na flotatsiiu medi iz piritsoderzhashchikh shlakov [Influence of reagents based on dialkyldithiophosphates on copper flotation from pyrite-containing slags]. *Izv. vuzov Tsvetnaya metallurgiya – Notify of universities. Non-ferrous metallurgy*, (4), 4–14 [in Russian].
8. Ksenofontov, B. S. (2019) *Ispolzovanie mnogostadiinoi modeli flotatsii i razrabotka flotokombainov tipa KBS dlia ochistki vody [Use of a multi-stage flotation model and development of KBS-type flotation combines for water treatment]*. MGTU im. N.E. Bauman [in Russian].
9. Chanturiia, V.A., Dvoichenkova, H.P., Bunin, I. Zh., et.al. (2017). Kombinirovannye protsessy izvlecheniia almazov iz metasormaticheskii izmenennykh kimberlitovykh porod [Combined processes of extraction of diamonds from metasormatically altered kimberlite

- rocks]. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh (FTPRPI)– Physical and technical problems of mineral development (FTPRPI)*, 2, 1–12 [in Russian].
10. Karnaukhov, N.M. Gatilova, E.G., & Bogatyreva, G.P. (1969). Adsorbtsiia apoliarnykh sobiratelei na sinteticheskoye almaz i grafit [Adsorption of apolar collectors on synthetic diamond and graphite]. *Sinteticheskie almazy – Synthetic diamonds*, 5, 14–18 [in Russian].
 11. Bogatyreva, G.P. (1973) Opredelenie rezhimov obratnoi flotatsii sinteticheskikh almazov metodom Boksa-Uilsona [Determination of the modes of reverse flotation of synthetic diamonds by the Box-Wilson method]. *Sverkhverdye materialy dlia promyshlennosti – Superhard materials for industry*. (p. 36–38). ISM AN USSR [in Russian].
 12. Stachurski, J., Małysa, E., & Ociepa Z. (1992) Metoda grawitacyjno-flotacyjna oddzielenia grafitu od diamentow syntetycznych [Gravity-flotation method of separating graphite from synthetic diamonds]. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii – Physicochemical Problems of Mineralurgy*, 25, 47–58 (in Polish).
 13. Małysa, E., Ociepa, Z., & Stachurski, J. (1999). Badanie flotowalności grafitu i diamentu syntetycznego [Studies of floatability of graphite and synthetic diamond]. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 15(1), 149–165 (in Polish).
 14. Bogatyreva, G.P. (1972). Sortirovka almazov po prochnosti flotatsiei [Sorting of diamonds by strength by flotation]. *Sinteticheskiye almazy – Synthetic diamonds*, 3, 23–25 [in Russian].
 15. Bogatyreva, G.P., Petasyuk, G.A., Bazalii, G.A., & Shamraeva, V.S. (2009). On Morphometric Uniformity of Diamond Micron Powders. *J. Superhard Mater.* 31(2). 126–134.
 16. Bogatyreva, G.P. (1976). *Issledovanie flotatsionnykh svoystv sinteticheskikh almazov i razrabotka protsessov ikh sortirovki po prochnosti [Investigation of the flotation properties of synthetic diamonds and the development of the process of their sorting by strength]*. [Extended abstract of candidate's thesis]. Moskva [in Russian].
 17. Bogatyreva, G.P., & Gatilova, E.G. (1972). O mekhanizme vzaimodeystviia zhirnykh kislot C₇-C₉ s poverkhnosti sinteticheskikh almazov [On the mechanism of interaction of C₇-C₉ fatty acids with the surface of synthetic diamonds] *Sinteticheskie almazy – Synthetic diamonds*, 6, 39–42 [in Russian].
 18. Prikhna, A.I., Bogatyreva, G.P., Nevstruev, G.F., & Sokhina, L.A. (1976). Puti sovershenstvovaniia tekhnologii izgotovleniia almaznoho instrumenta na baze mekhanizatsii i avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov [Ways to improve the technology of manufacturing diamond tools on the basis of mechanization and automation of production processes] *Respublikanskoe nauchno-tekhnicheskoye soveshchaniye – Republican scientific and technical meeting*. (s. 62–63). [in Russian].
 19. Poroshky almazni syntetychni. Zahalni tekhnichni umovy. Zi zminyamy ta popravkamy [Synthetic diamond powders. General technical conditions. With changes and amendments]. (DSTU 3292–95). (1995). Derzhstandart Ukrainy.
 20. Petasyuk, H.A. (2003). System-criterional method for quantitative estimation of the homogeneity of superhard dispersed materials system-criterional method for quantitative estimation of the homogeneity of superhard dispersed materials. *Materials Science*, 39(5), 727–732.
 21. *DiaInspect.OSM. Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis 2010. Operation guide Version 1.2.8*. (b. d.) <https://vdiamant.de/languages/diainspect-osm.html>.
 22. Vollstaedt, H., List, E. (2007). Controlling the Stability of Superabrasive Powders, *Proceedings of the 4th Zhengzhou International Superhard Materials and Related Products Conference (4th ZISC)*. Zhengzhou.
 23. List, E., Frenzel, J., & Vollstädt, R. (2006). Ein neues System zur Ermittlung der Einzelkornfestigkeit von Schleifkörnungen. *Industrie Diamanten Rundschau*, 40 II, 6–21 [in German].

24. List, E., Frenzel, J., & Vollstadt, H. (2006). A new system for single particle strength testing of grinding powders. *Industrial diamond review*, 1, 42–47.
25. Petasyuk, G.A. (2009). Diahnastyka morfometrychnykh kharakterystyk poroshkiv nadtverdykh materialiv zasobamy tsyfrovoi obrobky zobrazhen [Diagnostics of morphometric characteristics of powders of superhard materials by means of digital image processing]. *Vidbir i obrobka informatsiyi – Selection and processing of information*, 30 (106). 138–145.
26. Poltoratskiy V.G., Petasyuk G.A., Safonova M.N., et al. (2014). A novel composite abrasive material of unmarketable natural diamond powder. *Journal of Superhard Materials*, 36(2), 136–144.
27. Petasyuk, G.A., & Sirota, Yu.V. (20012). Analytical determination of a number of particles per carat for diamond powders on the basis of an extrapolation-affine 3D grain model. *Journal of Superhard Materials*. 34(3). 200–208.
28. Petasyuk, G.A. (2010). Interpretative and applied aspects of some morphological characteristics of superabrasive powders. *Journal of Superhard Materials*, 2, 128–139.
29. Novikov, N.V., Nikitin, Y.I., & Petasyuk G.A. (2003). Computer-based diagnostic sieve for identification of grit size and grit size distribution in microscopic samples of diamond grits. *Journal of Superhard Materials*, 25(3), 68–78.

УДК 519.7

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-166-169

Т.С. Панасюк, канд. техн. наук

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

ОБЧИСЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ СТРУМУ НАГРІВАННЯ ШЕСТИПУАНСОННОГО АПАРАТУ ВИСОКОГО ТИСКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ANSYS APDL

У даній роботі запропоновано метод обчислення потужності струму нагрівання шестипуансонних апаратів високого тиску при чисельному моделюванні розподілу температури при спонтанному синтезі кристалів алмазу з використанням програмного комплексу ANSYS WORKBENCH і мови програмування APDL. Запропонований метод перевіряється для задачі, яка має аналітичний розв'язок. Також показане добре співпадіння розрахункових даних з експериментальними.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, потужність нагріву, APDL

Завдяки своїм унікальним властивостям кристали алмазу широко використовуються в різних сферах промисловості. Великі і чисті кристали алмазів в природі зустрічаються в недостатній кількості, тому проблема їх штучного виробництва надзвичайно важлива. Для вирощування крупних структурно досконалих кристалів використовують шестипуансонні апарати високого тиску (АВТ) китайського виробництва та метод температурного градієнту [1, 2]. При розробці нових схем спорядження комірок високого тиску основна проблема полягає в відшуванні такої схеми резистивного нагрівання, яка б забезпечувала необхідний розподіл температури в ростовому об'ємі. Зазначений метод надзвичайно вимогливий до значень температури в ростовому об'ємі, а експериментальне визначення температури – доволі складний процес, тому для визначення розподілу температури доцільно застосовувати чисельні методи. Одна з програм, яку доцільно використовувати для таких задач – це програмний комплекс ANSYS WORKBENCH. Нагрів ростової комірки здійснюється змінним