

8. А. с. 674277 СССР. Устройство для создания высокого давления и высокой температуры / А. И. Прихна, А. И. Боримский, П. А. Нагорный. – Зарег. 22.03.79.  
Поступила 10.07.19

### References

1. Novikov, N. V., Shul'zhenko, A. A., Bezhenar, N. P., et al. (2001). *Kiborit: polucheniye, struktura, svoystva, primeneniye* [Cyborite: obtaining, structure, properties, application]. *Sverkhtverdye materialy – Superhard Materials*, 2, 40–51 [in Russian].
2. Borimskii, I. O. Mekhanizm utvoreniya shchil'nykh modyfikatsiy nitrydu boru pry vysokomu tysku i vysokoy temperaturi (ohlyad) [Mechanism of formation of dense modifications of boron nitride at high pressure and high temperature (review)]. Proceedings from The Modern problems of production and repair in industry and transport: *Materyaly 17-ho Mezhdunarodnoho nauchno-tekhnycheskoho semynara (20–24 fevralya 2017 hoda) – Materials of the 17th International Scientific and Technical Seminar*. (pp. 51–55). Kyiv: ATM of Ukraine [in Ukrainian].
3. Wentorf R. H. (1961). Synthesis of the cubic form of boron nitride. *J. Chem. Phys.* 4, 3, 809–812.
4. Novikov, N. V. (Eds.) (2003). *Sverkhtverdyye materialy. Polucheniye i primeneniye. [Superhard materials. Receipt and application]*. Monografiya v 6 tomakh. Kyiv: ISM im. V. N. Bakulya, IPTS “ALKON” NANU, 2003. – Tom : Sintez almaza i podobnykh materialov / Otv. red. A. A. Shul'zhenko. – 320 s [in Russian].
5. Borims'kii, O. I., Novikov, M. V. & Borims'kii, I. O. (2004). Patent of Ukraine 65367.
6. Borims'kii, I. A. Sintez kristallov kubicheskogo nitrida bora s primeneniym zatrovok [Synthesis of cubic boron nitride crystals using seed]. *VI Mezhdunar. nauch. konf. «Aktual'nyye problemy fiziki tverdogo tela» (FTT-2013) (15–18 oktyabrya 2016 goda) – VI International scientific conf. “Actual problems of solid state physics” (FTT-2013)*. (pp. 29–31). Minsk: Varaksin A. N. [in Russian].
7. Borims'kii, O. I., Davidenko, V. M., Lysanov, V. S., et al. Patent of Ukraine 4580.
8. Prikhna, A. I., Borimskii, A. I. & Nagornyy, P. A. Certificate of authorship of SSSR 674277 [in Russian].

УДК 621.921.34-492.2

DOI: 10.33839/2223-3938-2019-22-1-212-220

**Г. А. Петасюк, В. І. Лавріненко**, доктори технічних наук, **Ю. В. Сирота**, канд. техн. наук

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

### **КІЛЬКІСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМОПОДІБНОСТІ ПРОЕКЦІЇ ЗЕРЕН ШЛІФПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ ШИРОКОГО ДІАПАЗОНУ МАРОК**

*Обговорюється значимість 3D моделі зерна як невід'ємного методологічного атрибуту опосередковано-аналітичного діагностування технологічних властивостей шліфпорошків синтетичного алмазу. Відзначається важливість проекції зерен як найбільш адекватного виразника їхньої 3D форми. Виконано кількісний аналіз тенденції зміни статичної міцності і її взаємозв'язку із геометричною формою проекції зерен стандартних шліфпорошків синтетичного алмазу в широкому*

діапазоні їх марок. На підставі проведених досліджень обґрунтовано доцільність та запропоновано критерії правомірного застосування кубооктаедра і октаедра як 3D моделей зерна.

**Ключові слова:** синтетичний алмаз, шліфувальний порошок, марка, статична міцність, проекція зерна, формоподібність

### Вступ

3D форма зерен шліфпорошків синтетичного алмазу (СА) є важливим методичним елементом при опосередкованому діагностуванні їхніх технологічних властивостей, морфометричних характеристик та характеристик різальних кромок. Відомо, що зерна високоміцних шліфпорошків СА мають 3D форму переважно кубооктаєдрів, рідше октаєдрів [1]. Проте умови синтезу можуть вносити певні відхилення від таких ідеальних 3D форм зерен (кристалів). Іншим, значно впливовішим джерелом відхилення і кардинальної зміни 3D форми зерен є також технологічні операції виготовлення шліфпорошків СА із продукту синтезу, зокрема це стосується процедури подрібнення.

Враховуючи можливість такого різноманіття 3D форм зерен шліфпорошків СА, їхню відмінність в багатьох випадках від відомих класичних просторово-геометричних тіл правильної форми і труднощі ідентифікації фактичних 3D форм зерен, при діагностуванні згадуваних вище технологічних властивостей і характеристик фактичну 3D форму зерен заміняють певною їхньою 3D моделлю. Зокрема, найчастіше вдаються до використання таких відомих однопараметричних просторово-геометричних тіл як куля та куб, рідше еліпсоїд, який є трьохпараметричним тілом.

Звичайно, такий перехід не може не вносити похибки у визначення об'єму та площі поверхні зерен, а з ними і показників таких технологічних властивостей шліфпорошку як зовнішня питома поверхня, число зерен в одному караті, товщина покриву зерен при металізації, зерновий склад та характеристика різальних кромок. Але позитивною в цьому сенсі є та обставина, що чим адекватніша 3D модель зерна, тим ця похибка менша. Тому пошук таких адекватних 3D моделей зерна має великий науково-методичний і прикладний інтерес.

У цьому зв'язку зауважимо, що незадіяними на сьогодні для цієї мети залишаються ще такі однопараметричні просторово-геометричні тіла як кубооктаєдр та октаєдр. Зазначені тіла дещо складніші для геометричного аналізу їхньої проекції, проте досить близькі до фактичної 3D форми зерен шліфпорошків СА значного діапазону їх марок. Кубооктаєдр належить до напівправильних багатогранників і має 14 граней (8 із яких є правильними трикутниками і 6 – квадратами). В кубооктаєдра 12 однакових вершин, в яких сходяться два трикутники і два квадрати, а також 24 однакових ребра, кожне з яких розділяє між собою трикутник і квадрат [2]. Геометричний аналіз показує, що проекцією кубооктаєдра на площину, паралельну тій грані, на якій він лежить (розміщується), буде правильний шестикутник або ж квадрат. Коли ця грань має форму правильного трикутника, то проекцією буде правильний шестикутник. Якщо ж її форма квадрат, то і проекцією також буде квадрат. Октаєдр належить до правильних багатогранників і складається із 8 граней, які є правильними трикутниками. В октаєдрі 6 однакових вершин а також 12 однакових ребер. Геометричний аналіз показує, що проекцією октаєдра на площину, паралельну грані, на якій він лежить (розміщується), завжди буде правильний шестикутник.

Якщо попередньо встановлено, що фактична 3D форма зерен того чи іншого шліфпорошку СА близька до кубооктаєдра чи октаєдра, то з великим ступенем достовірності такі просторово-геометричні тіла можуть бути використані як 3D моделі зерна при діагностуванні розглядуваних тут технологічних властивостей, характеристик різальних кромок та фактичних розмірних характеристик зерна як 3D об'єкта. Однак, цьому має передувати, поперше, встановлення взаємозв'язку між геометричними параметрами проекції (2D зображенням) зерна та параметрами кубооктаєдра чи то октаєдра як фактичної 3D форми зерна. Якщо шліфпорошок діагностується приладом DiaInspect.OSM [3], як це має місце у нашому випадку, то необхідними для цього основними геометричними параметрами проекції зерен

будуть максимальний ( $F_{max}$ ) та мінімальний ( $F_{min}$ ) її діаметри Фере. На підставі цих параметрів можна буде подати довжину ребра кубооктаедра та октаедра, через яку виражаються об'єм та площа поверхні цих багатогранників. Також можна встановити просторові аналоги максимального та мінімального діаметрів Фере та висоти зерна як 3D тіла. Допоміжними корисними геометричними параметрами проекції може бути також периметр і площа проекції та відносна доля світлої частини проекції в загальній її площі. По-друге, слід бути в змозі (вміти) ідентифікувати форму проекції зерен. Якщо ж не буде виявлено домінантної формоподібності проекції зерен до правильного шестикутника чи квадрата, то як просторово-геометричний аналог зерна можна використати його екстраполяційно-афінну 3D модель [4].

Позитивною в цьому сенсі є та обставина, що форма проекції зерен в автоматизованому режимі може бути ідентифікована методом, описаним в роботі [5]. Необхідними початковими даними для цього є результати діагностування 2D морфометричних характеристик (тобто, характеристик проекції зерен) шліфпорошку приладом DiaInspect.OSM. Перед початком ідентифікації форми проекції зерен доцільно провести візуальний аналіз DiaInspect-фотографії проби зерен, продіагностованої цим приладом. Для прикладу на рис. 1 подаються фотографії окремих зерен шліфпорошку високоміцних марок.

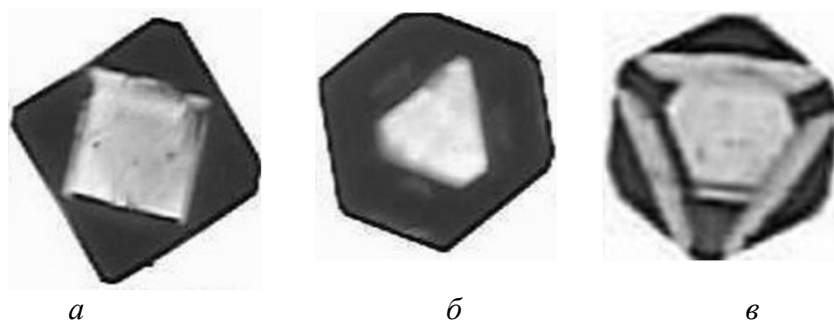


Рис. 1. DiaInspect-фотографії зерен шліфпорошків AC200 630/500 (а), AC400 500/400 (б) та AC200 250/200 (в)

Ці фотографії виконані у напрямку, перпендикулярному до предметного скла, на якому зерна проби шліфпорошку розташовані перед об'єктивом мікроскопу. Тому вони фактично є проекцією зерна і можуть слугувати її зразками. А отримані вони у нашій багаторічній практиці оцінювання якості шліфпорошків СА на приладі DiaInspect.OSM. Для порівняння на рис. 2 подаються проекції кубооктаедра та октаедра як 3D тіл із характерним зображенням видимих граней.

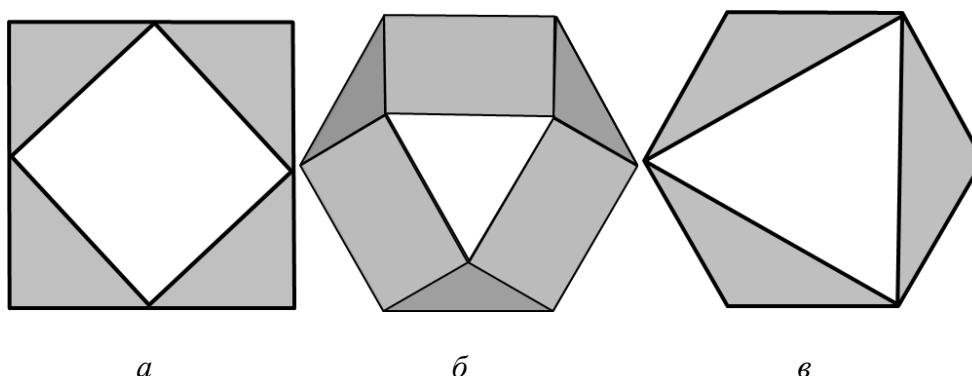


Рис. 2. Проекції кубооктаедра (а, б) та октаедра (в) як 3D тіл із характерним зображенням видимих граней

У зв'язку з вище викладеним значний прикладний інтерес складає вивчення тенденції зміни форми проекції зерен шліфпорошків СА у широкому діапазоні їх марок. Результати подібних досліджень є важливими у тому сенсі, що дозволять виявити певну межову марку шліфпорошка, починаючи із якої можна буде обґрунтовано як 3D модель зерна використовувати кубооктаедр чи октаедр.

Шліфпорошки СА, які застосовують на операціях абразивної обробки, характеризуються широким діапазоном показників їхньої статичної міцності. При цьому менш міцні зерна (шліфпорошки марок АС6–АС20) застосовують в алмазних кругах для процесів шліфування виробів машинобудування, більш міцні зерна (шліфпорошки АС32–АС160) – для відрізних кругів і кругів, які використовують для обробки каменю та бетону. Зерна наступного діапазону статичної міцності (шліфпорошки АС100–АС300) характерні для породоруйнуючого (геологорозвідувального) інструменту і, нарешті, високоміцні шліфпорошки марок АС200–АС400 застосовують в прецизійному правлячому інструменті.

У цій роботі вперше зроблено спробу дослідити тенденцію зміни геометричної формоподібності проекції зерен, яка є досить інформативним виразником абразивності шліфпорошків СА. Об'єктом дослідження є шліфпорошки СА широкого діапазону безперервного ряду їхніх марок і зернистостей. Слід зазначити, що аналогічні за метою дослідження, але для морфометричних характеристик таких абразивних порошків, були виконані в роботі [6].

#### **Технічні і методичні засоби та результати досліджень**

Дослідженнями, що виконувались в рамках цієї роботи, було охоплено три групи кондиційних за стандартом [7] шліфпорошків СА. Першу групу склали шліфпорошки зернистості 250/200 марок від АС6 до АС200 (область А). Друга група – шліфпорошки зернистості 500/400 марок АС100, АС200, АС300, АС400 (область Б). В третю групу були включені шліфпорошки марки АС200 зернистостей від 250/200 до 800/630 (область В). При цьому числовим виразником марки у відповідності до стандарту [7] приймався показник статичної міцності. Для зернистості таким числовим показником слугував мінімальний діаметр Фере [3], який є найбільш близьким аналогом ширини проекції зерна [8].

Автоматизовану діагностику морфометричних характеристик зерен шліфпорошків СА із зазначених трьох областей здійснювали за допомогою приладу Dialnspect.OSM [3]. Випробування на статичну міцність проводили на приладах ДА-2, ДА-2М та ДДА-33 [9], зважаючи на широкий діапазон марок досліджуваних шліфпорошків.

Особливістю цього дослідження формоподібності проекції зерен було те, що розглядався укрупнений перелік базових фігур аналогів (БФА) фактичної проекції зерен [5]. В цей перелік входило десять БФА з наступною нумерацією: 1 – овалоподібні фігури (коло та еліпс); 2 – прямокутник; 3 – ромб; 4 – рівнобедрена трапеція; 5 – квадрат, 6 – правильний п'ятикутник, 7 – правильний шестикутник; 8 – правильний восьмикутник; 9 – трикутник; 10 – паралелограм.

За результатами виконаних нами досліджень побудовано (рис. 3) графік взаємозв'язку формоподібності за диференціальним показником ( $f_k^{(d)}$ ) фактичної проекції зерен до деяких найбільш визначальних її БФА і статичної міцності шліфпорошків в області А.

В табл. 1 подаються всі показники диференціальної формоподібності проекції зерен до БФА для шліфпорошків марок АС6–АС200 зернистості 250/200 (область А). Така ж інформація, але для шліфпорошків марок АС100, АС200 – АС400 зернистості 500/400 (область Б) і марки АС200 неперервного ряду зернистостей від 250/200 до 800/630 (область В) відображена в табл. 2.

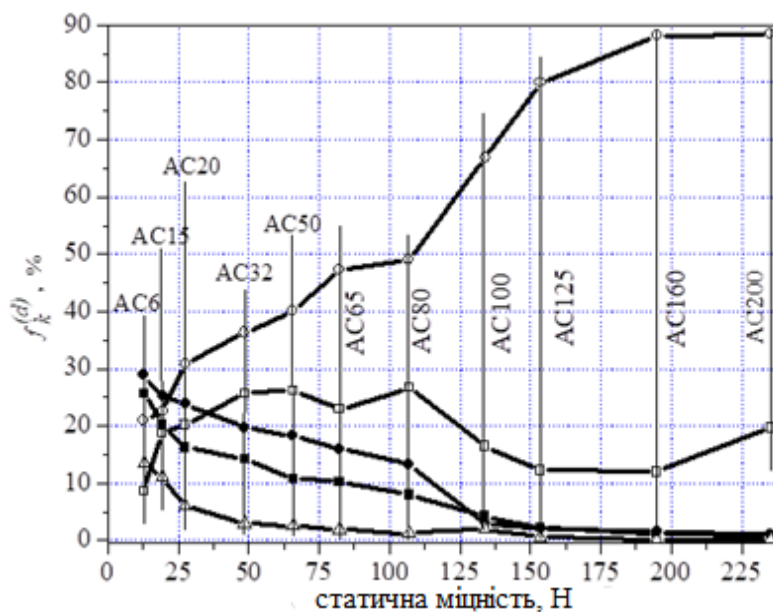


Рис. 3. Графіки взаємозв'язку формоподібності за диференціальним показником, ( $f_k^{(d)}$ ) до деяких найбільш визначальних її БФА (○ – правильний шестикутник, □ – квадрат, Δ – трикутник, ■ – прямокутник, ● – рівнобедрена трапеція) і статичної міцності шліфпорошків в області А.

Таблиця 1. Показники диференціальної формоподібності ( $f_k^{(d)}$ , %) проекції зерен шліфпорошків марок АС6–АС200 зернистості 250/200 (область А) до БФА

№ БФА	АС6	АС15	АС20	АС32	АС50	АС65	АС80	АС100	АС125	АС160	АС200
1	0,56	0,62	0,62	0,44	0,44	0,00	0,21	0,69	0,64	0,65	0,29
2	22,13	31,04	21,69	8,74	15,33	20,15	10,71	1,21	1,18	,32	2,13
3	0,19	0,10	0,21	0,00	0,66	0,99	0,43	0,43	0,36	0,00	0,00
4	6,59	7,50	7,95	4,20	7,01	11,17	6,85	1,38	1,36	0,48	1,36
5	<b>19,11</b>	<b>17,06</b>	<b>22,42</b>	<b>24,00</b>	<b>26,62</b>	<b>31,33</b>	<b>24,41</b>	<b>10,54</b>	<b>10,56</b>	<b>5,08</b>	<b>11,06</b>
6	0,28	0,00	0,21	0,44	0,33	0,11	0,64	1,99	2,09	1,94	3,59
7	<b>49,25</b>	<b>38,34</b>	<b>45,04</b>	<b>61,73</b>	<b>48,85</b>	<b>35,05</b>	<b>56,42</b>	<b>83,58</b>	<b>83,62</b>	<b>91,44</b>	<b>81,18</b>
8	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,22	0,11	0,17	0,18	0,08	0,39
9	1,88	5,34	1,55	0,33	0,55	0,99	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,21	0,11	0,22	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
5+7	<b>68,36</b>	<b>55,4</b>	<b>67,46</b>	<b>85,73</b>	<b>75,47</b>	<b>66,38</b>	<b>80,83</b>	<b>94,02</b>	<b>94,08</b>	<b>96,52</b>	<b>92,24</b>
Р, Н	12,74	19,33	27,39	48,56	65,66	79,19	96,95	133,81	153,59	194,96	235,39

Таблица 2. Показники диференціальної формоподібності ( $f_k^{(d)}$ , %) проєкції зерен шліфпорошків марок АС100, АС200–АС400 зернистості 500/400 (область Б) і марки АС200 неперервного ряду зернистостей від 250/200 до 800/630 (область В) до БФА

№ БФА	область Б				область В					
	АС100	АС200	АС300	АС400	250/200	315/250	400/315	500/400	630/500	800/630
1	0,00	3,38	0,00	0,00	0,80	0,76	10,21	0,37	0,30	1,12
2	1,65	0,00	0,00	0,00	1,96	0,30	0,00	0,73	0,30	0,00
3	0,83	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00
4	7,44	0,00	0,00	1,63	0,98	0,00	1,21	1,10	0,30	1,12
5	<b>30,58</b>	<b>12,84</b>	<b>9,94</b>	<b>9,80</b>	<b>9,55</b>	<b>4,54</b>	<b>12,50</b>	<b>10,62</b>	<b>3,95</b>	<b>15,73</b>
6	0,00	1,35	1,17	0,82	2,23	1,97	2,02	0,73	0,30	2,25
7	<b>59,50</b>	<b>82,43</b>	<b>88,89</b>	<b>87,76</b>	<b>84,11</b>	<b>91,83</b>	<b>82,66</b>	<b>85,71</b>	<b>94,83</b>	<b>78,65</b>
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,61	0,00	0,00	0,00	1,12
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	0,37	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00
5+7	<b>90,08</b>	<b>95,27</b>	<b>98,87</b>	<b>97,56</b>	<b>89,66</b>	<b>96,37</b>	<b>95,16</b>	<b>96,33</b>	<b>98,78</b>	<b>94,38</b>
Р, Н	218,0	371,0	671,0	878,20	252,5	292,5	350,0	402,5	495,0	590,5

#### Обговорення результати досліджень

Для шліфпорошків високоміцних марок (область А) разом зі збільшенням статичної міцності має місце тенденція до зростання показника формоподібності до деяких БФА проєкції зерна. Зокрема, для зерен із проєкцією у формі правильного шестикутника має місце тенденція до швидкого зростання при переході від низькоміцних до середньоміцних марок з наступним заповільненням росту на фоні високого її значення в області більш високих марок АС125–АС200 (див. рис.3). На підставі цього можна зробити висновок про те, що наявність у складі шліфпорошка більшої кількості зерен із проєкцією такої форми є ознакою високої статичної міцності. Менш яскраво в області А виражена тенденція зміни проєкції зерен у формі квадрата. До марки АС50 спостерігається збільшення відносної частки зерен з такою проєкцією. Для більш високих марок має місце нестабільний характер зміни – збільшення чергується зі зменшенням. Проте така поведінка не вносить жодного дисонансу, оскільки обидві ці форми проєкції є ознаками подібності 3D форми зерен до кубоктаедра. У той же час для низькоміцних (АС6–АС20) шліфпорошків характерна підвищена кількість зерен з формою проєкції у вигляді прямокутника, рівнобедреної трапеції та трикутника (див. рис. 3). На цій підставі можна говорити про те, що підвищений вміст у шліфпорошку зерен з такою формою проєкції веде до зменшення статичної міцності. Для інших БФА проєкції зерен (овалоподібні фігури, ромб, паралелограм) зробити однозначні висновки щодо такого взаємозв'язку неможливо. Це обумовлено тим, що відносна частка зерен із проєкцією такої форми (див. табл. 1) значно менша в порівнянні з іншими базовими аналогами. До того ж немає сталої тенденції зміни взаємозв'язку відносної їхньої кількості зі статичною міцністю.

В області Б (табл. 2) відбувається подальше домінуюче збільшення показників формоподібності до БФА у формі правильного шестикутника на тлі зменшення цього показника для інших БФА проєкції. При цьому подібна поляризація показників досить істотна і може бути пояснена подальшим переходом в цій області до шліфпорошків високоміцних марок.

Для області В (див. табл. 2), тобто при послідовному переході від менших зернистостей до більших в межах однієї марки, для жодної з можливих форм проекції зерен не спостерігається стабільності в характері зміни показника диференціальної формоподібності (табл. 2). Проте на тлі інших знову ж таки виділяються форми у вигляді правильного шестикутника і квадрата з більш високими значеннями показників формоподібності. При цьому за рівнем вони більші, ніж аналогічні показники цих БФА в області А. Для кожної зернистості спостерігається аналогічна картина розподілу зерен (з незначними відхиленнями) за диференціальним показником формоподібності до укрупнених БФА проекції, а також співвідношення між показниками формоподібності (табл. 2). На підставі цього можна зробити висновок про те, що форма проекції зерен більше пов'язана з міцністю шліфпорошка, чим з його зернистістю.

Проведений аналіз отриманої кількісної інформації дозволяє зробити наступні висновки.

1. Серед виявлених форм проекції зерен шліфпорошків синтетичного алмазу марок АС100 і вище переважають правильний шестикутник та квадрат. При цьому проекцію у формі квадрата дає кубоктаедр, який лежить на грані у формі квадрата, на площину, паралельну цій грані. Якщо ж кристал у формі кубоктаедра лежить на грані у формі правильного трикутника, то проекцією буде правильний шестикутник. Таку ж форму проекції завжди дає октаедр.

2. Для шліфпорошків синтетичного алмазу марок АС100 і вищих сумарна кількість зерен із проекцією у формі правильного шестикутника та квадрата складає 94,12 %. Для наступних за АС100 марок такий сумарний показник залишається стабільно високим у межах 92 – 96 відсотків. Оскільки проекцію у формі зазначених 2D фігур дають кристали у формі кубоктаедра та октаедра, то це дає підстави зробити висновок про те, що саме така 3D форма зерен характерна для високоміцних шліфпорошків синтетичного алмазу. Проведені дослідження показали, що таке припущення справедливо для шліфпорошків синтетичного алмазу, починаючи із марки АС100 і вищих марок.

3. Проведені дослідження показали, що для шліфпорошків синтетичного алмазу, починаючи із марки АС100 і вищих, як 3D модель зерна з великою достовірністю можна прийняти кубоктаедр.

*Обсуждается значимость 3D модели зерна как неотъемлемого методологического атрибута опосредовано-аналитического диагностирования технологических свойств шлифпорошков синтетического алмаза. Отмечается важность проекции зерен как наиболее адекватного выразителя их 3D формы. Выполнен количественный анализ тенденции изменения статической прочности и ее взаимосвязи с геометрической формой проекции зерен стандартных шлифпорошков синтетического алмаза в широком диапазоне их марок. На основании проведенных исследований обоснована целесообразность и предложены критерии правомерного применения кубоктаэдра и октаэдра как 3D моделей зерна.*

*Ключевые слова:* синтетический алмаз, шлифовальный порошок, марка, статическая прочность, проекция зерна, формоподобие

**G. A. Petasyuk, V. I. Lavrinenko, Sirota Yu.V.**

*V. N. Bakul Institute for superhard materials of NAS of Ukraine*

**QUANTITATIVE STUDIES OF GEOMETRIC SHAPE-SIMILARITY OF PROJECTION  
OF GRAINS OF GRINDING POWDERS OF SYNTHETIC DIAMOND  
FOR WIDE RANGE OF MARKS**

*The significance of the 3D-model grain as an integral methodological attribute of indirectly-analytical diagnostics of technological properties of grinding powders of synthetic diamond is discussed. The importance of projection of grains as the most adequate 3D expression of their shape is noted. A quantitative analysis of the trends in the change of static strength and its correlation with the geometric form of the projection of grain of grinding*

*powders of synthetic diamond in a wide range of their marks. Based on the research carried out, the feasibility and the criteria for the legitimate use of the cuboctahedra and octahedra as 3D-model of grain proposed.*

**Keywords:** *synthetic diamond, grinding powder, mark, static strength, grain projection, shape-similarity*

### Література

1. Физические свойства алмаза / Под ред. Н. В. Новикова Киев: Наук. думка, 1987. – 187 с.
2. Гордєєва Є.П., Величко В.Л. Нарисна геометрія. Багатогранники (правильні, напівправильні та зірчасті). Частина I. Навчальний посібник. Луцьк: Редакційно-видавничий відділ Луцького державного технічного університету, 2007. – 198 с.
3. 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.
4. Петасюк Г.А. Экстраполяционно–аффинная 3D модель зерна порошков сверхтвердых материалов и ее инженерия // *Современные проблемы естественных наук*.– 2014.– Т. 1(2).– С. 57–62.
5. Petasyuk G.A. System–Analogue Method of Identification of Geometric Shape of the Abrasive Grain Projection // *Journal of Superhard Materials*. – 2016. – 38. – N 4. – P. 277–287.
6. Petasyuk, G.A., Lavrinenko, V.I., Syrota Yu.V., Muzichka D.G. A Study of the Tendency and Extent of Variation of Morphometric Characteristics of Standard Synthetic Diamond Grits in a Continuous Series of Their Grades and Sizes *Journal of Superhard Materials*. – 2018. – 40. – N 6. – P. 414–423.
7. ДСТУ 3292–95 «Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови» – Введ. 01.01.96. Держстандарт України.
8. 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. – 25. – N 3. – P. 68–78.
9. Лошак М., Александрова Л., Косенчук Т., Міцність кристалів алмазу за статичного навантаження // *Метрологія та прилади*.– 2013.– №2 (40).– С. 11–15.

*Надійшла 09.04.2019*

### References

1. Novikov N.V. (Eds). (1987). *Fizicheskiye svoystva almaza [Physical properties of diamond]* / Pod red. N. V. Novikova. Kiev: Nauk. dumka [in Russian].
2. Hordyeyeva YE.P., Velychko V.L. (2007). *Narysna heometriya. Bahatohrannyky (pravylni, napivpravylni ta zirchasti). Chastyna I. Navchalnyy posibnyk. [Descriptive geometry. Polygons (right, half-right and stellar). Part I. Tutorial]*. Luts'k: Redaktsiyno-vydavnychyy viddil Luts'koho derzhavno-tekhnichnoho universytetu– Lutsk: Editorial-publishing department of Lutsk State Technical University, [in Russian].
3. List, E., Frenzel, J., Vollstadt, H. (2006). A new system for single particle strength testing of grinding powders. *Industrial diamond review*. 1, 42–47.
4. Petasyuk G.A. (2014). Ekstrapolyatsionno-affinnaya 3D model' zerna poroshkov sverkhтвердых materialov i yeye inzheneriya [Extrapolation-affine 3D model of grain of powders of superhard materials and its engineering] *Sovremennyye problemy yestestvennykh nauk– Modern problems of natural sciences*. 1(2), 57–62 . [in Russian].
5. Petasyuk G.A. (2016). System-Analogue Method of Identification of Geometric Shape of the Abrasive Grain Projection. *Journal of Superhard Materials*. 38, 4, 277–287.
6. Petasyuk, G.A., Lavrinenko, V.I., Syrota Yu.V., Muzichka D.G. (2018). A Study of the Tendency and Extent of Variation of Morphometric Characteristics of Standard Synthetic



- Diamond Grits in a Continuous Series of Their Grades and Sizes. *Journal of Superhard Materials*. 40, 6, 414–423.
7. Poroshky almazni syntetychni. Zahalni tekhnichni umovy. [Synthetic Diamond Powders. General Technical Specifications] 1995. DSTU 3292–95. Kiev: Derzhstandart Ukrainy. [in Russian].
  8. 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.
  9. Loshak M., Aleksandrova L., Kosenchuk T. (2013). Mitsnist' krystaliv almazu za statychnoho navantazhennya [Density of diamond crystals for static loading]. *Metrolohiya ta pryklady.– Metrology and devices*. 2(40), 11–15. [in Russian].

УДК 621.921.34

DOI: 10.33839/2223-3938-2019-22-1-220-226

**А. В. Ножкина**, д-р техн. наук<sup>1,2</sup>, **В. И. Костиков**, член-корр. РАН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «ВНИИАЛМАЗ», г. Москва, улица Гиляровского, дом 65, строение 1,  
E-mail: [vniialmaz@list.ru](mailto:vniialmaz@list.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технический университет «МИСиС», г. Москва,  
Ленинский проспект, дом 4, E-mail: [personal@misis.ru](mailto:personal@misis.ru)

## **ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ К УГЛЕРОДУ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТЕРМОСТОЙКОСТЬ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований термостойкости алмазосодержащих композиционных материалов, в том числе алмазов с покрытиями, то есть влияния температуры на физико-механические свойства композита. Показано, что эти свойства зависят от процессов взаимодействия алмазов с химически активными по отношению к углероду компонентами композита. Известно, что алмаз является метастабильной фазой углерода, а химически активные по отношению к углероду металлы являются катализаторами процесса графитизации алмаза на межфазной поверхности. Проведен анализ литературных и полученных авторами данных о влиянии температуры на фазовое превращение алмаза в графит. Показано, что в инертной к углероду среде алмаз сохраняется как фаза вплоть до температуры плавления алмаза в области метастабильности, указанной на *p,T*-фазовой диаграмме углерода. Проведен анализ графитизации алмазов на межфазной поверхности в контакте с металлами и кислородом при различных температурах. Экспериментально установлено влияние толщины покрытий на термостойкость алмазов при термообработке в химически активной к углероду газовой среде. Представлены результаты исследования и разработки термостойкого покрытия на алмазах, обладающего высокой адгезией и не образующей графита на межфазной поверхности.

**Ключевые слова:** алмаз, графит, термообработка, композиционный материал, фазовое превращение, алмазы с покрытием

Термостойкость алмазосодержащих композиционных материалов, в том числе алмазов с покрытиями, зависит от графитизации алмаза в процессе их изготовления или эксплуатации. Известно, что алмаз является метастабильной формой углерода и сохраняет структуру при температурах до 500 °С в любой химически активной по отношению к углероду среде, хотя фазовое превращение алмаза в графит при нормальных условиях должно протекать мгновенно.