

**В. М. Квасниця**, д-р геол.-мінер. наук<sup>1</sup>; **С. О. Івахненко**, чл.-кор НАН України;  
**Г. Д. Ільницька**, **О. М. Супрун**, кандидати технічних наук; **В. В. Лисаковський**, д-р. техн.  
наук; **Т. В. Коваленко**, **А. В. Бурчєня**, кандидати технічних наук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України,  
проспект Академіка Палладіна, 34, 03142, Київ.

<sup>2</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,  
04074, Київ, e-mail: alona.suprun@gmail.com

## ФІГУРИ РОЗЧИНЕННЯ НА КРИСТАЛАХ МОНОКРИСТАЛІВ АЛМАЗІВ, ОТРИМАНИХ В ОБЛАСТІ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ

Травлення кристалів дозволяє зрозуміти етапи росту кристалу та його поведінку при різних видах зовнішнього впливу; надає відповіді на питання, які пов'язані з їх використанням і особливостями застосування приладів і виробів з них. В нашій роботі були досліджені монокристали алмазів трьох типів Ib, IIa та IIb, отримані при високих тисках і температурах методом температурного градієнта, та монокристали типу Ib, отримані шляхом спонтанної кристалізації графіту. Для спостереження наявності домішок в алмазі використовували УФ-флюоресценцію. Рентгенівську топографію використовували для оцінки якості кристалів. Щільність ямок травлення визначали за допомогою вибіркового травлення. Характер розвитку різноманітних ямок травлення дуже широкий, скульптури розчинення свідчать про різну ступінь досконалості внутрішньої будови кристалів – від найбільш дефектних кристалів типу Ib до більш досконалих кристалів типу IIb і IIa.

**Ключові слова:** монокристал алмазу, травлення кристалів, ямки травлення, грань, пірамідальні западини, дефекти в монокристалах алмазу.

### Вступ

Вивчення процесів травлення кристалів допомагає зрозуміти етапи росту кристалів [1]. В процесі розчинення на кристалах алмазу відбувається розвиток різноманітних форм травлення. В багатьох експериментах показано, що при травленні і розчиненні монокристалів алмазу на їх поверхні утворюються трикутні та чотирикутні фігури травлення [1–3]. Кількість, розмір і морфологія ямок травлення залежать від параметрів росту, режимів і складу травного середовища [4–6]. Стінки пірамідальних ямок травлення можуть бути як гладенькими, так і представленими комбінаційними поверхнями. Кути тригранних ямок можуть бути в певній мірі притупленими і тоді вони можуть набувати шестикутної форми; чотирикутні ямки різного розміру можуть зливатися і накладатися одна на одну та формують при цьому складну, характерну для цих граней скульптуру [7, 8]. Часто плоскодонні ямки травлення розвиваються одна в одній, при цьому утворюються заглиблення з ступінчатою будовою стінок [7]. На поверхні кристалів можна спостерігати різного роду штриховки і скульптури, які досить часто описували дослідники для природніх алмазів, зокрема в роботах [1, 2, 4, 8].

Про схожі дослідження, проведені для кристалів, отриманих НТНР- методами, дуже мало даних.

### Експеримент

Досліджено монокристали алмазів трьох типів Ib, IIa та IIb, отримані при високих тисках та температурах методом температурного градієнта з використанням апаратури типу «Тороїд С40» та шестипуансонного пресу з діаметром плунжера 560 мм. Зразки алмазів типу Ib вирощували в розчинниках залізо-нікель при  $p = 5,7 - 6,1$  ГПа і  $T = 1240 - 1450$  °С, швидкість росту становила від 1,0–1,5 до 20–25 мг/год; алмази типу IIa і IIb – в розчинниках залізо-

алюміній, залізо-кобальт, при  $p = 5,8\text{--}6$  ГПа і  $T = 1350\text{--}1500$  °С, швидкість росту становила від 1–1,5 до 3–5 мг/год.

Для спостереження наявності домішок в алмазі використовували УФ- флюоресценцію, що являє собою випромінювання кристалом видимого світла під дією опромінення його УФ променями. Безпосередньо пов'язаний з концентрацією домішкових і дефектних центрів характер флюоресценції (колір, інтенсивність) дозволяє проводити візуалізацію зонально-секторіальної структури алмазів [9]. Для проведення процесу експрес-ідентифікації монокристалів алмазу використовували приладний комплекс «*DiamondView™*» [10, 11]; він простий у використанні та дозволяє працювати зі зразками розміром від 0,05 до 10 карат, які можливо розміщувати у вакуумному тримачі. За рахунок обертання зразку у різних напрямках з'являється можливість отримання квазі – 3D топографічної карти зображень, при цьому в основу роботи приладу закладено принцип опромінення зразка короткими УФ-хвилями довжиною менше 225 нм [9–11].

Для оцінки якості кристалів використовували рентгенівську топографію. Дослідження проводили на рентгенівському дифрактометрі «ДІТОМ-М» [12]. Джерелом рентгенівського випромінювання дифрактометра служить рентгенівська трубка з молібденовим анодом з розміром фокуса  $0.4 \times 12$  мм, як монохроматор використовується асиметрично зрізаний кристал кремнію (111) для забезпечення необхідної ширини пучка. Розмір зондуючого зразок монохроматичного рентгенівського пучка регулювався двома взаємно перпендикулярними щілинами і складав 3 мм по вертикалі і горизонталі. В якості відбиваючої була обрана кристалографічна площина (111), для якої кут Брегга  $\theta_B = 9.916^\circ$ . Досліджувані кристали налаштовувалися на максимум дифракційного відбиття в геометрії Лауе (на просвіт). При цьому контроль за інтенсивністю здійснювався за допомогою сцинтиляційного детектора. При такому положенні зразка на двовимірному детекторі (ПЗС-матриці) були зафіксовані рентгенівські топограми досліджуваних кристалів алмазу при різних поворотах кристала на кут  $\phi$  навколо вектора дифракції  $\vec{h}$  [111], який був напрямлений вгору. Час отримання однієї топограми складав не більше 1 години (2000 с + час зчитування детектора). Просторова роздільна здатність обумовлена розміром чутливого елемента детектора і складає 10 мкм. Відстань «монохроматор-зразок» становить 1000 мм, відстань «зразок-детектор» – 30 мм. Також були отримані топограми цих же кристалів для «забороненого» в алмазі відбивання від площини (222). Час отримання однієї топограми становив близько 2 год (6000 с + час зчитування детектора).

Для вибіркового травлення використовували суміш гідроксиду калію (KOH) та калієвої селітри ( $KNO_3$ ), а процес травлення відбувався в муфельній печі при температурі (550–660)  $\pm 10^\circ\text{C}$  і атмосферному тиску, час варіювали від 10 до 60 хв, після всього кристали добре промивали в дистильованій воді та етиловому спирті. При таких умовах на гранях кристалів проявляються виходи дислокацій у вигляді ямок травлення, форма яких співпадає з орієнтацією граней [13].

Методом температурного градієнта отримано кристали кубічного габітусу розміром 4–6 мм і масою 2,23–2,45 ст, а методом спонтанної кристалізації графіту – октаедричний габітус розміром 1-3 мм та масою 0,05–0,1 ст.

Щільність ямок травлення приймають за щільність дислокацій  $N_D$ , їх розрахунок проводять по формулі:  $N_D = D_{cp}/M_S$ , де  $D_{cp}$  – середня за результатами 5–10 вимірів кількість ямок травлення, що спостерігається в полі зору мікроскопа,  $M_S$  – площа поля зору мікроскопу,  $\text{см}^2$ .

Після очистки та травлення кристали досліджували за допомогою оптичного мікроскопа та гоніометра ГД-1.

### Результати

У монокристалах алмазу, отриманих методом температурного градієнта, розвинуті грані октаедра, куба, ромбододекаедра та тетрагон-триоктаедра. В кристалах алмазу типу  $Ib$  кубічні сектори, як правило, флуоресціюють жовтувато-зеленим кольором, сектори росту

ромбододекаедра та тетрагон-триоктаедра мають тенденцію до флуоресценції блакитного кольору, зміна насичення кольору відображає зміну концентрації азоту між секторами росту (рис. 1 а, б). Сильна флуоресценція блакитно-зеленого кольору (рис. 1 в, г), притаманна кристалам типу Па, що пояснюється наявністю домішок азоту і бору [14], більш темні зони являють собою сектори росту (001) та (113) з низькою щільність дефектів [15]. Кристали типу Пб проявляють характерну для них нерівномірну флуоресценцію синього, синьо-сірого та блакитно-зеленого кольору (рис 1. д, е), октаедричним граням притаманний блакитно-зелений колір, а граням куба – синій та синьо-сірий [16].

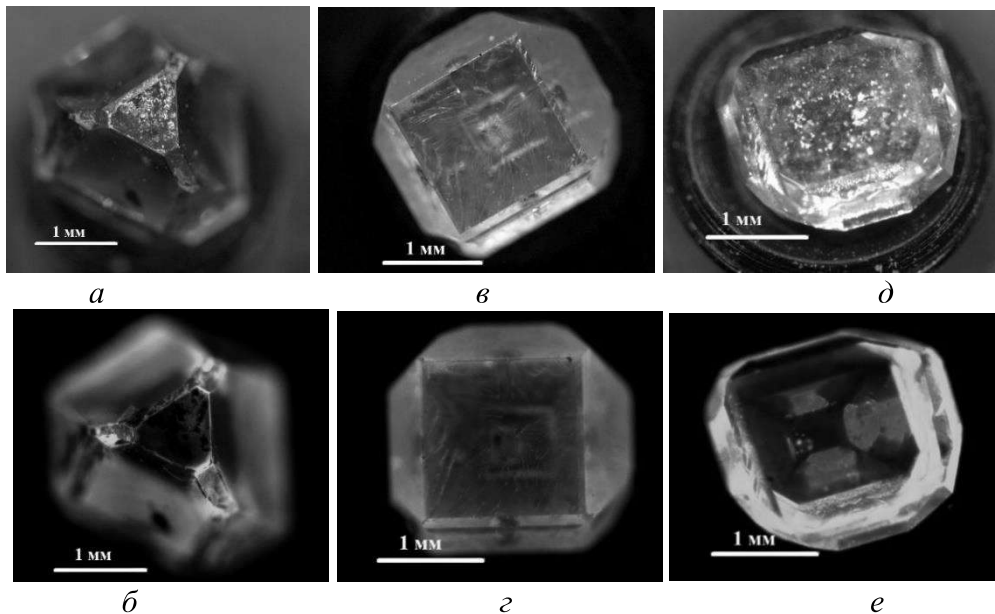


Рис. 1. Загальний вигляд та картини флуоресценції кристалів алмазу, одержаних методом температурного градієнта (а, б – тип Ib, в, г – тип Па, д, е – типу Пб)

Ще одним неруйнівним методом контролю реальної структури алмазів є рентгенівська топографія, що може дати інформацію про просторовий розподіл як протяжних дефектів, так і деяких точкових [17]. На рис. 2 представлені рентгенівські топограми зразків та карти розподілу основних домішкових дефектів.

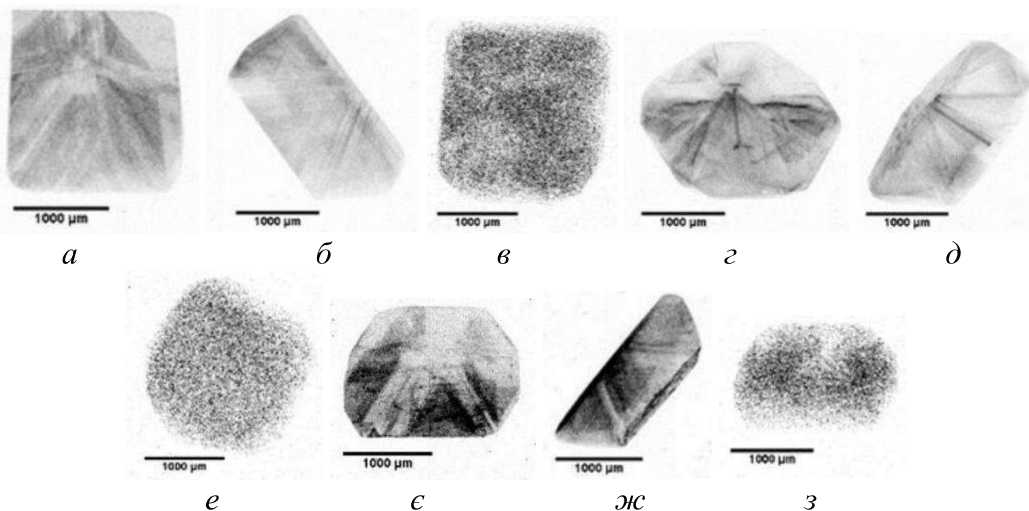


Рис. 2. Рентгенівські топограми зразків алмазу типу Па (а, б, в), Ib (г, д, е), Пб (є, ж, з) при різних кутах повороту кристала, вектор дифракції направлений вгору (а, б, г, д, е, ж – відбивання (111), в, е, з – відбивання (222))

З використанням відбивання 111 на топограмах можна спостерігати пучки дислокацій, дефекти упаковки і зони пластичної деформації (рис. 2 *a, б, з, д, е, ж*). Розподіл точкових дефектів можна спостерігати на топограмах відбивання 222 (рис. 2 *в, е, з*), окремі дислокації практично не розрізняються. В алмазі типу *Pa* концентрація домішкових і власних точкових дефектів дуже мала; для алмазу типу *Pb* домішки бору розподілені неоднорідно і залежать від сектора росту; досить однорідний розподіл дефектів по кристалах типу *Ib*.

В монокристалах алмазу, залежно від температури кристалізації, присутня різна кількість дислокацій – найбільш досконалі кристали алмазу можна отримати із збільшенням температури вирощування. Швидкість росту також впливає на дислокаційну структуру: збільшення швидкості росту та зменшення температури вирощування призводить до значного збільшення щільності дислокацій. Розподіл дислокацій по кристалах із різними температурами вирощування носить неоднорідний характер – в кристалах, отриманих на затравці при вищих температурах, як правило, знаходяться одиничні дислокації, а на кристалах, які отримані шляхом спонтанної перекристалізації графіту в розчині вуглецю при низьких температурах і великих швидкостях росту, щільність дислокацій значно вища від кристалів, отриманих в області термодинамічної стабільності (табл. 1).

Таблиця 1. Залежність щільності дислокацій монокристалів алмазу від температури вирощування та швидкості росту

| Тип кристалу | Швидкість росту, мг/год | Температура вирощування, °C | Щільність дислокацій, см <sup>-2</sup> |                                    |
|--------------|-------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|
|              |                         |                             | Грань (100)                            | Грань (111)                        |
| <i>Ib</i>    | 1–1,5                   | 1420–1500                   | $0,8 \cdot 10^2 - 1,8 \cdot 10^2$      | $1,8 \cdot 10^5 - 2,8 \cdot 10^5$  |
|              | 20–25                   | 1280–1350                   | $5 \cdot 10^5 - 7,85 \cdot 10^5$       | $0,8 \cdot 10^6 - 2,6 \cdot 10^6$  |
| <i>Pa</i>    | 1–1,5                   | 1420–1500                   | $1,5 \cdot 10^2 - 2,1 \cdot 10^2$      | $1,75 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^4$   |
| <i>Pb</i>    | 1–1,5                   | 1420–1500                   | $1,9 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^2$        | $0,32 \cdot 10^4 - 2,5 \cdot 10^4$ |

### Результати досліджень топографії кристалів алмазу

Спонтанний монокристал типу *Ib* (№ 1-3), є кубооктаедром (рис. 3. *a*). Він зазнав інтенсивного розчинення поверхні граней куба і октаедра. Грані куба суцільно покриті різнорозмірними чотирикутними (квадратними) пірамідальними западинами (рис. 3. *б*). Місцями проявлені одиничні крупні западини, які є восьмикутними пірамідами (рис. 3. *в*). Деякі із западин мають складну будову, коли в межах великої западини розвинуті, як правило, значно дрібніші симетрично розташовані більш глибокі западини (рис. 3. *з*). Грані октаедра орнаментовані численними шестикутними пірамідальними западинами (рис. 3. *д, е*). На дні більшості западин на гранях куба і октаедра розкриваються канали – дефектні місця структури кристалу. Діаметр каналів знаходиться в межах 1–2 мкм.

Монокристал, отриманий методом температурного градієнта (№ 12), також є кубооктаедром з вузькими гранями ромбододекаедра (рис. 4. *a*). Він зазнав меншого розчинення поверхні граней куба і октаедра. Більш інтенсивно розчинені поверхні октаедричних граней, на яких розвинуті трикутні і зрідка шестикутні пірамідальні западини (рис. 4. *б*). Їх дно невиразне. Грані ромбододекаедра покриті западинами без чітких контурів, зрідка – чотирикутними (прямокутними) пірамідальними западинами (рис. 4. *в*).

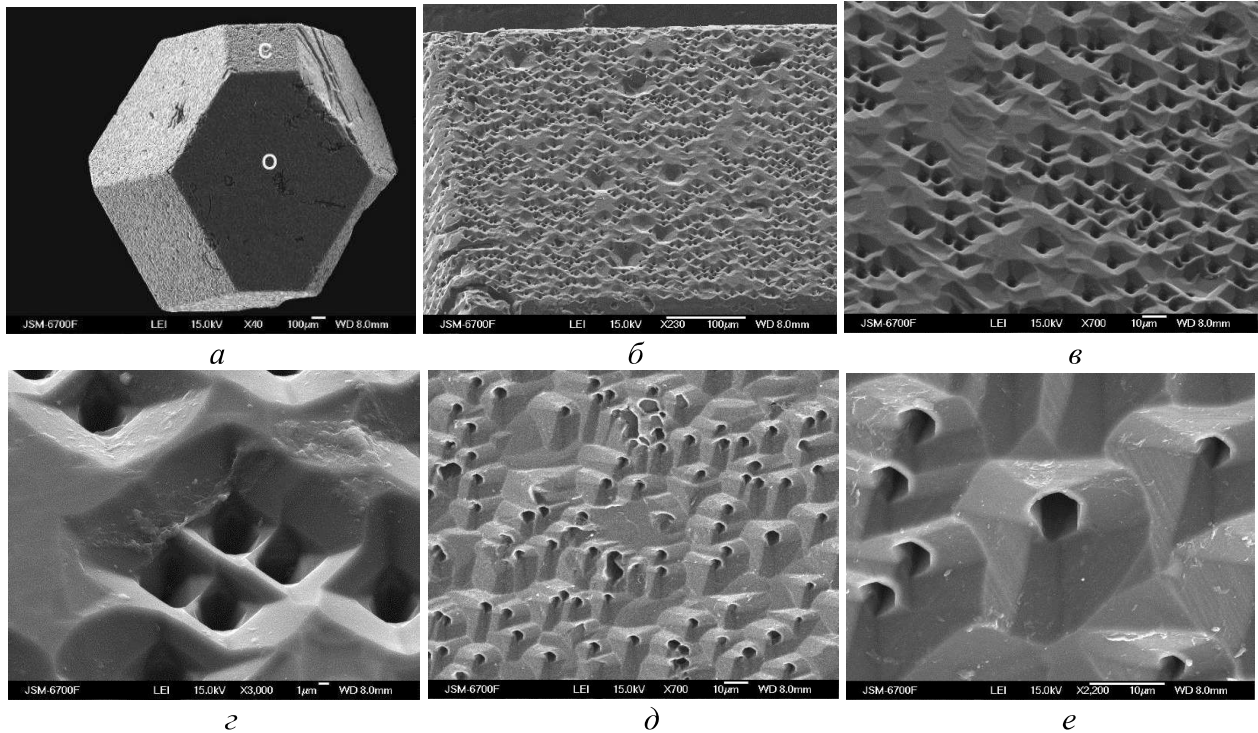


Рис. 3. Монокристал алмазу типу Ib (№ 1-3), отриманий методом спонтанної кристалізації; а – кубооктаедр алмазу: о – грань октаедра, с – грань куба (загальний вигляд кристалу); б – узор чотирикутних і восьмикутних пірамідальних западин на грані куба; в – деталізація чотирикутних і восьмикутних пірамідальних западин на грані куба; г – складна будова чотирикутної пірамідальної западини на грані куба; д – шестикутні пірамідальні западини на грані октаедра; е – деталізація шестикутних пірамідальних западин на грані октаедра

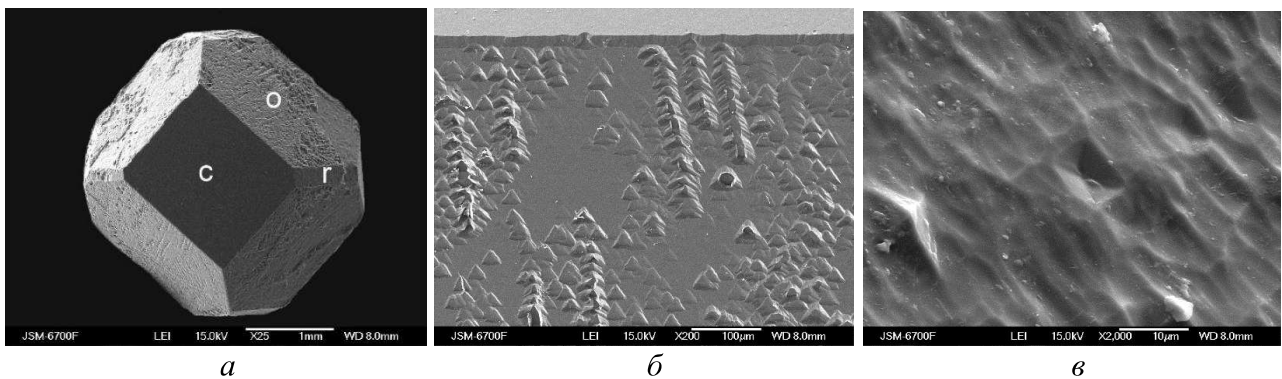


Рис. 4. Монокристал алмазу типу Ib (№ 12), отриманий методом температурного градієнта при швидкості росту 1 – 1,5 мг/год; а – кубооктаедр алмазу, ускладнений вузькими гранями ромбододакедра: о – грань октаедра, с – грань куба, г – грань ромбододакедра; б – трикутні і шестикутні пірамідальні западини на грані октаедра; в – чотирикутні пірамідальні западини на грані ромбододакедра

Монокристал № 6, отриманий методом температурного градієнта, тип Ib є кубом, ускладненим слабо розвинутими гранями октаедра. Поверхня кристала зазнала незначного розчинення. На гранях куба розвинуті ланцюжки переважно восьмикутних пірамідальних западин у поєднанні з чотирикутними пірамідальними западинами (рис. 5 а). Зрідка вершини пірамідок восьмикутних пірамідальних западин є притупленими незначними плоскими

площадками (рис. 5 б). На гранях октаедра розвинуті ланцюжки трикутних пірамідальних западин (рис. 5 в). Западини на гранях куба і октаедра мають досконале огранення.

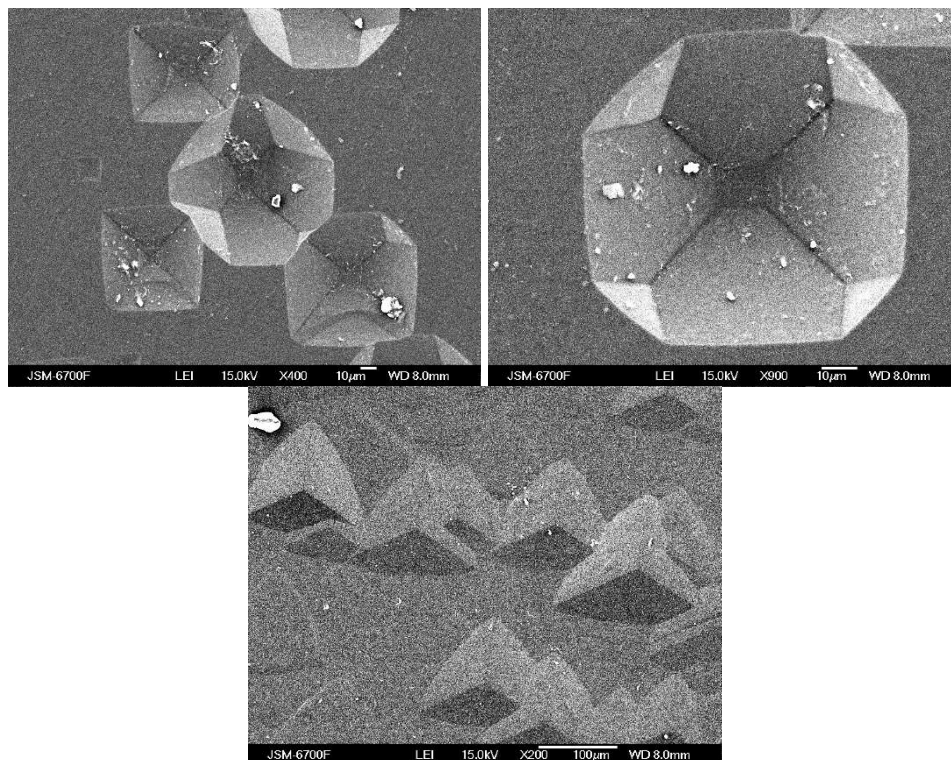


Рис. 5. Монокристал алмазу типу IIb (№ 6), отриманий при швидкості росту 1 – 1,5 мг/год; а – поєднання чотирикутних і восьмикутних пірамідальних западин на грані куба; б – восьмикутна пірамідальна западина з плоским дном на грані куба; в – трикутні пірамідальні западини на грані октаедра

Монокристал типу IIa (№ 14) є кубооктаедром, ускладненим вузькими гранями ромбододекаедра і тетрагон-триоктаедра  $\{311\}$  (рис. 6 а). Сліди розчинення поверхні його граней майже непомітні, тільки на гранях октаедра зафіксовані групові чи поодинокі трикутні пірамідальні западини (рис. 6 б).

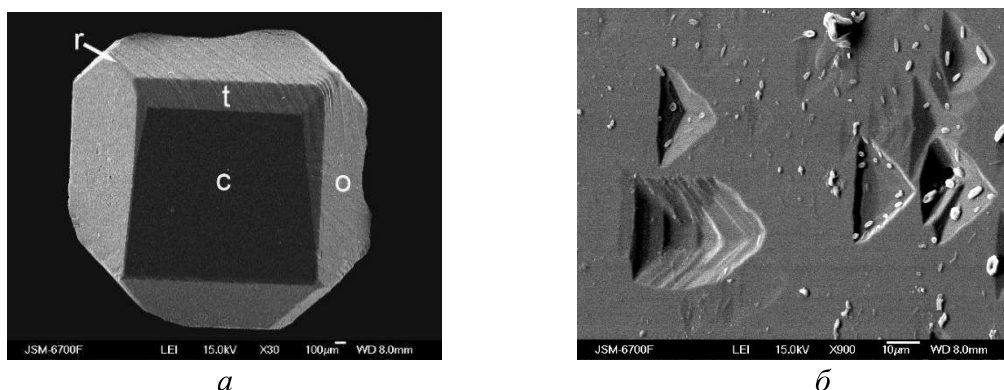


Рис. 6. Монокристал алмазу типу IIa, отриманий при швидкості росту 1 – 1,5 мг/год; а – кубооктаедр алмазу (загальний вигляд), ускладнений вузькими гранями ромбододекаедра і тетрагон-триоктаедра  $\{311\}$ : с – грань куба, о – грань октаедра, r – грань ромбододекаедра, t – грань тетрагон-триоктаедра  $\{311\}$ ; б – трикутні пірамідальні западини на грані октаедра

### Обговорення

Геометрія скульптур розчинення граней різних простих форм вивчених кристалів алмазу загалом є типовою, виявленою для багатьох кристалів природного і НТНР алмазу [18–23]. Всі скульптури розчинення є індикаторними для граней різних простих форм кристалів алмазу і чітко відображають їх симетрію. Ідеалізована узагальнена картина цих фігур розчинення на гранях куба і октаедра вивчених кристалів алмазу показана на рис. 7.

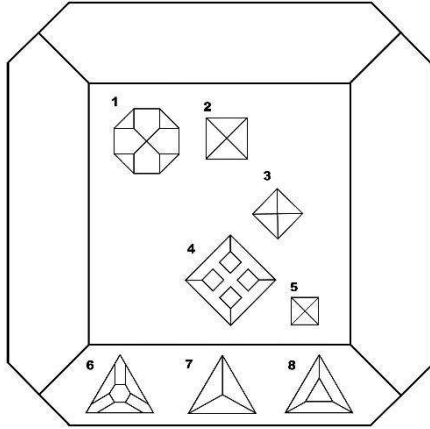


Рис. 7. Ідеалізоване схематичне зображення орієнтації типових фігур розчинення на гранях куба (фігури: 1, 2 – рис. 5; 3, 4 – рис. 3; 5 – рис. 4) і октаедра кристала алмазу (фігури: 6 – рис. 3; 7 – рис. 5, 6; 8 – рис. 4)

Звичайними скульптурами розчинення на поверхнях граней куба кристалів природного і НТНР алмазу є чотирикутні (квадратні) западини, сторони яких утворюють з ребрами граней куба кути в  $45^\circ$ . Вони характерні для вивчених жовтих кристалів алмазу (№ 1-3, №12). Западини є різновеликими і розташовані на різних гіпсометричних рівнях. Восьмикутні пірамідальні западини є рідкісними. Субпаралельні ребрам куба квадратні западини трапляються значно рідше, вони ж рельєфно слабо виражені. Квадратні западини є переважно пірамідальними, вони утворені гладкими сторонами-стінками пірамід. Стінки пірамід плоскі чи дещо округлі. Їх нахил різний – від крутих глибоких до похилих неглибоких. Рідко вершини

пірамідок притуплені слабо розвинутим плоским дном. Тонкошаруваті стінки впадин проявлені рідко, а саме у випадку, коли в межах великої западини розвинуті, як правило, дрібніші симетрично розташовані декілька глибоких западин. Саме на стінках цих западин проявлена шаруватість. Ця шаруватість дозволяє судити про тонкі ступені росту кристалів.

Дещо інша морфологія западин на гранях куба блакитного кристала алмазу (№ 6). Вони є переважно восьмикутними пірамідальними западинами, одна частина сторін яких субпаралельна ребрам граней куба, а друга частина сторін утворює з цими ребрами кут в  $45^\circ$ . Однак на гранях куба цього кристалу трапляються і субпаралельні ребрам куба чотирикутні западини. Разом всі западини є свідченням переорієнтації фігур в процесі розчинення, як і на поверхні кристала № 1-3. Такі випадки переорієнтації фігур розчинення на гранях куба, а також і октаедра, зафіксовані на кристалах як природного, так і НТНР алмазу. Передбачається, що вони є наслідком переважно зміни температурного режиму розчинення кристалів та його тривалості. Кристалографічно западини на гранях куба і октаедра кристала № 6 є найбільш досконалими.

На гранях октаедра вивчених кристалів алмазу розвинені три типи западин розчинення:

- 1) трикутні пірамідки;
- 2) трикутні пірамідки, вершини яких притуплені плоским дном;
- 3) більш складні пірамідки з плоским зрізом вершин – стінки таких пірамідок шестигранні при загальних трикутних контурах (рис. 7).

Саме на стінках останніх пірамідок проявлена штрихуватість. При загальних трикутних чи шестикутних контурах пірамідок все ж помітна деяка різниця в їх геометрії для кожного кристалу. Однак всі типи западин є прямопаралельними до ребер октаедра. Такі ж прямопаралельні западини є характерними ознаками розчинення на кристалах природного алмазу.

Оскільки на гоніометрі нам не вдалося отримати світлових сигналів від западин на гранях куба і октаедра, то їх геометрична характеристика є якісною, а не кількісною. Споглядально плоскі стінки восьмикутних пірамідальних западин на гранях куба (кристал № 6) субпаралельні

граням куба і октаедра відповідно (рис. 5. а, б), тобто можуть належати площинам (100) і (111). Це є свідченням кубооктаедричного формування кристала алмазу. Стінки квадратних западин з орієнтацією в  $45^{\circ}$  до ребер куба субпаралельні граням октаедра як свідчення росту кристала октаедричним нашаруванням. Такі западини найбільш характерні для граней куба природного алмазу. У випадку ступінчастої будови стінок квадратних западин на гранях куба природного алмазу рефлексії від них займають геометричне місце різних тетрагон-триоктаєдрів.

Стінки шестикутних пірамідальних западин на гранях октаедра можна характеризувати геометричним положенням різних тетрагон- і тригон-триоктаєдрів, а стінки прямопаралельних трикутних западин – положенням різних тетрагон-триоктаєдрів. Наприклад, за даними гоніометричних досліджень ці форми на кристалах природного алмазу є такі [19]: {322}, {433}, {655} і {776}, тобто вони відносно структурно важливі, як і для кристалів НТНР алмазу за даними [23]: стінки трикутних пірамідальних западин на гранях октаедра відповідають тетрагон-триоктаєдру {322}, а стінки чотирикутних западин на гранях куба цих же кристалів – тетрагон-триоктаєдру {511}. Іноді виникають западини, стінки яких відповідають ще більш структурно важливому тетрагон-триоктаєдру {211}. Частіше при розчиненні кристалів НТНР алмазу отримували западини, стінки яких відповідали другорядним формам з великими значеннями символів [20–22]. Загалом за експериментальними і гоніометричними даними [18–23] простежується залежність форм розчинення (особливо орієнтація фігур, нахил стінок западин) від умов процесу (температура, склад розчинника, тривалість розчинення, окисно-відновні показники тощо).

## Висновки

Характер розвитку різноманітних ямок травлення дуже багатомірний: на одних кристалах спостерігаються одиничні, різного розміру, не завжди на всіх гранях ямки, тоді як інші суцільно покриті ямками. Досить часто на більші фігури травлення накладаються мілкіші. Розвиток мілких, більш-менш однакових за розміром фігур травлення, які суцільно вкривають грань алмазу, характерний для спонтанних кристалів та октаедричних граней монокристалів, отриманих методом температурного градієнта. Можна побачити, що трикутні ямки травлення на гранях октаедра часто утворюють ланцюжки, які можуть іти вздовж ліній ковзання.

Зауважимо, що у нашому випадку виявлені скульптури розчинення свідчать про різну ступінь досконалості внутрішньої будови кристалів від найбільш дефектних жовтих кристалів (тип Ib) до більш досконалих блакитного (тип IIb) і безбарвного (тип IIa) кристалів.

V. M. Kvasnytsya<sup>1</sup>, S. O. Ivakhnenko<sup>2</sup>, G. D. Ilnytska<sup>2</sup>, O. M. Suprun<sup>2</sup>,  
V. V. Lysakovskiy<sup>2</sup>, T. V. Kovalenko<sup>2</sup>, A. V. Burchenia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation NAS of Ukraine*

<sup>2</sup>*Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine*

## DISSOLUTION FIGURES ON CRYSTALS OF DIAMOND MONOCRYSTALS OBTAINED IN THE AREA OF THERMODYNAMIC STABILITY

*Etching of crystals makes it possible to understand the stages of crystal growth and its behavior under various types of external influences, as well as to find answers to questions related to their use and the specifics of the use of devices and products made of them. Diamond single crystals of three types Ib, IIa and IIb, obtained at high pressures and temperatures by the temperature gradient method, and diamond single crystals of type Ib, obtained by spontaneous crystallization of graphite, were studied. UV fluorescence was used to observe the presence of impurities in diamond. X-ray topography was used in order to assess the quality of the crystals. The density of etch pits was determined using selective etching. The nature of the development of various etch pits is very wide, the dissolution sculptures indicate a different degree of perfection of the internal structure of crystals, ranging from the most defective crystals of Ib type to more perfect crystals of IIb and IIa types.*

**Key words:** diamond single crystal, crystal etching, etch pits, facet, pyramidal depressions, defects in diamond single crystals.

### Література

1. Khokhryakov A. F., Pal'yanov Y. N. The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data // *American Mineralogist*. – 2007. – Vol. 92, N 5-6. – P. 909–917; doi:10.2138/am.2007.2342.
2. Fedortchouk Y., Canil D., Semenets E. Mechanisms of diamond oxidation and their bearing on the fluid composition in kimberlite magmas // *American Mineralogist*. – 2007. Vol. 92, N 7. – P. 1200–1212; doi:10.2138/am.2007.2416.
3. Fedortchouk Y., Canil D. Diamond oxidation at atmospheric pressure: development of surface features and the effect of oxygen fugacity // *European Journal of Mineralogy*. – 2009. – Vol. 21, N 3. – P. 623–635; doi:10.1127/0935-1221/2009/0021-1929
4. Khokhryakov A. F., Nechaev D. V., Sokol A. G. Microrelief of Rounded Diamond Crystals as an Indicator of the Redox Conditions of Their Resorption in a Kimberlite Melt // *Crystals*. – 2020. – Vol. 10, N 3. – 233 (12 p.); doi:10.3390/cryst10030233
5. Moore M. Imaging diamond with x-rays. // *J. Phys.: Condens. Matter*. – 2009. – V. 21. – P. 364217.
6. Клепников И. В., Васильев Е. А., Антонов А. В. О ростовой природе отрицательных форм рельефа на кристаллах алмаза из россыпей Урала // *Кристаллография*. – 2009. – Т. 65, № 2. – С. 304–310.
7. Кухаренко А.А. Алмазы Урала. – М : Госгеолтехиздат. – 1955. – 515 с.
8. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. – М.: Наука. – 1984. – 263 с.
9. Ємельянов І. О., Грущинська О. В., Белевцев О. Р. Діагностика алмазів за допомогою приладу «DiamondView™» // *Коштовне та декоративне каміння*. – 2011. – № 1. – С. 8–17.
10. Ємельянов І. О., Грущинська О. В., Белевцев О. Р. Сучасна діагностика природних і штучних алмазів із застосуванням приладу «DiamondView™» // *Записки Українського мінералогічного товариства*. – 2011. – Т. 8. – С. 69–73.
11. Ємельянов І. О., Татарцев В. І. Практична реконструкція анатомії огранених алмазів за рисунками фотолюмінесценції // *Коштовне та декоративне каміння*. – 2013. – № 4. – С. 16–19.
12. Zolotov D. A., Buzmakov A. V., Elfimov D. A., Asadchikov V. E., Chukhovskii F. N. The possibility of identifying the spatial location of single dislocations by topo-tomography on laboratory setups // *Crystallogr. Rep.* – 2017. Vol. 62, N 1. – P. 20–24.
13. Хейман Р.Б. Растворение кристаллов. Теория и практика. – Л.: «Недра», Ленинградское отделение, 1979. – 272 с.
14. Sumiya H., Tamasaku K. Large Defect-Free Synthetic Type IIa Diamond Crystals Synthesized via High Pressure and High Temperature // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2012. – V. 51. – 090102 (5 p).
15. Martineau P. M., Lawson S. C., Taylor A. J., Quinn S. J., Evans D. J. F., Crowder M. J. Identification of Synthetic Diamond Grown Using Chemical Vapor Deposition (CVD) // *Gems and Gemology*. – 2004. – V. 40, № 1. – P. 2–25.
16. Zaitsev A. M. *Optical Properties of Diamond. Data Handbook*. – Berlin: Springer, 2010. – 519 p.
17. Ширяев А. А., Золотов Д. А., Супрун Е М., Дьячкова И. Г., Ивахненко С.А., Асадчиков В. Е. Вклад структурных дефектов в интенсивность квазизапрещенных рентгеновских отражений алмаза: сравнение данных рентгеновской топографии и инфракрасной спектроскопии // *Письма в ЖЭТФ*. – 2020. – Т. 1, № 9. – С. 597–601.
18. Бартошинский З.В., Квасница В.Н. Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. – К.: Наукова думка. – 1991. – 172 с.

19. Харьков А.Д., Афанасьев В.П., Квасница В.Н., Штурман В.Л., Кулакова И.И., Руденко А.П., Смирнов Г.И., Соколов В.И. Признаки каталитического окисления при высокотемпературном воздействии кимберлитового расплава на алмазы // Докл. АН СССР. – 1980. – Т. 250, № 4. – С. 949–952.
20. Хохряков А.Ф. Формы растворения алмаза в силикатных и сульфидно-металлических системах: автореф. дис. на соискание степени канд. геолого-минерал. наук. – Новосибирск. – 1988. – 16 с.
21. Хохряков А.Ф. Растворение алмаза: Экспериментальное исследование процессов и модель кристалломорфологической эволюции: автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра геолого-минерал. наук. – Новосибирск. – 2004. – 36 с.
22. Чепуров А.И., Федоров И.И., Сонин В.М. Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ. – 1997. – 196 с.
23. Pipkin N.J. Etch features on synthetic diamond crystals oxidized in fused salts // J. of Materials Science. – 1980. – Vol. 15. – P. 1755–1764.

Надійшла 02.09.22

### References

1. Khokhryakov, A. F., & Pal'yanov, Y. N. (2007). The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data. *American Mineralogist*, 92, 5-6, 909–917.
2. Fedortchouk, Y., Canil, D., & Semenets, E. (2007). Mechanisms of diamond oxidation and their bearing on the fluid composition in kimberlite magmas. *American Mineralogist*, 92, 7, 1200–1212.
3. Fedortchouk, Y., & Canil, D. (2009). Diamond oxidation at atmospheric pressure: development of surface features and the effect of oxygen fugacity. *European Journal of Mineralogy*, 21, 3, 623–635.
4. Khokhryakov, A. F., Nechaev, D. V., & Sokol, A. G. (2020). Microrelief of Rounded Diamond Crystals as an Indicator of the Redox Conditions of Their Resorption in a Kimberlite Melt. *Crystals*, 10, 3, 233.
5. Moore M. (2009). Imaging diamond with x-rays. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 21, 364217.
6. Klepnikov, I. V. (2009). O rostovoi prirode otritsatelnykh form reliefa na kristallakh almaza iz rossypei Urala [On the growth nature of negative relief forms on diamond crystals from Ural placers]. *Kristallografiya – Crystallography* 65, 2. 304–310 [in Russian].
7. Kukharenko, A. A. (1955) *Almazy Urala [Diamonds of the Urals]*. Moskwa: Gosgeoltekhizdat [in Russian].
8. Orlov, Y. L. (1984), *Mineralogiya almaza [Mineralogy of diamond]*. M.: Nauka. [in Russian].
9. Yemelianov, I. O., Hrushchynska, O. V., & Belevtsev O. R. (2011). Diahnostyka almaziv za dopomohoyu prykladu «DiamondView™» [Diagnostics of diamonds using the DiamondView™ device]. *Koshtovne ta dekoratyvne kaminnya – Precious and decorative stones*, 1, 8–17 [in Ukrainian].
10. Yemelianov, I. O., Hrushchynska, O. V., Belevtsev, O. R. (2011). Suchasna diahnostyka pryrodnykh i shtuchnykh almaziv iz zastosuvanniam prykladu «DiamondView™» [Modern diagnostics of natural and artificial diamonds using the "DiamondView™" device]. *Zapysky Ukrayins'koho mineralohichnoho tovarystva – Notes of the Ukrainian Mineralogical Society*, 8, 69–73 [in Ukrainian].
11. Yemelianov, I. O., & Tatartsev, V. I. (2013). Praktychna rekonstruktsiia anatomii ohranenykh almaziv za rysunkamy fotolyuminesentsii *Koshtovne ta dekoratyvne kaminnya – Precious and decorative stones*, 4. 16–19 [in Ukrainian].

12. Zolotov, D. A., Buzmakov, A. V., Elfimov, D. A., et al. (2017). The possibility of identifying the spatial location of single dislocations by topo-tomography on laboratory setups. *Crystallogr. Rep.*, 62, 1, 20–24.
13. Kheiman R.B. (1979). *Rastvorenie kristallov. Teoriia i praktika [Dissolution of crystals. Theory and practice]*. – Leninhrad: Nedra [in Russian].
14. Sumiya, H., Tamasaku, K. (2012). Large Defect-Free Synthetic Type IIa Diamond Crystals Synthesized via High Pressure and High Temperature. *Japanese Journal of Applied Physics*, 51, 090102.
15. Martineau, P. M., Lawson, S. C., Taylor, A. J., et al. (2004). Identification of Synthetic Diamond Grown Using Chemical Vapor Deposition (CVD). *Gems and Gemology*, 40, 1, 2–25.
16. Zaitsev, A. M. (2010). *Optical Properties of Diamond. Data Handbook*. Berlin: Springer.
17. Shiryayev, A. A., Zolotov, D. A., Suprun, E. M., et al. (2020). Vklad strukturnykh defektov v intensivnost kvazizapreshchennykh renthknovskikh otrazhenii almaza: sravnenie dannykh renthenovskoi topografii i infrakrasnoi spektroskopii [Contribution of Lattice Defects to the Intensity of Quasi-Forbidden X-ray Reflections of Diamond: Comparison of X-Ray Topography and Infrared Spectroscopy Data]. *Pisma v ZhETF – JETP Letters*, 111, 489–493 [in Russian].
18. Bartoshinskii, Z.V., & Kvasnitsa, V.N. (1991). *Krystallomorfologiiia almaza iz kimberlitov [Crystal morphology of diamond from kimberlites]*. K: Naukova dumka [in Russian]
19. Kharkiv, A.D., Afanasev, V.P., Kvasnitsa, V.N., et al. (1980) Priznaki kataliticheskoho okisleniia pri vysokotemperaturnom vozdествii kimberlitovoho rasplava na almazy [Signs of catalytic oxidation under high-temperature impact of kimberlite melt on diamonds]. *Doklady akademii nauk SSSR – Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 250, 4. 949–952 [in Russian].
20. Khokhryakov, A. F. (1988). Formy rastvoreniia almaza v silikatnykh i sulfidno-metallicheskiikh sistemakh [Forms of diamond dissolution in silicate and sulfide-metal systems]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Novosibirsk [in Russian].
21. Khokhryakov, A. F. (2004). Rastvorenie almaza: Eksperimentalnoe issledovanie protsessov i model krystallomorfologicheskoi evoliutsii [Experimental study of processes and a model of crystal morphological evolution]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Novosibirsk [in Russian].
22. Chepurov A.I., Fedorov I.I., Sonin V.M. (1997). *Eksperimentalnoe modelirovanie protsessov almazobrazovaniia [Experimental modeling of diamond formation processes]*. Novosibirsk: SO RAN, NITS OIGGM [in Russian].
23. Pipkin N.J. (1980). Etch features on synthetic diamond crystals oxidized in fused salts. *J. of Materials Science*, 15, 1755–1764.