

## ПЛОСКІ ГРАНІ КУБА ТА ЇХ СПІРАЛЬНИЙ РІСТ НА МІКРОКРИСТАЛАХ АЛМАЗУ ІЗ КІМБЕРЛІТІВ

**Вступ.** Морфологія алмазу надзвичайно різноманітна [1, 2, 5—8, 10, 12, 13]. Серед природного алмазу слід розрізняти його морфологію із різних генетичних типів кристалічних порід: мантийних — кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів та перидотитових і еклогітових ксенолітів у них, з одного боку, із корових метаморфічних — з другого, з імпаکتитів (порід астроблем) — з третього. Інакше кажучи, кристали алмазу можна розподілити за окремими родинами із певною специфікацією форм виділення для кожного вказаного типу порід. Морфологія штучного алмазу також контрастна: вона має свої особливості для алмазу, отриманого: за високого статичного тиску в умовах його стабільності; за піролізом чи CVD процесом із газової фази  $\text{CH}_4$  чи  $\text{C}_2\text{H}_2$  за тиску менше 1 атм ( $1 \cdot 10^5$  Па) і за високої температури; за ударного синтезу в умовах високого тиску. Умови росту всіх перелічених родин алмазів із різних земних кристалічних порід суттєво відбиваються на його морфології. В межах кожної родини природного алмазу, крім імпактної полікристалічної, розрізняють три групи: монокристали, полікристали і змішані — моно- і полікристали. І. Сунагава [14, 15] показав, що причиною утворення цих груп алмазу є насамперед ступінь пересичення середовища вуглецем та розмір одиниць росту і, відповідно, швидкість та механізм росту кристалів.

Монокристалні алмази ростуть за двома механізмами: тангенціальним (спіральний ріст чи двовимірною нуклеація) і волокнистим. Для природного алмазу перший механізм домінує: так ростуть (октаедричними шарами) октаедри, перехідні форми  $\{111\} + \{110\}$  і частина кубів (псевдокубів). Інша частина кубів і кубооктаєдрів росте тонкими волокнами різної орієнтації ( $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ ), так само утворюються облямівки монокристалів. І. Сунагава [14, 15] стверджує, що на кристалах природного алмазу тільки грані октаедра можуть мати плоску поверхню внаслідок їх спірального росту, тоді як грані куба ніколи не з'являються як плоскі поверхні, навіть в умовах росту за низьких пересичень, і вони завжди шершаві. Спіральний ріст граней куба природного алмазу раніше не спостерігали. Ці висновки зроблені на основі вивчення морфології переважно макрокристалів природного алмазу. Кристали штучного алмазу мають плоскі грані куба і октаедра, на гранях цих форм часто виявляється спіральний ріст.

Однак вивчення морфології мікрокристалів алмазу із кімберлітів розмірами менше 0,5 мм показує їх значно більше морфологічне розмаїття порівняно з макрокристалом [3, 4]. В нашій публікації ми звертаємо увагу на рідкісні випадки кристалізації природного алмазу: багатогранники мікроалмазу із кімберлітів з плоскими гранями куба, а також з проявом їх спірального росту.

**Зразки і методи досліджень.** Вивчено мікроалмази (переглянуто декілька сотень кристалів розмірами менше 0,5 мм) із двох кімберлітових трубок Якутської кімберлітової провінції (“Юбилейная” і “Удачная”). Серед них були виявлені понад 20 кристалів з плоскими гранями куба і 1 кристал з проявом спірального росту граней  $\{100\}$ . Для вивчення цих кристалів застосовані методи гоніометрії (двокружний гоніометр ГД-1), растрової електронної мікроскопії (мікроскоп SEM-100), рентгенівського аналізу (метод Лауе) та інфрачервоної спектроскопії (FTIR-спектроскопія).

**Результати досліджень та обговорення.** Кристали алмазу з плоскими гранями куба є октаедрами (рис. 1). Вершини цих переважно прозорих, безкольорових кристалів зрізані невеликими за розмірами гранями куба. Зрідка грані куба орнаментовані одиничними чи груповими впадинами у вигляді негативних чотирикутних пірамідок. Часто такі октаедри не мають ознак розчинення або вони слабопомітні. Куб зрідка буває повногранним (6 граней), частіше розвинуто від 3 до 5 граней. Належність таких граней до куба підтверджено гоніометричними замірами. Відблиски від цих граней на гоніометрі чіткі.

Кристал алмазу з проявом спірального росту на гранях куба є безкольоровим багатогранником комбінаційної форми  $\{100\} + \{110\} + \{111\}$  (рис. 2) з переважанням граней куба і ромбододекаедра. Грані  $\{110\}$  і  $\{111\}$  утворились під час виродження граней куба: трансляція ребер граней куба привела до утворення шершавих граней  $\{110\}$ , трансляція вершин граней куба — до утворення шершавих граней  $\{111\}$ . В межах кожного нового шару по  $(001)$  як грані куба, так і

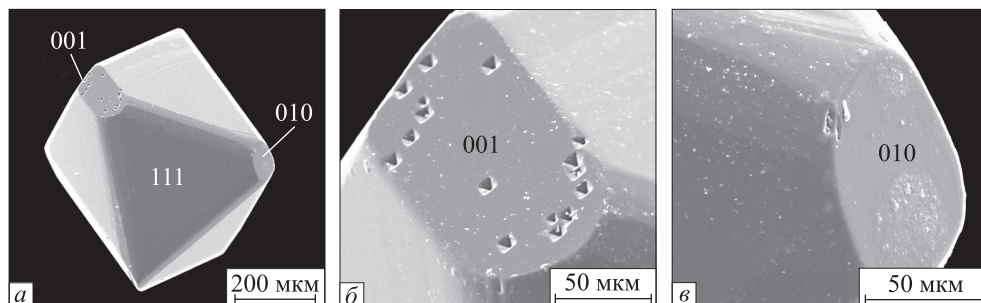
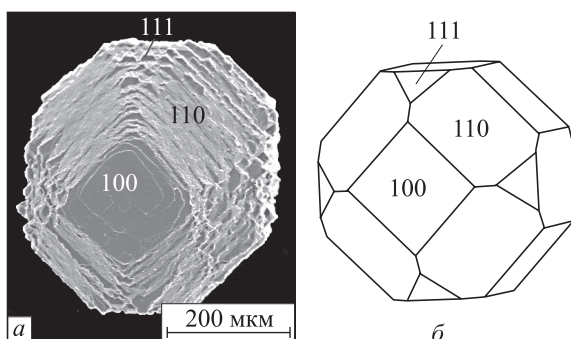


Рис. 1. Плоскі грані куба на октаедрі алмазу (а) та їх деталізація (б, в)

Рис. 2. Кристал алмазу комбінаційної форми  $\{100\} + \{110\} + \{111\}$  з проявом спірального росту на гранях куба (а) та його зарисовка (б)



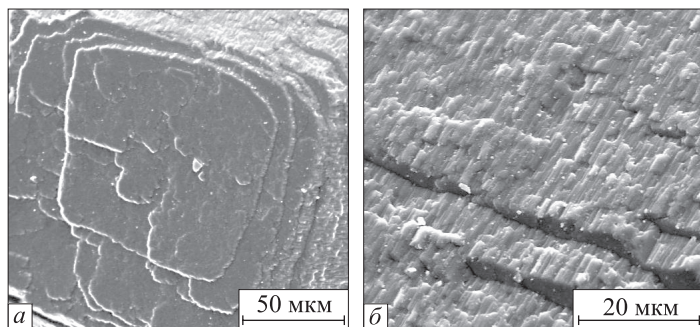


Рис. 3. Характер будови граней  $\{100\}$  (а) і  $\{110\}$  (б) на кристалі алмазу з проявом спірального росту

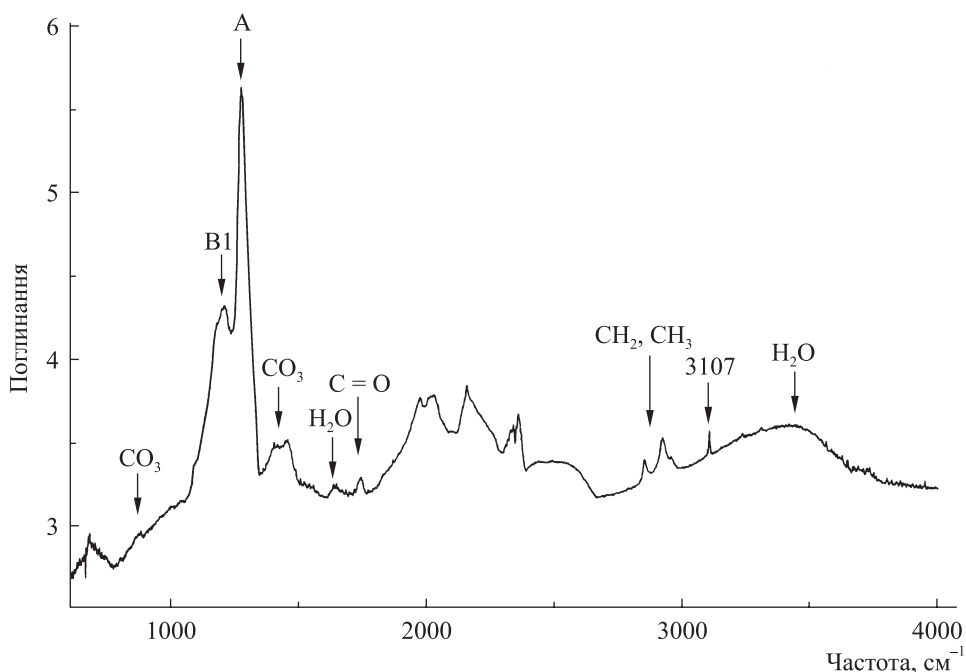


Рис. 4. Інфрачервоний спектр кристала алмазу з проявом спірального росту

грані ромбододекаедра складені з численних субіндивідів, перпендикулярних до площини (001) і паралельних площині (111). Це добре видно із електронно-мікроскопічних знімків граней  $\{110\}$  (рис. 3). Кристал сформувався внаслідок спірального росту по  $\langle 100 \rangle$  одночасно з ростом великої кількості мікронних субіндивідів по (111), тобто він є полікристалічним у межах кожного шару. Висота спіралі значна  $\sim 10$  мкм. Проте на лауєграмах кристала вздовж  $[001]$  видно, що рентгенівське проміння діє на такий полікристалічний кристал, як на монокристал. Це означає, що кут розорієнтації субіндивідів у межах  $\langle 100 \rangle$  не перевищує  $1^\circ$ . На лауєграммах цього кристала можна спостерігати лише дифузне розсіювання, незначні розчеплення й астеризм дифракційних плям і так звані екстрарефлекси. Останні засвідчують наявність у кристалі дефектів типу В2 — скупчення міжвузлового вуглецю.

Цей унікальний кристал алмазу за даними спектроскопічних досліджень в інфрачервоному діапазоні (рис. 4) належить до типу фізичної класифікації IaA, вміст азоту в формі А (смуга  $1282 \text{ cm}^{-1}$ ) не перевищує 330 ppm і у формі

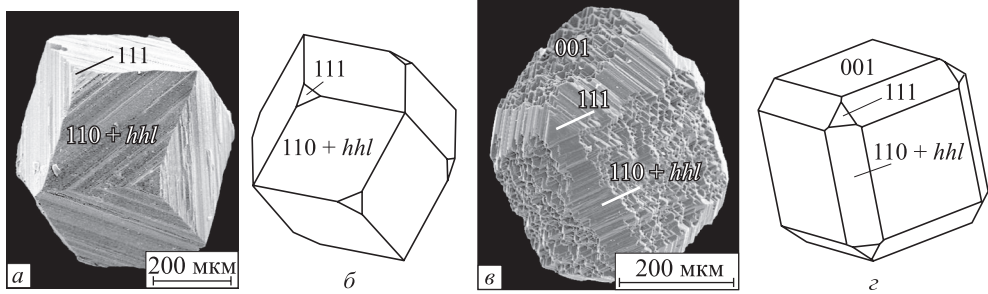


Рис. 5. Псевдоромбододекаедр (а) і псевдокуб алмазу (в) із кімберлітів Якутії, їх зарисовки (б, з)

$\text{V1}$  (смуга  $1175 \text{ cm}^{-1}$ ) —  $20 \text{ ppm}$ . На інфрачервоному спектрі цього кристала також проявлені смуги  $\text{CO}_3$  ( $1415, 1459$  і  $887 \text{ cm}^{-1}$ ) — включення карбонату,  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\sim 1640$  і  $3440 \text{ cm}^{-1}$ ),  $>\text{CH}=\text{CH}_2$  ( $3107 \text{ cm}^{-1}$ ) і  $\text{CH}_2, \text{CH}_3$  ( $2851, 2922$  і  $2953 \text{ cm}^{-1}$ ).

Отже, можна константувати, що морфологічні ознаки деяких природних мікроалмазів із кімберлітів близькі до морфології певного типу штучного алмазу: це плоскі ростові грані куба і прояв спірального росту на них. Якщо залучити до пояснення такого явища на природному алмазі його кристалічну структуру — найважливішого чинника впливу на формування огранення кристалів, то потрібно сказати таке. Згідно з РВС (періодичні ланцюжки зв'язку) аналізом кристалів алмазу, виконаним П. Хартманом [9, 11],  $\{111\}$  містить три РВС — тому це F-грані (плоскі поверхні) \*,  $\{110\}$  містить один РВС — тому це S-грані (східчасті поверхні), а  $\{100\}$  без РВС віднесено до К-граней (шершаві поверхні). З такого аналізу випливає, що пошаровий механізм росту мають тільки грані  $\{111\}$ , а  $\{110\}$  і  $\{100\}$  не утворюють на кристалах плоскі кристалографічні форми.

Проте на кристалах штучного алмазу всі ці грані є плоскими. Пояснення цьому дав І. Сунагава [14, 15]. Він допустив, що грані  $\{100\}$  можуть належати не лише до К-, а й до S-граней. А якщо врахувати так звану реконструкцію поверхні (001) із заповненням некомпенсованих зв'язків у двох ідентичних зонах  $[110]$  і  $[1\bar{1}0]$ , то (100) перетвориться у F-грань з двома РВС. Таким чином, допускається можливий пошаровий ріст кристалів алмазу на гранях  $\{100\}$ . Однак, як відзначено вище, І. Сунагава не допускав такого пошарового росту граней  $\{100\}$  для природного алмазу (приймаючи силікатну систему росту, відносно низькі пересичення, елемент росту — атом), а тільки для штучного алмазу, де він росте в системі зі значним пересиченням і, відповідно, елементи росту значно більші — сукупність атомів.

Як протилежність вивченому кристалу на рис. 5 показані типовий псевдоромбододекаедр з F-гранями октаедра і S-гранями  $\{110\}$  і  $\{hhl\}$ , а також типовий кубічний кристал алмазу (псевдокуб) з гранями  $\{111\}$  і  $\{110\}$ , на якому  $\{111\}$  є F-гранями,  $\{110\}$  — S-гранями, а  $\{100\}$  — К-гранями, що складені із вершин октаедричних граней. Саме таку природу мають грані октаедра, куба і ромбододекаедра майже на всіх кристалах природного алмазу. Такий ріст більшості кристалів природного алмазу тільки підкреслює унікальність описаного вище незвичайного кристала алмаза.

Ще одна ознака подібності вивченого кристала до штучного алмазу — особливості спіралей росту. Для штучних алмазів вони можуть досягати, як і у

\* Згідно з П. Хартманом [9, 11], для утворення F-граней потрібно не менше 2 РВС.

розглянутому випадку, значної висоти: від 20 до 150 нм. Спіралі росту мають нерівну поверхню і хвилясті краї, у наведеному випадку це зумовлено наявністю численних субдивідів. Швидкість пересування сходинки спіралі по [001], очевидно, була високою, що привело до утворення добре розвинених граней {110}.

**Висновки.** Таким чином, грані вивченого кристала алмазу комбінаційної форми {100} + {110} + {111} можна класифікувати, згідно з РВС аналізом, так: {100} — F-грані; {110} — S-грані; {111} — одночасно є F- і K-гранями: {111} як F-грані, тому що в межах кожного кубічного шару ростуть мікросферами по (111); як K-грані, тому що складені з вершин граней куба; шершава поверхня граней {111} зумовлена саме їх належністю до K-граней.

Механізм росту досить поширених дзеркально-гладеньких граней куба на октаедрах алмаза не з'ясовано. Можна лише допустити їхню таку саму дислокаційну природу (спіральний ріст). Як відомо, вивчення анатомії кристалів природного алмазу дуже часто фіксує їх зонально-секторіальну будову, де пошаровий ріст по октаедру поєднується з ростом шарами, паралельними (100). Імовірно, тангенціальний (спіральний) ріст шарами, паралельними плоским сіткам куба, за певних умов кристалізації є досить звичайним для кристалів природного алмазу.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бартошинский З.В., Квасниця В.Н. Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. — Киев: Наук. думка, 1991. — 172 с.
2. Бокій Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А. и др. Природные и синтетические алмазы. — М.: Наука, 1986. — 222 с.
3. Варшавский А.В., Буланова Г.П. Микрокристаллы природного алмаза // Докл. АН СССР. — 1974. — 217, № 5. — С. 1069—1072.
4. Квасниця В.Н., Коптіль В.И., Зинчук Н.Н. Типоморфизм микрокристаллов алмаза. — М.: Недра, 1999. — 224 с.
5. Кухаренко А.А. Алмазы Урала. — М.: Госгеолтехиздат, 1955. — 514 с.
6. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. — М.: Наука, 1984. — 264 с.
7. Пальянов Ю.Н. Рост кристаллов алмаза (экспериментальное исследование) // Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — Новосибирск, 1997. — 35 с.
8. Ферсман А.Е. Кристаллография алмаза. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 566 с.
9. Хартман П. Зависимость морфологии кристалла от кристаллической структуры (вводная лекция по морфологии кристаллов) // Рост кристаллов. — М.: Наука, 1967. — Т. 7. — С. 8—24.
10. Шафрановский И.И. Кристаллография округлых алмазов. — Л.: Изд-во Ленингр. унта, 1948. — 132 с.
11. Hartman P. The non-uniform distribution of faces in a zone // Zeitschrift für Kristallographie. — 1965. — 121. — S. 78—80.
12. Kalb G. Die Morphologie der Diamantkristalle unter Berücksichtigung der Oberflächenstruktur // Neues Jahrb. Miner. Monatsh. — 1967. — № 7, 8. — S. 193—256.
13. Moore M. Diamond morphology // Industrial Diamond Review. — 1985. — 45, № 2. — P. 67—71.
14. Sunagava I. Morphology of natural and synthetic diamond crystals // Materials Sci. Earth's Inter. — Tokio: TERRA Pub., 1984. — P. 303—330.
15. Sunagava I. Morphology of diamonds // Morphology and phase equilibrium of minerals (materials of IMA, 1982). — Sophia, 1986. — P. 195—207.