

Одержання, структура, властивості

УДК 548.211

В. М. Квасниця

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення
ім. М. П. Семененка НАН України, м. Київ, Україна
vmkvas@hotmail.com

Морфологія і механізми росту кристалів алмазу

На прикладі морфології мікрокристалів природного і штучного алмазу продемонстровано їхні механізми росту: дислокаційний (спіральний), бездислокаційний (двомірний), нормальний (фібрильний) і блоковий (адгезивний). Ці механізми чітко проявляються у особливостях морфології і мікротопографії поліедрів та ксенокристалів алмазу. Більшість кристалів природного алмазу росте за дислокаційним і нормальним механізмами росту, а кристалів штучного алмазу – за дислокаційним і двомірним механізмами росту.

Ключові слова: алмаз, кристаломорфологія, прості форми кристалів, мікротопографія, механізм росту.

ВСТУП

Алмаз належить до відносно рідкісних мінералів, яким властивий ідіоморфізм виділень. Найчастіше він утворює саме поліедри та їхні зростки, рідше полікристали і зовсім рідко ксеноморфні форми. Штучний алмаз також кристалізується у вигляді поліедрів та їхніх зростків. Допускають, що ідіоморфізм алмазу забезпечується завдяки міцним ковалентним зв'язкам в його структурі. Однак огранення його кристалів відносно бідне порівняно з ограненням іонних і, навіть, молекулярних кристалів. Як відомо, воно визначається передусім внутрішнім чинником – структурою мінералу чи штучного кристала: високою ретикулярною щільністю площин і присутністю в їхніх межах рядів щільного зв'язку. Відповідно до теорії П. Хартмана про періодичні ланцюжки зв'язку РВС (the periodic bond chain), прості форми і габітус кристала визначаються насамперед набором безперервних ланцюжків міцних зв'язків, що утворюються в кристалічній ґратці. Виходячи з аналізу РВС зв'язків в структурі алмазу його кристали при дислокаційному чи двомірному рості повинні покриватися переважно плоскими гранями октаедра, тобто мають рости кристали октаедричного габітусу. Проте вплив зовнішніх чинників може бути причиною появи незвичайних поліедрів і ксеноморфних

виділень алмазу за іншими механізмами росту. Вивчення морфології і мікротопографії тисячних колекцій мікрочастин алмазу різного походження дає змогу проілюструвати їхні різні механізми росту і показати якому алмазу вони властиві.

ВРАЗИКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У автора була можливість вивчати морфологію і мікротопографію мікрочастин природного алмазу з кімберлітів, лампроїтів, метаморфічних порід, імпактітів і розсіпів та макро- і мікрочастин штучного НРНТ і CVD алмазу. Їхні морфологічні дослідження проведено в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України на растрових електронних мікроскопах РЕМ-100 і JSM-6700F, обладнаному енергодисперсійною системою для мікроаналізу JED-2300 (JEOL, Японія). Отримання РЕМ-зображень алмазів здійснювали за прискорювальної напруги 15 кВ (іноді 20 кВ), струму зонда $6 \cdot 10^{-10}$ А та діаметра зонда 1–2 мкм.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

В табл. 1 зібрано оригінальні і літературні дані про прості форми кристалів природного і штучного алмазу, їхні габітуси та механізми росту. За геолого-генетичним типом корінних алмазоносних порід серед природного алмазу слід розрізняти алмаз із мантийних порід – кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів, із метаморфічних порід та імпактітних порід метеоритних кратерів Землі. Алмази з вказаних порід є найкраще вивченими. Окрім цих порід слабо алмазоносними є також інші ультраосновні і основні породи [1], проте алмази цих порід вивчено ще недостатньо. В останнє десятиріччя з'явилося багато публікацій про мікроалмази (до 0,5 мм в діаметрі) у таких плутонічних породах, як перидотити і хромітити офіолітових поясів Землі (в Євро-Азійському альпійському поясі чи Альпійсько-Гімалайському поясі – в алмазопроявах від М'янми, в багатьох місцях китайського Тибету, Індії, Туреччині і до Албанії включно, а також в Уральському каледонському поясі, Росія і Центральньо-Азійському каледонському поясі, Китай) та у продуктах виверження сучасних вулканів Камчатки – в базальтах, андезитобазальтах, туфобрекчіях, туфах [2–4]. Однак потрібно зразу ж зауважити, що достовірність знахідок алмазу в офіолітових і сучасних вулканічних породах піддається сумніву, ряд дослідників вважає їх штучним НРНТ алмазом [5, 6]. Саме їхня плоскогранна морфологія кристалів і включення металів та їхніх сплавів в них наводяться як одні з важливих ознак, що можуть вказувати на засмічення проб вищевказаних порід кристалами штучного алмазу. Штучні НРНТ і CVD алмази мають свою власну морфологію кристалів [7–9], яка є контрастною морфології кристалів природного алмазу. Між собою кристали цих двох різних за умовами синтезу штучних алмазів також помітно різняться. Зовсім інша морфологія імпактітного алмазу, кристали цього алмазу є параморфозами по вихідному вуглецевому матеріалі [10].

Насамперед потрібно відзначити, що для кристалів природного алмазу мантийного походження властивий так званий антискелетний спосіб росту граней октаедра, коли зародження все нових шарів частіше відбувається в центральних частинах граней, а не біля вершин і ребер кристала. Таким чином росте більша частина кристалів природного алмазу, при цьому виникають перехідні форми $\{111\} + \{110\}$ і псевдоформи алмазу – своєрідні ромбододекаедри і куби, а також специфічні скелетні кристали (рис. 1). Це зумовлено також тим, що швидкість наростання і розростання октаедричних граней кристалів алмазу близькі чи навіть часто швидкість наростання домінує. Та-

кий спосіб утворення кристалів алмазу декларував А.А. Аншелес [11, 12], назвавши його антискелетним ростом. Власне типові скелетні поліедри природного алмазу з пустотілими гранями октаедра і куба рідкісні (рис. 1, е), як і рідкісні скелетні куби з пустотілими гранями куба серед макрокристалів алмазу з кімберлітів. Такі кристали ростуть, коли шари росту виникають біля їхніх ребер і вершин та не повністю розростаються в середину граней. Як приклад початку росту кристала від ребер, можна навести утворення мікрористалів CVD алмазу, коли на скупченні глобул спочатку зароджуються ледь помітні ребра октаедра алмазу, далі йде утворення його граней, а в подальшому при зниженні температури ростуть грані куба (рис. 2).

Таблиця 1. Морфологія кристалів алмазу та механізми їхнього росту

Тип алмазу	Прості форми кристалів	Габітус кристалів	Механізми росту кристалів
Мантіїний (кімберліти, лампроїти, лампрофіри)	$\{111\}$; $\{100\}$, $\{110\}$, різні $\{hhl\}$, $\{hkk\}$, $\{hkl\}$ і $\{hk0\}$ на мікрористалах	Октаедричний, кубічний, ромбододакаедричний, комбінаційний $\{111\}+\{110\}$, $\{111\}+\{110\}+\{100\}$ і $\{111\}+\{100\}$	Дислокаційний (спіральний), бездислокаційний (двомірний), нормальний (фібрильний), блоковий (адгезивний)
Мантіїний – метаморфічний (метаморфічні породи)	$\{111\}$, $\{100\}$, $\{110\}$	Октаедричний, кубічний, комбінаційний $\{111\}+\{110\}$, $\{111\}+\{110\}+\{100\}$ і $\{111\}+\{100\}$	Дислокаційний (спіральний), бездислокаційний (двомірний), нормальний (фібрильний), блоковий (адгезивний)
Мантіїний – офіолітовий (перидотити – хромітити)	$\{111\}$, $\{100\}$, $\{110\}$, $\{311\}$	Кубо-октаедричний, октаедричний	Дислокаційний (спіральний), бездислокаційний (двомірний)
Вулканогенний (продукти виверження сучасних вулканів)	$\{111\}$, $\{100\}$, $\{110\}$, $\{311\}$, $\{332\}$	Кубо-октаедричний, октаедричний	Дислокаційний (спіральний), бездислокаційний (двомірний)
НРНТ	$\{111\}$, $\{100\}$, $\{110\}$, $\{311\}$, $\{511\}$, $\{711\}$	Октаедричний, кубічний, комбінаційний $\{111\}+\{100\}$, $\{111\}+\{110\}+\{100\}$, $\{111\}+\{110\}+\{100\}+\{311\}$, тетрагонтриоктаедричний	Дислокаційний (спіральний), бездислокаційний (двомірний)
CVD	$\{111\}$, $\{100\}$, $\{110\}$	Октаедричний, кубічний, комбінаційний $\{111\}+\{100\}$	Дислокаційний (спіральний), бездислокаційний (двомірний), адгезивний
Імпактний, апографітовий (імпактні породи метеоритних кратерів)	$\{0001\}$, $\{10\bar{1}0\}$	Пінакоїдальний, призматично-пінакоїдальний	Мартенситний, перекристалізація,

Антискелетний спосіб утворення більшості кристалів природного алмазу яскраво свідчить про дислокаційний механізм їхнього росту. Додаткові свід-

чення такого механізму росту – це особливості мікротопографії граней октаедра – розвиток на них трикутних прямопаралельних віциналей росту та їхній частий поліцентризм, а також, як правило, численні оберненопаралельні трикутні западини на цих же гранях. Ці скульптури маркують місця розвитку дислокацій, якби замінюючи можливі видимі спіралі росту, тоді як виразні спіралі росту на гранях октаедра кристалів природного алмазу автору невідомі. Лише рідкісний випадок спірального росту зафіксовано автором для кубо-ромбододекаедра алмазу з кімберлітів (рис. 3, *a, б*), на якому проявлені спіраль росту на грані куба і численні нано-мікроблоки росту на гранях ромбододекаедра. При утворенні цього мікрокристала дивним чином поєдналися два механізми росту – спіральний і блоковий.

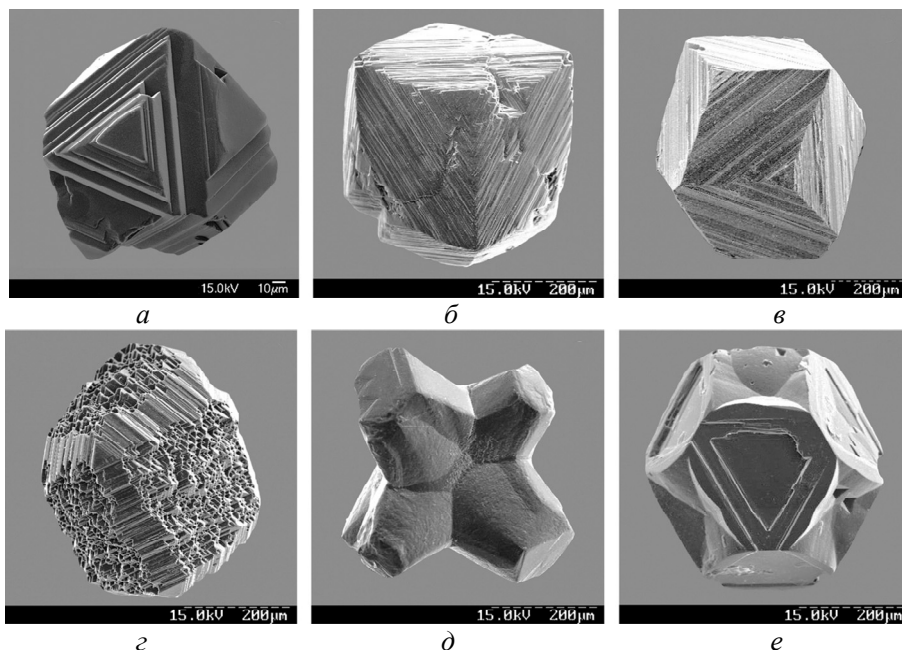


Рис. 1. Прояви антискелетного і скелетного росту на мікрокристалах алмазу з кімберлітів і розсіпів: *a* – октаедр з поступовим нашаруванням по (111); *б* – перехідна форма октаедр-ромбододекаедра; *в* – псевдоромбододекаедра; *г* – псевдокуб з мініатюрними гранями октаедра і псевдоромбододекаедра; *д* – скелетний кристал, що виник при виродженні граней октаедра; *е* – скелетний кристал з порожніми гранями октаедра і куба; *а–е* – мікроалмаз із неогенового розсіпу Самоткань на Українському щиті, *б–е* – мікроалмази з кімберлітів Якутії.

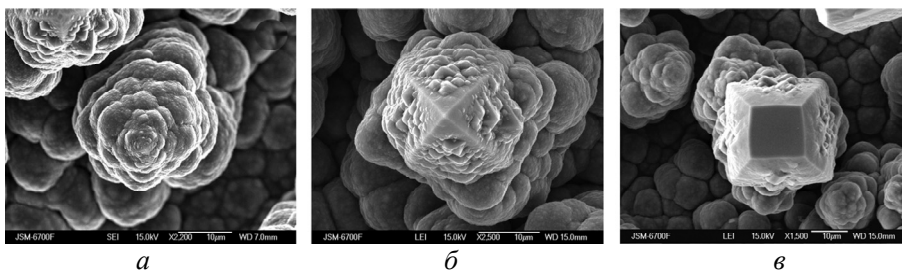


Рис. 2. Ріст поліедрів CVD алмазу: *a* – поява ребер октаедра на скупченні глобул; *б* – утворення граней октаедра; *в* – утворення грані куба.

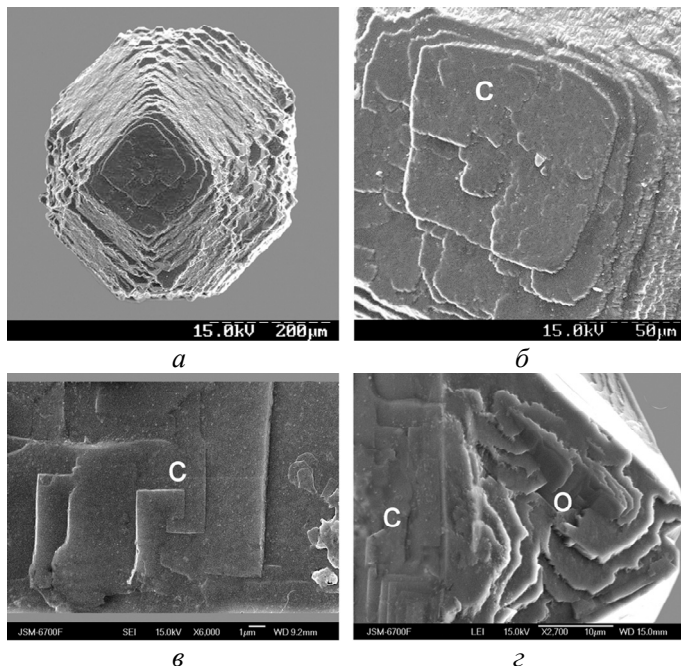


Рис. 3. Прояв спірального росту на кристалах алмазу різного походження: *а, б* – спіраль на грані куба с мікрокристалом з кімберлітів Якутії; *в, г* – спіралі на CVD мікрокристалі (*в* – на грані куба *с*, *г* – на грані октаедра *о*).

Дислокаційний (спіральний) ріст нарівні з бездислокаційним (двомірним) механізмом росту властиві штучним НРНТ і CVD алмазам. Особливо це характерно для НРНТ кристалів. Свідченням першого механізму росту є часті спіралі на гранях куба і октаедра кристалів цих штучних алмазів, а другого механізму росту – також часті скелетні грані куба і октаедра на кристалах НРНТ алмаза. На рис. 3, *в, г* показано спіралі росту на гранях куба і октаедра складного двійника кристалів CVD алмазу – п'ятигранника кубо-октаєдрів у вигляді “дипірамідально-призматичного” кристала. Грані октаедра і куба покриті декількома спіралями на кожній грані. Висота спіралей різна, на гранях октаедра вона більша. Симетрія спіралей відповідає площинній симетрії граней куба і октаедра.

Кристали мікроалмазів із порід офіолітів і вивержень сучасних вулканів Камчатки мають морфологію, властиву штучним НРНТ алмазам [2–4], та дещо відрізняються від морфології CVD алмазів більшим числом простих форм (рис. 4). Це плоскогранні кристали з гранями куба і октаедра, іноді з розвитком вузьких граней ромбододекаедра. На вулканогенних алмазах гоніометрично виявлено також другорядні форми $\{311\}$ і $\{332\}$. Вузькі грані форми $\{311\}$ видні на деяких кристалах офіолітових алмазів. Однак на кристалах офіолітових і вулканогенних алмазів поки що не зафіксовано характерні, але менш поширені форми НРНТ алмазів, такі як тетрагон-триоктаєдри $\{511\}$ і $\{711\}$. Все ж за морфологічними ознаками цих алмазів можна вважати, що механізмом їхнього росту такі ж, як для НРНТ алмазів – такі кристали виростили за дислокаційним (спіральним) і бездислокаційним (двомірним) механізмами. Плоскогранна кубо-октаєдрична морфологія офіолітових і вулканогенних алмазів, можливо, зумовлена включеннями різних металів та їхніх сплавів як каталізаторів такого росту кристалів. Зауважимо також, що плоскі грані куба

на кімберлітових алмазах є рідкістю, до того такі грані є другорядними і лише притуплюють вершини дрібних октаедричних кристалів [13].

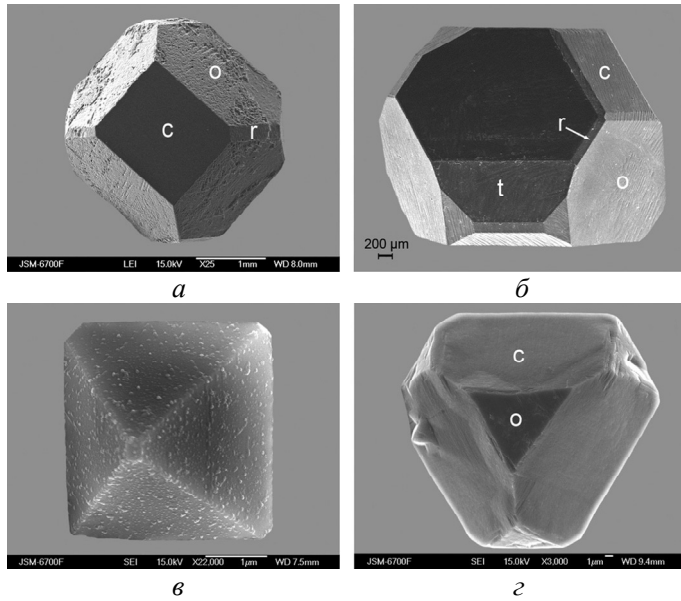


Рис. 4. Типові габітуси кристалів штучних алмазів: HPHT (а, б) і CVD (в, г) алмази; о – октаедр, с – куб, г – ромбододекаедр, т – тетрагонтриоктаедр {311}; синтезовано алмази в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України.

За нормальним (фібрильним, волокнистим) механізмом росте значна частина мантійного алмазу. На відміну від кімберлітових і лампроїтових алмазів, дрібні метаморфічні алмази характеризуються більшим розмаїттям форм кристалізації, що виростили за нормальним механізмом. Кристали фібрильного росту – це переважно куби і кубоїди (рис. 5). Кожне волокно нашаровується нано-мікроплощинами (111). Часто проявлена у зрізах кубів концентрична зональність по (100) є фронтом кристалізації сукупності волокон, а не пошаровим ростом кристала по (100). Іншими словами, ця зональність, яка паралельна сторонам куба не є пошаровим наростанням в напрямку піраміди росту $\langle 100 \rangle$, а є фронтом кристалізації волокнистої структури, іноді вона має хвилясту, звивисту агатову форму. Поверхня граней таких кристалів завжди горбиста. Статистично показано за даними інфрачервоної спектроскопії, що такі кристали, як правило з флюїдними включеннями води, збагачені водневими центрами на відміну від кристалів алмазу з безводними флюїдними включеннями, які виростили за спіральним і двомірним механізмами. Проте яким чином ці водневі центри сприяють фібрильному росту кубічних кристалів не з'ясовано. Можливо вони блокують площинне розростання граней октаедра.

Тільки незначна частина кристалів природного алмазу росте за блоковим механізмом росту. Найчастіше так ростуть деякі куби з кімберлітів [14] (рис. 6, а). Зовсім рідкісне явище злипання глобул в алмазні октаедри і октаедро-куби зафіксовано автором в метеоритному кратері Білилівка на Українському щиті [15], коли на поверхні імпаکتного апографітового алмазу наростили нано-мікрокристали глобулярних алмазних октаедрів (рис. 6, б). За механізмом злипання ростуть відносно рідкісні ксеноморфні кристали алмазу (рис. 6, в, г).

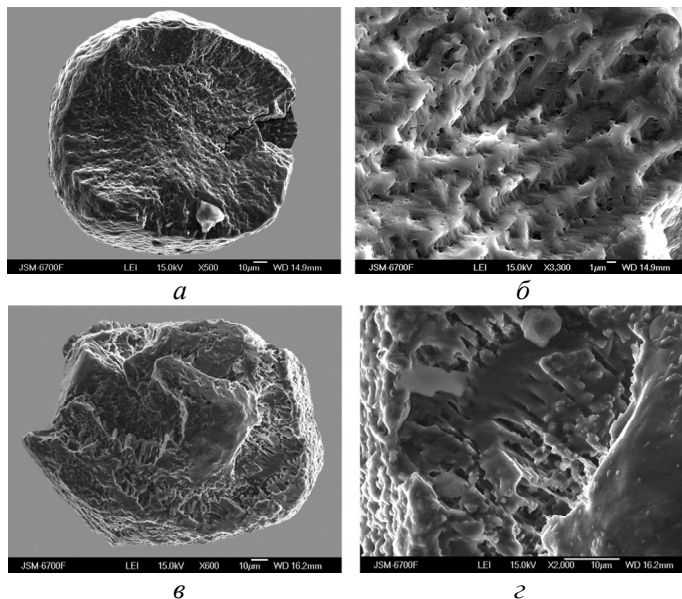


Рис. 5. Прояви нормального (фібрильного) росту кристалів алмазу: *а, б* – кубоїд та його волокниста внутрішня будова; *в, г* – мікроалмаз в облямівці, прояв двостадійного росту – масивна будова кристала під облямівкою і волокниста будова облямівки; мікроалмази з неогенового розсипу Самоткань на Українському щиті.

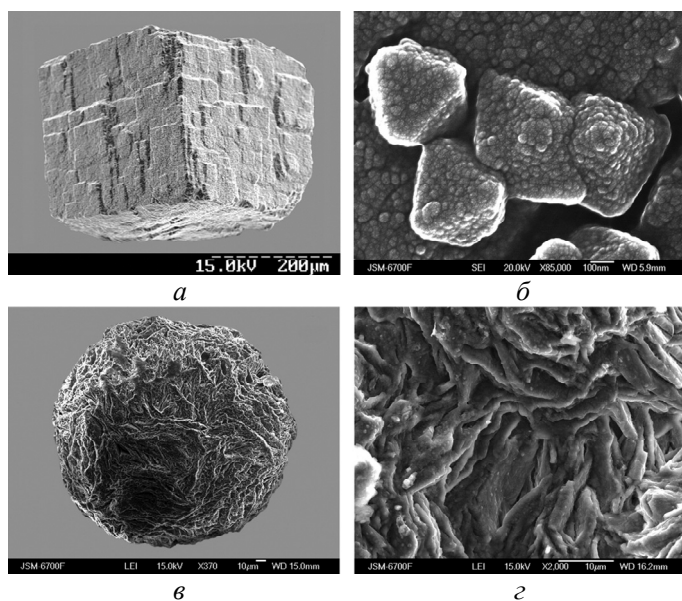


Рис. 6. Прояв блокового (адгезійного) росту на кристалах алмазу різного походження: *а* – ріст куба паралельними чотирикутними мікроблоками; *б* – ріст октаєдрів глобулами; *в, г* – ріст округлого зерна спотвореними волокнами; мікроалмази з кімберлітів Якутії (*а*), імпактітів метеоритного кратеру Білілівка на Українському щиті (*б*) та з неогенового розсипу Самоткань на Українському щиті (*в, г*).

Зовсім інші від полієдрів мантійного, метаморфічного, офіолітового, вулканогенного і штучного алмазу морфологія і механізм росту природних імпаکتних апографітових алмазів (рис. 7). Часто це двофазові чи трьохфазові кристали складаються із лонсдейліту, залишкового чи нового графіту і власне

алмазу. Такий алмаз утворюється внаслідок твердофазового переходу графітової структури в лонсдейліт і алмаз по мартенситному механізму. При так званому поздовжньому згині графітових шарів виникає структура лонсдейліту, а при їхньому гофруванні – структура алмазу [16]. Найбільш вагомими аргументами ударно-метаморфогенної природи такого імпаکتного алмазу є його апографітова морфологія, мікротопографія поверхні граней (0001) з новими скульптурами, багатофазовий склад (алмаз, лонсдейліт, графіт), закономірні структурні взаємовідношення цих фаз, ізотопний склад вуглецю та його відповідність складу вуглецю графіту з вміщувальних кратер кристалічних порід, вміст і склад домішок, специфічні фізичні властивості, теоретичні розрахунки і експериментальні дослідження з отримання такого алмазу. Відомі також імпактні аповугільні і апорослинні алмази, під назвами – тогорити і каріти відповідно [17, 18].

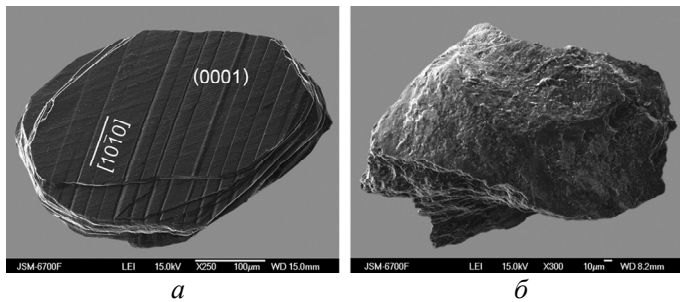


Рис. 7. Імпактні алмази: *a* – апографітовий алмаз із Попігайського кратеру, Сибір; *б* – апографітовий алмаз із місця Тунгуської катастрофи, Сибір.

Наведені приклади механізмів росту поліедрів і ксенокристалів алмазу майже повністю відповідають морфологічній концепції І. Сунагави про форми і особливості росту природного і штучного алмазу [19, 20], яку можна вважати генетичною (рис. 8). Вона ґрунтується на теоретичному аналізі швидкості росту кристалів алмазу в залежності від співвідношення рушійних сил кристалізації (пересичення, переохолодження, характеру поверхні росту – шорстка або гладка, а також механізму росту – дислокаційний спіральний, бездислокаційний двомірний і адгезивний). Ця розробка І. Сунагави претендує на застосування до будь-яких типів кристалів природного і штучного алмазу. Він виділив два умовних порогових рівні рушійних сил кристалізації – $\Delta\mu/KT^*$ і $\Delta\mu/KT^{**}$, при яких характер поверхні росту, механізм росту і, відповідно, морфологія кристалів виявляються різними. Передбачено, що коли цей рівень вище $\Delta\mu/KT^{**}$, то поверхня росту буде шорсткою, реалізується адгезивний механізм росту і тоді виникають дендритні форми, полікристали, а при подальшому зростанні рушійної сили кристалізації – і сфероліти. Нижче рівня $\Delta\mu/KT^{**}$ поверхня росту буде гладкою і між рівнями $\Delta\mu/KT^*$ та $\Delta\mu/KT^{**}$ працює механізм двомірного зародкоутворення переважно вздовж ребер кристалів, в результаті чого можуть утворюватися скелетні кристали або кристали з воронкоподібною будовою граней. Нижче рівня $\Delta\mu/KT^*$ єдиним механізмом росту кристалів є дислокаційний спіральний, ріст проходить на гладкій поверхні, при якому шари росту поширюються від центру до периферії граней. Так формуються поліедри з простими символами граней. Варіації габітусів кристалів визначаються відносними величинами нормальних швидкостей росту на певних гладких поверхнях.

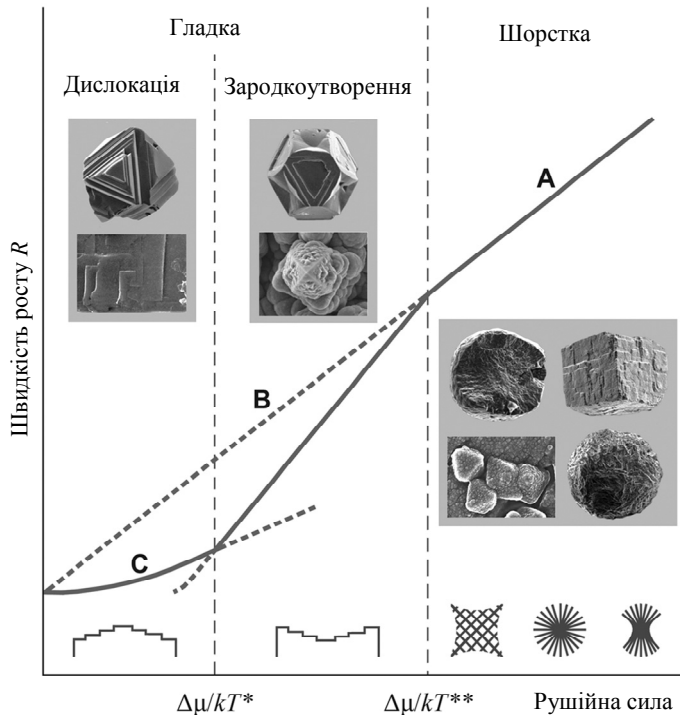


Рис. 8. Діаграма І. Сунагави з нанесеними нами кристалами алмазу різного механізму росту та походження.

На підставі такого теоретичного аналізу І. Сунагава розділив морфологію природного алмазу на три основні категорії. Перша категорія включає монокристали (октаедри, перехідні форми типу октаедр-ромбододекаедр та їхні зростки), які утворені в результаті спірального росту або за механізмом дво-мірного зародкоутворення під дією рушійної сили слабшою, ніж на рівні $\Delta\mu/kT^{**}$ і зазвичай слабшою, ніж на рівні $\Delta\mu/kT^*$. До другої категорії віднесені полікристалічні агрегати (борт, баллас і карбонадо), які утворені в умовах рушійних сил, що перевищують рівень $\Delta\mu/kT^{**}$. Ці алмази утворені по адгезивному механізму росту на шорсткій поверхні. До третьої категорії віднесено алмази (алмази в облямівках, кубоїди), що зазнали зміни умов (рушійних сил) кристалізації: спочатку вони росли як монокристали в умовах нижче $\Delta\mu/kT^*$, можливо нижче $\Delta\mu/kT^{**}$, а пізніше як полікристали в умовах вище $\Delta\mu/kT^{**}$. І. Сунагава проаналізував також характер топографії поверхонь росту алмазів, зокрема їх шорсткість, в залежності від умов росту. У силікатному середовищі росту мантійного алмазу тільки грані октаедра поведуться як гладкі поверхні, на яких має місце спіральний ріст. Грані куба з'являються тільки в умовах рушійних сил кристалізації вище $\Delta\mu/kT^{**}$, в силікатному середовищі магми вони поведуться як шорстка поверхня. На гранях $\{100\}$ відсутні спіральні шари росту, їхня поверхня шорстка або горбиста. На противагу цьому, на кристалах штучного алмазу, синтезованих в метал-вуглецевій системі, не тільки грань октаедра, а й грань куба може вести себе як гладка поверхня, що обумовлено поверхневою реконструкцією граней $\{100\}$ – відбувається перехід шорсткої грані куба К в гладку грань F. На думку І. Сунагани ця реконструкція поверхні відбувається в такому штучному розчині-розплаві, в якому металевий елемент як розчинник має невеликий іонний радіус, тоді як в природному силікатному розчиннику з великим

іонним радіусом цього не відбувається. Тому у штучних кристалах алмазу спостерігається спіральний ріст як на гранях октаедра, так і куба. Штучні НРНТ алмази, які вирощені в силікатному, карбонатному чи іншому середовищі без металів-розчинників набувають близьку до кристалів природного алмазу октаедричну форму [21]. В той же час застосування різних металів-розчинників приводить до зміни габітуса кристалів з характерного кубооктаедричного навіть на ромбододекаедричний і тетрагонтриоктаедричний. Однак причину появи штучних кристалів тетрагонтриоктаедричного, ромбододекаедричного чи комбінаційного габітуса типу $\{111\} + \{100\} + \{110\} + \{311\}$ точно не з'ясовано. Тим не менше для мікроалмазів існують деякі відхилення від концепції І. Сунагави, які добре проглядаються на кристалах мантійного алмазу. Так, наприклад, до протиріч можна віднести те, що на мікроалмазах із кімберлітів фіксуються плоскі грані куба та інших простих форм [13]. Чи, наприклад, спіральний ріст граней куба на мікрокристалі мантійного алмазу (див. рис. 3, а, б). Загалом можна відзначити таку тенденцію розвитку форм кристалізації алмазу з мантійних і метаморфічних порід: зі збільшенням глибини кристалізації форма кристалів алмазу спрощується до найбільш стабільної октаедричної форми росту. У цьому ж напрямку йде зменшення вмісту домішок азотних і водневих центрів та зростання вмісту ізотопу C^{12} у кристалах алмазу.

ВИСНОВКИ

Аналіз даних із мінералогічної кристалографії алмазу свідчить про те, що в природі реалізується два основних способи його кристалізації (вільний ріст – дифузійна кристалізація і у випадку імпаکتного алмазу примусовий ріст при ударному навантаженні – твердофазовий перехід графіту в алмаз) і кілька механізмів формування кристалів (дислокаційний – спіральний, бездислокаційний – двомірний, нормальний – фібрильний, волокнистий і блоковий – адгезивний для мантійного алмазу та перекристалізація для імпаکتного алмазу).

Версія кристалізації мантійного алмазу з флюїду у відносно вільному просторі (переважно в мікроскопічних порожнинах і тріщинах) може бути поясненням ідіоморфізму переважної більшості його утворень.

Не зовсім зрозуміла причина переважного антискелетного способу утворення октаедрів алмазу: чому грань кристала частіше формується від його центру, а не від ребра. Можливо, це зумовлено саме домінуючим дислокаційним механізмом росту кристалів алмазу.

Знаменно, що зі збільшенням розміру кристалів мантійного алмазу його огранення спрощується – кристал як правило покривається гранями октаедра. Таке “морфологічно розмірне” явище характерне для кристалів багатьох мінералів і штучних кристалів багатьох речовин – кристали збільшуються за рахунок росту структурно важливих граней.

Таким чином можна стверджувати:

- кристали мантійного алмазу з кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів ростуть переважно за дислокаційним механізмом, рідше за нормальним механізмом і зрідка за бездислокаційним двомірним;

- кристали метаморфічного алмазу ростуть переважно за нормальним механізмом, рідше за дислокаційним і зрідка за бездислокаційним двомірним механізмами;

- кристали штучного алмазу ростуть переважно за дислокаційним і бездислокаційним двомірним механізмами;

– кристали імпактного алмазу виникають при перекристалізації вуглецевої речовини внаслідок перебудови її структури під дією високого тиску і температури.

V. M. Kvasnytsya

Semenenko Institute of Geochemistry,

Mineralogy and Ore Formation,

National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Morphology and growth mechanisms of diamond crystals

On the example of the morphology of microcrystals of natural and synthetic diamonds, their growth mechanisms are demonstrated: dislocation (spiral), dislocation-free (two-dimensional), normal (fibril) and block (adhesive). These mechanisms are clearly manifested in the features of morphology and microtopography of polyhedra and xenocrystals of diamond. Most natural diamond crystals grow by dislocation and normal growth mechanisms, and synthetic diamond crystals grow by dislocation and two-dimensional growth mechanisms.

Keywords: diamond, crystal morphology, simple crystal forms, microtopography, growth mechanism.

1. Kaminsky F.V. Non-kimberlitic diamondiferous igneous rocks: 25 years on. *J. Geological Society of India*. 2007. Vol. 69, no 3. P.557–575.
2. Lian D., Yang J., Ophiolite-hosted diamond: A new window for probing carbon cycling in the deep mantle. *Engineering*. 2019. Vol. 5, no. 3. P. 406–420.
3. Dilek Y., Yang J.S. Ophiolites, diamonds, and ultrahigh-pressure minerals: New discoveries and concepts on upper mantle petrogenesis. *Lithosphere*. 2018. Vol. 10, no. 1. P. 3–13.
4. Гордеев Е.И., Силаев В.И., Карпов Г.А. Аникин Л.П., Васильев Е.А., Сухарев А.Е. Об истории открытия и природе алмазов в вулканических породах Камчатки. *Вестник Перм. ун-та. Геология*. 2019. Том 18, № 4. С. 307–331.
5. Litasov K.D., Kagi H., Voropaev S.A., Hirata T., Ohfuji H., Ishibashi H., Makino Y., Bekker T.B., Sevastyanov V.S., Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P. Comparison of enigmatic diamonds from the Tolbachik arc volcano (Kamchatka) and Tibetan ophiolites: assessing the role of contamination by synthetic materials. *Gondwana Research*. 2019. Vol. 75. P. 16–27.
6. Похиленко Н.П., Шумилова Т.Г., Афанасьев В.П., Литасов К.Д. Находки алмазов на Камчатке (вулканы Толбачик и Авачинский): природный феномен или контаминация синтетическим материалом? *Геология и геофизика*. 2019. Том 60, № 5. С. 605–618.
7. Безруков Г.Н., Бутусов В.П., Самойлович М.И. Синтетический алмаз. Москва: Изд-во “Недра”. 1976. 119 с.
8. Квасниця В.М., Квасниця І.В., Гурненко І.В. Особливості морфології кристалів CVD алмазу. *Мінерал. журнал (Україна)*. 2019. Том 41, № 2. С. 18–25.
9. Kvasnytsya V.M., Kvasnytsia I.V. Cyclic twins of CVD diamond crystals. *J. Superhard Mater.* 2019. Vol. 41, no. 6. P. 369–376.
10. Kvasnytsya V., Wirth R., Piazzolo S., Jacob D. E., Trimby P. Surface morphology and structural types of natural impact apographitic diamonds. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 2. P. 71–84.
11. Аншелес О.М. Вывод формы кристаллов алмаза на основе их атомного строения. *Доклады АН СССР*. 1955. Том 101, № 6. С. 1109–1112.
12. Аншелес О.М. Некоторые вопросы связи формы кристаллов с их строением. В кн.: Рост кристаллов. Москва: Изд-во АН СССР, 1957. С. 67–73.
13. Kvasnytsya V. Crystal forms of natural microdiamonds. *Diamond Relat. Mater.* 2013. Vol. 39, October. P.89–97.
14. Kvasnytsya V.M. Rare diamond microcrystals. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 6. P. 365–370.
15. Kvasnytsya V.M. Unusual nano-microcrystals of natural diamond. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 4. P. 229–235.
16. Курдюмов А.В., Пилянкевич А.П. Фазовые превращения в углероде и нитриде бора. Киев: Наук. думка. 1979. 188 с.

17. Езерский В.А. Метаморфизм углеродистого вещества горных пород в импактных кратерах: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Ленинград: ВСЕГЕИ, 1987. 16 с.
18. Shumilova T.G., Ulyashev V.V., Kazakov V.A., Isaenko S.I., Svetov S.A., Chazhengina S.Y., Kovalchuk N.S. Karite – diamond fossil: A new type of natural diamond. *Geoscience Frontiers*. 2020. Vol. 11, no. 4. С. 1163–1174.
19. Sunagawa I. Growth and morphology of diamond crystals under stable and metastable conditions. *J. Crystal Growth*. 1990. Vol. 99, no. 1–4. P. 1156–1161.
20. Sunagawa I. Crystals: Growth, Morphology, and Perfection. Cambridge Uni. Press. 2005. 308 p.
21. Пальянов Ю.Н., Сокол А.Г., Соболев Н.В. Экспериментальное моделирование мантийных алмазообразующих процессов. *Геология и геофизика*. 2005. Том 46, № 12. С. 1290–1303.

Надійшла до редакції 04.01.21

Після доопрацювання 04.01.21

Прийнята до опублікування 15.01.21