УДК 549.548.211

В. М. Квасниця

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України, м. Київ, Україна kvasnytsya@ukr.net

Аналіз гоніометрії скульптур на гранях кристалів природного алмазу

Узагальнено дані гоніометричного вивчення найпоширеніших скульптур поверхні кристалів природного алмазу. Ці скульптури складені з плоских мікроплощин, які виникають під час росту чи розчинення кристалів алмазу. Вони є складовою частиною їхньої поверхні і беруть безпосередню участь у створенні чи руйнуванні граней кристала алмазу. Розглянуто результати гоніометрії тригональної і дитригональної штриховок на місці ребер октаедра, прямо і обернено паралельних трикутних та шестикутних впадин на гранях октаедра, чотирикутних впадин на гранях куба, краплиноподібних горбиків і каверн на гранях додекаедроїда. Показано, що найпоширеніші мікроплощини скульптур кристалографічно відповідають простим формам, які часто мають великі символи і утворюють скупчення переважно навколо найважливіших структурних форм алмазу.

Ключові слова: алмаз, кристаломорфологія, гоніометрія, скульптури росту і розчинення, прості форми.

"There is only what can be measured" Max Planck

У нинішньому столітті поверхня граней кристалів природного алмазу дещо випала з інтересу досліджень, значна перевага надається вивченню речовини мінералу, його хімічного й ізотопного складу, твердих і багатофазових флюїдних включень, структурних та інших дефектів тощо. А проте саме поверхня зберігає важливу генетичну інформацію щонайменше про останні етапи в історії зростання алмазу, а також немаловажно, що вона є найбільш доступною для вивчення. Поверхня наочно віддзеркалює структуру мінералу та багато змін, які зазнав кристал алмазу.

На поверхні граней кристалів природного алмазу розвинуті самі різні скульптури, які тісно пов'язані з певними стадіями виникнення чи руйнування мінералу: ріст, розчинення і пластична деформація кристалів у мантії, розчинення у кімберлітових чи лампроїтових розплавах та абразійні зміни їхньої поверхні у випадку попадання кристалів у розсипи. Ці скульптури, особливо росту і розчинення, які розвинуті на гранях різних простих форм (октаедр, куб і ромбододекаедр) мають свою специфіку згідно площинної симетрії граней та механізму росту кристалів алмаза. Потрібно тільки зауважити, що грані октаедра, куба і ромбододекаедра на кристалах природного алмазу мають різне походження. Тільки грані октаедра на кристалах алмазу є справжніми ростовими, тобто зі своїми пірамідами росту. Грані куба можуть мати двояку природу – активного росту у разі фібрильного механізму і пасивного росту у разі тангенціального механізму у процесі виродження граней

© В. М. КВАСНИЦЯ, 2025

октаедра. Справжні грані ромбододекаедра на кристалах природного алмазу відсутні, це переважно форми розчинення. Такі ромбододекаедричні кристали мають округлі грані, тому називаємо їх додекаедроїдами. Зважаючи на плошинну симетрію граням октаедра властиві прямо і обернено паралельні трикутні впадини, шестикутні впадини і трикутні пірамідальні нарости, граням куба – чотирикутні впадини і блоки, а округлим граням ромбододекаедра – блоки, краплиноподібні горбики і каверни. На місці ребер октаедрів здебільшого розвинута тригональна чи дитригональна штриховка. Пластична деформація розвивається по площинам спайності кристалів алмазу (111) і виразно проявлена на октаедрах, кристалах перехідної форми {111}+{110} і додекаедроїдах. Скульптури абразії – це поодинокі чи чисельні різні переважно неправильні фігури вищерблення ребер і граней аж до повного заокруглення кристала алмазу. Часто на мікрорівні вони відкривають спайність кристала алмазу по (111). Окрім пластичної деформації майже всі поверхневі скульптури кристалів алмазу виникають на останній сталії їхнього росту чи розчинення, чи абразії.

Скульптури росту і розчинення найвиразніше розкривають механізм росту кристалів алмазу. Відомо, що кристал природного алмазу росте переважно площинами (111), під час його розчинення також відкриваються ці ж зовсім малі за розмірами площини. Однак, окрім цих мініатюрних площин (111), разом з ними впритул виникають інші різні мікроплощини, які також формують поверхні кристалів. Ці переважно плоскі і гладкі мікроплощини утворюються невідворотно на окрайках площин (111) під час росту чи розчинення останніх як їхнього притуплення, тобто як бокові стінки різних за товщиною нашарувань октаедричних площин. Відповідно вони відхиляються на різні кути від геометричного положення грані (111). У процесі росту кристала алмазу тангенціальна трансляція цих мікроплощин – бокових стінок октаедричних нашарувань, приводить власне до створення октаедричних граней.

Оскільки поверхневі елементи скульптур росту чи розчинення є геометрично виразними, тому їм можна надати кристалографічну характеристику за допомогою гоніометричних досліджень. Це дозволяє вияснити на мікрорівні за кристалографічними даними як саме будуються чи руйнуються грані (111), принаймні зрозуміти деякі деталі формування чи руйнування кристала алмазу стосовно його структури. Якими ж мікроплощинами росте і розчиняється октаедричний кристал алмазу?

ГОНІОМЕТРІЯ СКУЛЬПТУР НА КРИСТАЛАХ ПРИРОДНОГО АЛМАЗУ

У дослідників природного алмазу кристалографічна характеристика скульптур на їхніх гранях не знайшла належного вивчення та відповідного висвітлення, можливо, через певні труднощі проведення такого дослідження. Зазвичай у публікаціях дається тільки загальна характеристика їхньої форми, лише в декількох роботах геометрія скульптур представлена менш-більш детально. Так, візуальну характеристику скульптур різного походження на кристалах природного алмазу наведено у низці публікацій (наприклад, [4, 9, 11]) чи, наприклад, представлено розмір і гіпсометрію трикутних і шестикутних впадин на гранях октаедра [7], тоді як їхнє гоніометричне вивчення проведено небагатьма дослідниками [1, 3, 5, 6].

У даній роботі зроблено аналіз значних статистичних даних гоніометричних досліджень добре виражених скульптур росту і розчинення на кристалах алмазу із кімберлітів і розсипів Якутії, представлених у публікації [1]. У цих дослідженнях для вимірювань використано двоколовий гоніометр ГД-1. Розмір вивчених мікроплощин не було визначено, проте для отримання на гоніометрі відбитого якісного індивідуалізованого світлового відображення від окремої мікроплощини він не міг бути менше 100 мкм у поперечнику. Відхилення заміряних координат мікроплощин від теоретичних значень відповідних простих форм не перевищували ±2°.

Гоніометрично вивченими скульптурами стали тригональна і дитригональна штриховки на місці ребер октаедра, прямо і обернено паралельні трикутні впадини на гранях октаедра, шестикутні впадини на гранях октаедра, чотирикутні впадини на гранях куба (псевдокуба), краплиноподібні горбики і каверни на гранях додекаедроїда. Ідеалізовані зарисовки цих скульптур показано на рис. 1, а подібні реальні зображення більшості з них продемонстровано нижче на прикладі скульптур на мікрокристалах алмазу з розсипів України. Детальне з'ясування природи вище вказаних скульптур у даній статті не розглядали.



Рис. 1. Ідеалізовані зображення основних скульптур росту і розчинення на поверхні граней кристалів природного алмазу: тригональна штриховка (*a*) та дитригональна штриховка (*б*) на місці ребер грані октаедра, обернено паралельні трикутні (*в*), прямо паралельні трикутні (*г*) та шестикутні (*д*) впадини на грані октаедра, чотирикутні впадини на грані куба (*е*), краплиноподібні горбики і каверни на грані додекаедроїда (*є*).

Тригональна штриховка

Тригональна штриховка є найбільш поширеною скульптурою кристалів природного алмазу. Розвинута на місці ребер [101] ламінарних октаедричних, перехідних {111}+{110}, псевдокубічних і ромбододекаедричних кристалів

алмазу, вона є результатом їхнього росту тригональними шарами різної товщини (див. рис. 1, a та 2, a), що поступово зменшуються за площею розвитку. Так виникають опуклі, рідше майже плоскі і увігнуті циліндричні ступінчаті поверхні на місці близькому до геометричного положення ромбододекаедра. В табл. 1 показано результати гоніометричних замірів плоских паралельних ділянок таких поверхонь октаедрів, які є торцями тригональних шарів росту. Геометрично ці ділянки відповідають місцю різних тригон-триоктаедрів і зрідка ромбододекаедру.

Скульптури	Прості форми			
на поверхні	тригон-	тетрагон-	тетрагексаедри	гексоктаедри
кристала	триоктаедри <i>hhl</i>	триоктаедри hkk	hk0	hkl
	Скульп	гури на місці ребер (октаедра	
Тригональна	998, 887, 776 , 665,	_	_	_
штриховка	554 , 332, 221 ,552,			
	331, 441, 551, 991			
Дитригональна	998, 887, 776, 554,	113, 112, 223, 334,	150, 140, 130,	897, 675, 896, 785,
штриховка	775 , 332, 221, 331 ,	556, 667, 889	250, 120, 230 ,	895, 894, 783, 231,
	551, 991		570, 340, 450 ,	893, 672, 341, 251,
			560, 670, 890	351, 892, 891
	Скул	ыптури на гранях ок	гаедра	
Стінки оберне-	998, 776, 775 , 332,	_	_	_
но паралельних	221, 331, 441, 551,			
трикутних	661 , 991			
впадин				
Стінки прямо	998, 776, 554	112, 447, 335, 558,	_	_
паралельних		223, 557, 334, 779,		
трикутних		445, 556, 667, 778,		
впадин		889		
Стінки	998, 776, 332, 221 ,	115, 113, 112, 447,		
шестикутних	331, 441 , 551, 991	558 , 223, 557 , 334,		
впадин		667, 889		
Скульптури на гранях куба				
Стінки	_	119, 115, 113, 112 ,	190 , 150, 130,	_
чотирикутних		558 , 223 , 334, 445 ,	370, 120, 230	
впадин		667		
Скульптури на гранях додекаедроїда				
Стінки крапли-	997, 332, 553		450, 780, 890	_
ноподібних				
горбиків				
Стінки каверн	665, 332, 221, 552 .	113, 112, 334, 779	_	_
	331 , 551, 991			

Таблиця 1. Гоніометрія скульптур	на кристалах ал	мазу із кімберлітів
і розсипів		

Примітка. Найбільш поширені форми виділено жирним шрифтом.

Дитригональна штриховка

Дитригональна штриховка утворює випуклі округлі поверхні умовного ромбододекаедра на місці ребер [101] і характерна для кристалів перехідної форми {111}+{110} (див. рис. 1, б та 2, б), зрідка ці поверхні є увігнутими. Гострий кут дитригонів мінливий, у міру поступового нашарування кристала він збільшується і зменшені октаедричні грані набувають щитоподібної чи овальної форми. Ступінь ламінарної будови поверхонь {110} таких кристалів коливається в широких межах – від грубо- до тонкошарових індивідів, шарувату будову яких можна виявити лише під мікроскопом. Загалом такі поверхні фіксують якби незавершений етап переходу плоскогранного октаедра в округлий ромбододекаедр і геометрично є місцем різних простих форм: ромбододекаедра, тригон- і тетрагон-триоктаедрів, гексоктаедрів і тетрагексаедрів (див. табл. 1). Питання про походження дитригональної штриховки тривалий час було дискусійним: вона є утворенням росту чи розчинення? Нині вона отримана багатьма дослідниками експериментально у процесі розчинення кристалів алмазу.



Рис. 2. Тригональна (*a*) і дитригональна (б) штриховки на октаедричних мікрокристалах алмазу.

Обернено паралельні трикутні впадини

Обернено-паралельні трикутні впадини є поширеними скульптурами. Розвинуті на гранях октаедра, для цих скульптур характерно зворотне орієнтування відносно контурів граней октаедра. За розмірами вони варіюють від дрібних утворень, помітних лише під електронним мікроскопом, до великих, які можна побачити неозброєним оком. Це поодинокі плоскодонні впадини чи тригранні піраміди, розмірами майже на половину грані, і групи, які часто покривають всю грань (див. рис. 1, e та 3, a), або розвинені у вигляді ланцюжків уздовж смуг пластичної деформації. Плоскі тонкошаруваті чи дещо ступінчаті стінки трикутних впадин геометрично відповідають місцю різних тригон-триоктаедрів (див. табл. 1), зрідка ромбододекаедра.

Прямо паралельні трикутні впадини

Контури прямо паралельних трикутних впадин і граней октаедра збігаються. Ці впадини є беззаперечними скульптурами розчинення. Кристали алмазу із такими скульптурами на гранях октаедра є рідкісними. Це переважно октаедри і кристали перехідної форми $\{111\}+\{110\}$. Скульптури – це плоскодонні фігури чи впадини у вигляді тригранних пірамід. Простежена така послідовність розчинення кристалів з утворенням таких впадин: спочатку грані $\{111\}$ покриваються згідно орієнтованими з їхніми контурами трикутними впадинами (див. рис. 1, c та 3, δ), розміри яких надалі збільшуються; потім вони якби зливаються, з утворенням характерного паралелепіпедально-

го візерунка. Стінки впадин геометрично є місцем різних тетрагонтриоктаедрів (див. табл. 1). Водночас відбувається зрізання октаедричних граней у ребер і на їхньому місці виникають грубо скульптуровані поверхні тригон-триоктаедра. У випадку притуплення тригональних контурів впадин виникають мікростінки (початок розвитку гексагональних впадин), які відповідають різним тригон-триоктаедрам.



ß

Рис. 3. Обернено паралельні (*a*) і прямо паралельні (*б*) трикутні впадини на грані октаедрів та чотирикутні впадини на грані куба (*в*) мікрокристалів алмазу.

Шестикутні впадини

Шестикутні впадини є якби поєднанням обернено і прямо паралельних трикутних впадин і властиві граням октаедра. Такі впадини виникають у процесі притуплення кутів обернено-паралельних трикутних впадин ступінчастими поверхнями, обумовлюючи в плані їхню чотирьох-, п'яти- і шестикутну форму та різну довжину сторін (див. рис. 1, ∂). Рідше трапляються симетрично розвинені шестигранні негативні зрізані пірамідки, що мають ламінарну будову стінок і плоске дно. Стінки шестикутних впадин, які відповідні стінкам обернено-паралельних трикутних впадин, які відповідні стінкам обернено-паралельних трикутних впадин, характеризуються тими самими геометричними особливостями, що й зазначені вище — тобто набором різних тригон-триоктаедрів. Інші ступінчасті поверхні кристалографічно є геометричним місцем різних тетрагон-триоктаедрів (див. табл. 1).

Чотирикутні впадини

Чотирикутні впадини є звичайними скульптурами на поверхнях граней куба, де їхні сторони утворюють з ребрами кристала кути 45° (див. рис. 1, *е* та 3, *в*). Вони розвинуті не лише на кубічних кристалах, а й звичайні на крис-

талах іншого габітусу на виходах осі [100] у вигляді поодиноких впадин та їхніх груп. Впадини поділяються на пірамідки з гладкими стінками, що зовні нагадують негативні октаедри, і на поглиблення з тонколамінарними стінками, нерідко з плоским дном. Гладкі стінки таких пірамідок геометрично частіше відповідають граням {111}. Ступінчасті стінки є геометричним місцем різних тетрагон-триоктаедрів (див. табл. 1). Східчасті вузькі поверхні, що притупляють кути чотирикутних впадин є геометричним місцем тетрагексаедрів, іноді ромбододекаедра.

Краплиноподібні горбики

Краплиноподібні горбики є характерними для округлих кристалів алмазу - додекаедроїдів (див. рис. 1, є та рис. 4). Це різні за величиною і рельєфністю краплеподібні виступи чи асиметричні трикутні пірамідки, по видовженню витягнуті вздовж довгих діагоналей ромбів – округлих граней {110}. Багато таких пірамідок має у плані форму рівнобедреного сферичного трикутника, гостра вершина якого спрямована перпендикулярно шву грані ромба, рідше – форму еліпса чи овалу. Горбики, що розташовані посередині граней {110} є найбільш симетричними. У разі наближення до виходів осей третього порядку ([111] – L₃) їхня симетрія спотворюється, що виражається в різній площі їхніх бічних мікростінок. Останні є відносно плоскими чи округлими, відокремлені між собою прямо- чи криволінійними ребрами. Нерідко простежується ламінарна будова горбиків. Гоніометрично для великих горбиків виявлено, що їхні мікростінки, які звернені до осі [111] наближаються до положення грані октаедра і часто відповідають різним тригон-триоктаедрам (див. табл. 1). Мікростінки горбиків, які звернені до виходів осей четвертого порядку ($[100] - L_4$), за своїм геометричним місцем є різними тетрагексаедрами. Нерідкими є також горбики овальної видовженої форми, на яких окремі мікростінки не виражені (див. рис. 4, б).



Рис. 4. Пірамідальні горбики на поверхні граней додекаедроїда мікрокристала алмазу (a) і візерунок видовжених краплиноподібних горбиків на грані додекаедроїда мікрокристала алмазу (δ).

Каверни

Каверни — це рідкісні скульптури, вони властиві ромбододекаедричним граням округлих кристалів алмазу (див. рис. 1, ϵ). Візуально це овальні або еліпсовидні впадини, що розташовані без будь-якого помітного орієнтування; їхній розмір коливається у широких межах. Їх також можна розглядати як проекції трикутних чи шестикутних впадин на округлі поверхні додекаедрої-

да. Можна виділити такі різновиди каверн: неправильної, овальної або еліпсоподібної форми з гладкими стінками; такої ж форми, але з чітким штрихуванням на стінках. Останні розкривають ламінарні зони кристалів. Гоніометричні дослідження показують, що найпоширенішими формами стінок каверн є тригон-триоктаедри, менш поширені – тетрагон-триоктаедри. Імовірно додекаедроїди з кавернами зазнали дві стадії розчинення – спочатку утворення впадин на октаедричних гранях, а потім перетворення цих граней в округлі форми.

Зауважимо, що проведені численні експерименти з розчинення кристалів природного алмазу показують, що в залежності від умов дослідів (склад середовища, тип розчинника, р. Т-параметри та ін.) можна отримати практично більшість форм і скульптур, таких що виявлено на його кристалах. Так, наприклад, у процесі розчинення плоскогранних октаедрів алмазу у водомістких силікатних розплавах за високих температур і тиску отримані морфологічні аналоги напівкруглих і округлих індивідів природного адмазу, а також такі скульптури, як дитригональна штриховка, краплиноподібні горбики, шов грані (110), диски та різні впадини. Питання про походження оберненопаралельних впадин на гранях октаедра довгий час було гостро дискусійним, нині більшість дослідників вважає їх скульптурами розчинення, а не росту. Їх було отримано експериментально у процесі розчинення октаедрів алмазу, вони виникають на місці дислокацій в кристалі. Прямо паралельні трикутні впадини на гранях октаедра, чотирикутні впадини на гранях куба і краплиноподібні горбики і каверни на гранях ромбододекаедра також відносяться до скульптур розчинення. Форма краплиноподібних горбиків залежить від ступеня розчинення поверхні кристала. На думку автора, каверни – це якби зрізані під час утворення округлих поверхонь обернено-паралельні трикутні і шестикутні впадини граней октаедра. Невідомо тільки, де кристали алмазу зазнають такого розчинення – в мантійному материнському середовищі утворення алмазу чи у кімберлітовому розплаві. Тільки тригональна штриховка відноситься до форм росту, хоча також отримана під час розчинення кристалів алмазу.

Скульптури синтетичних НРНТ алмазів

На кристалах синтетичного алмазу також звичайними є скульптури розчинення. Як відомо, типовими ростовими гранями кристалів такого алмазу є октаедр і куб. На гранях октаедра часто розвинуті обернено і прямо паралельні трикутні впадини, а на гранях куба – чотирикутні впадини [2] (рис. 5). Гоніометрична характеристика цих скульптур відсутня. Візуально ці скульптури є подібними до аналогічних скульптур на кристалах природного алмазу, однак залежно від умов синтезу можуть мати свої особливості. Наприклад, незвичайними є шестикутні впадини на грані октаедра, їхні стінки впадин представлені різними за розвитком тригон- і тетрагон-триоктаедрами навколо каналів розчинення (див. рис. 5, δ).

ОБГОВОРЕННЯ

Константуємо, що заміряні мікроплощини вивчених скульптур на поверхні граней кристалів алмазу за геометричним положенням відповідають різним простим формам. Із гоніометрично охарактеризованих вище скульптур найвиразніше вказують на особливості росту і розчинення кристалів природного алмазу трикутна штриховка, обернено і прямо паралельні трикутні впадини, шестикутні і чотирикутні впадини та краплиноподібні горбики. Саме для цих скульптур отримано точні гоніометричні дані. Вони дозволяють відтворювати якими саме мікроплощинами ростуть чи розчиняються грані октаедра алмазу. Всі вони стосуються тангенціального (спірального чи двовимірного зародження) механізму росту кристалів алмазу.



Рис. 5. Скульптури розчинення на гранях кристалів синтетичного НРНТ алмазу [2]: обернено паралельні трикутні і шестикутні впадини на грані октаедра (a, δ ; δ – деталізація впадин на a), прямо паралельні трикутні впадини на грані октаедра (b), чотирикутні впадини на грані куба (c).

З аналізу гоніометричних даних про ці прості форми важливо отримати відповіді на ряд питань про їхні особливості. Які з них є найчастішими? Яким структурним формам вони відповідають і які з них є найважливішими, а саме як залежить поява виявлених форм від структури кристала алмазу? На який кут від положення основної ростової грані октаедра чи інших структурно важливих форм відхиляються другорядні мікроплощини?

Тригон-триоктаедри

Ці форми (табл. 2), що характеризують мікроплощини стінок тригональної штриховки і обернено паралельних трикутних впадин на октаедрах та краплиноподібних горбиків додекаедроїдів, мають близькі геометричні характеристики. Тобто, стінки імовірного росту першої скульптури і стінки імовірного розчинення двох других скульптур мають майже ті самі символи. Серед цих форм найчастішими є {998}, {887}, {776}, {554}, {775}, {221}, {331}, {441}, {661} і {991}. Вони утворюють малі кути (до 5°) як з гранню (111), так і з такими структурно важливими формами як {331}, {332}, {221} і {551}. Серед них трапляються власне структурно важливі форми, такі як {331},

{332}, {221}, {551} і {553}. Проте більшість найчастіше проявлених форм не є структурно важливими, вони мають великі символи. Вони ж розташовуються поблизу вище вказаних структурно важливих форм та октаедра.

	Полярна	Тригон-триоктаедри			Структурно
Форма	координата	тригональна	обернено паралельні	краплино-	важливі
	форми	штриховка	трикутні впадини	подібні горбики	форми
111	54° 44'	-	+	_	111
998	57° 51'	+	+	_	
887	58° 15'	+	-	_	
776	58° 47'	+	+	_	
665	59° 29'	+	_	_	
554	60° 30'	+	-	_	
997	61° 11'	-	_	+	
775	63° 12'	-	+	_	
332	64° 45'	+	+	+	332
553	67° 00'	_	-	+	553
221	70° 31'	+	+	_	221
552	74° 12'	+	-	_	
331	76° 44'	+	+	_	331
441	79° 58'	+	+	_	
551	81° 57'	+	+		551
661	83° 16'	-	+	_	
991	85° 30'	+	+	_	
110	90° 0'	+	_	_	110

Таблиця 2. Порівняння розвитку	тригон-триоктаедрів на різних
скульптурах	

Найголовніше з отриманих даних є те, що тригон-триоктаедри росту (тригональна штриховка) і тригон-триоктаедри розчинення (впадини) октаедрів майже збігаються за геометричним положенням. До них близькі за кутовими значеннями тригон-триоктаедри краплиноподібних горбиків на округлих гранях додекаедроїдів. Тобто існує певна закономірність у виникненні тригонтриоктаедрів.

Тетрагон-триоктаедри

Ці форми, що характеризують мікроплощини стінок шестикутних впадин і прямо-паралельних трикутних впадин на гранях октаедра та чотирикутних впадин на гранях куба також мають близькі геометричні характеристики. Серед тетрагон-триоктаедрів найчастішими є {112}, {558}, {223}, {557}, {445} і {667}. Відносно багато структурно важливих форм таких як {112}, {113}, {115} і {334} характеризують стінки чотирикутних впадин. Більшість тетрагон-триоктаедрів групується навколо структурно важливих форм, таких як {334}, {112} і {111} (табл. 3).

Тетрагексаедри

Це рідкісні форми, вони не характерні для скульптур граней кристалів алмазу. Вони найбільш виразні на краплиноподібних горбиках граней додекаедроїда, де найчастіше вони представлені: {450}, {780}, {890}. За геометричним положенням вони наближені до місця граней ромбдодекаедра.

	Полярна	Тетрагон-триоктаедри			Структурно
Форма	координата	прямо паралельні	шестикутні	чотирикутні	важливі
	форми	трикутні впадини	впадини	впадини	форми
001	0° 0'	_	-	+	001
119	8° 56'	_	-	+	
115	15° 47'	-	+	+	115
113	25° 14'	-	+	+	113
112	35° 16'	+	+	+	112
447	38° 56'	+	+	-	
335	40° 19'	+	-	-	
558	41° 28'	+	+	+	
223	43° 19'	+	+	+	
557	45° 17'	+	+	-	
334	46° 41'	+	+	+	334
779	47° 43'	+	-	-	
445	48° 31'	+	-	+	
556	49° 41'	+	-	-	
667	50° 28'	+	+	+	
778	51° 23'	+	-	-	
889	51° 30'	+	+	-	
111	54° 44'	-	+	+	111

Таблиця 3. Порівняння розвитку тетрагон-триоктаедрів на різних скульптурах

Гексоктаедри

Це найменш виразні форми, мікроплощини яких мають нечіткі границі, оскільки вони розвинуті на округлих поверхнях. Тому їхні особливості не були проаналізовані. В цю ж категорію форм на додекаедроїдах попадають не тільки гексоктаедри, а й різні тригон- і тетрагон-триоктаедри та тетрагексаедри, оскільки заміряні на відносно округлих поверхнях. Всі разом вони відображають певну кривизну цих поверхонь.

Підкреслимо, що всі гоніометрично охарактеризовані скульптури пов'язані з тангенціальним механізмом росту – спіральний чи двовимірний механізм росту граней октаедра. Аналіз отриманого гоніометричного матеріалу свідчить, що розподіл виявлених форм не підпорядковується закону Браве: немає прямої кореляції між ступенем їхньої поширеності, з одного боку, і ретикулярної щільністю – з іншого (табл. 4). Немає також зв'язку між ступенем поширеності форм і структурними напрямками міцного зв'язку PBCs (Periodic Bond Chains - періодичні ланцюжки зв'язку) [10], що лежать в їхніх площинах. Загалом табл. 4 доводить відому тенденцію зменшення ретикулярної щільності площин зі збільшенням індексів площин. Відповідно, площини більшості заміряних форм з великими індексами мають низьку ретикулярну щільність. Отже, вони за цим показником належать до не структурно важливих форм. Якщо проаналізувати набір і поширення вивчених мікроплощин скульптур і різних мікрограней на дрібних октаедрах алмазу [8], то у багатьох випадках вони майже близькі за кутами або одні і ті ж. Тобто переважно ці структурно другорядні форми мають майже однаковий характер розподілу на кристалах алмазу.

Структурно важливі	Ретикулярна щільність	Найчастіші заміряні
форми	площин	форми
110	1,414	111, 110
111	1,154	
100	1,0	
	Тригон-триоктаедри	
331	0,458	998, 887, 776, 554, 775, 221, 331,
332	0,426	441, 661, 991
221	0,333	
551	0,282	
553	0,260	
	Тетрагон-триоктаедри	I
112	0,816	112, 558, 223, 557, 445, 667
113	0,604	
114	0,472	
115	0,384	
334	0,343	
	Гексоктаедри	
231	0, 534	897, 894
341	0,392	
251	0,366	
351	0,338	
	Тетрагексаедри	
130	0,632	450, 780, 890
120	0,447	
150	0,392	

Таблиця 4. Структурно важливі форми алмазу, ретикулярна щільність їхніх площин та найчастіші заміряні форми

ВИСНОВКИ

Розглянуто кристалографію найбільш поширених скульптур на поверхні кристалів природного алмазу, які найвиразніше відображають переважно останній період в історії виникнення алмазу як мінералу – особливості росту чи розчинення його кристалів. Це такі скульптури: тригональна і дитригональна штриховки, прямо і обернено паралельні трикутні, чотирикутні та шестикутні впадини, краплиноподібні горбики і каверни. Всі вони розкривають тангенціальний механізм росту кристалів алмазу (спіральний чи двовимірного зародження). Із аналізу результатів гоніометричного вивчення вказаних скульптур на поверхні кристалів алмазу із кімберлітів і розсипів витікають наступні висновки:

На поверхні октаедрів алмазу найчастіше проявляються у вигляді плоских вузьких смужок ті мікроплощини скульптур, що становлять одна з одною малі кути і, зазвичай, характеризуються великими символами. Вони ж утворюють малі кути зі структурно важливими формами, тобто групуються навколо них. Більш рідко виникають мікроплощини, які належать до структурно важливих форм;

Найбільш поширена скульптура кристалів – трикутна штриховка, представлена мікроплощинами, які відповідають різним переважно структурно другорядним тригон-триоктаедрам. Водночас серед них є тригон-триоктаедри, які належать до структурно важливих форм. Тригон-триоктаедри цієї штриховки відносимо до ростових форм. Фактично кристал природного алмазу росте двома основними формами – октаедром і різними тригон-триоктаедрами. Грань октаедра розростається тангенціально тригон-триоктаедрами.

Під час розчинення октаедрів алмазу у разі утворення прямо- і оберненопаралельних трикутних впадин на їхніх гранях виникають мікроплощини (111) у супроводі мікроплощин різних тригон-триоктаедрів і тетрагон-триоктаедрів. Ці форми розчинення утворюють переважно малі кути з гранню (111) та іншими структурно важливими формами;

Чотирикутні впадини характерні для поверхонь граней псевдокубів, тобто кристалів утворених у процесі виродження граней октаедра. Їхні стінки впадин представлені мікроплощинами октаедра і різних тетрагон-триоктаедрів. Ці тетрагон-триоктаедри і тетрагон-триоктаедри шестикутних впадин на гранях октаедра мають близькі символи, а також їхні кутові значення часто збігаються. За геометричним положенням дещо відрізняються тетрагон-триоктаедри прямо-паралельних трикутних впадин. Поширені тетрагон-триоктаедри всіх скульптур утворюють малі кути зі структурно важливими формами або належать до них;

Октаедричні грані кристала природного алмазу ростуть тангенціально переважно мікроплощинами, які відповідають різним вище перерахованим тригон-триоктаедрам. Вони ж розчиняються мікроплощинами різних тригоні тетрагон-триоктаедрів. Поява у разі розчинення кристалів тетрагон-триоктаедричних мікроплощин свідчить також про їхню можливу участь у процесі росту граней октаедра. Під час утворення округлих поверхонь ромбододекаедра основну роль відіграють різні гексоктаедри. На таких кристалах алмазу домінують скульптури розчинення різного ступеня розвитку.

> V. M. Kvasnytsya Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine Analysis of the goniometry of sculptures on the faces of natural diamond crystals

The data of the goniometric study of the most common surface sculptures of natural diamond crystals are summarized. These sculptures are composed of flat micro-planes that occur when diamond crystals grow or dissolve. They are a constituent part of their surface and take a direct part in the creation or destruction of diamond crystal faces. The results of the goniometry of trigonal and ditrigonal sheaf-like hatchings on the edges of the octahedron, straight and inverted-parallel trigonal and hexagonal pits on the faces of the octahedron, quadrilateral pits on the faces of the cube, drop-like hillocks and caverns on the faces of the dodecahedron are considered. It is shown that the most common micro-planes of the sculptures crystallographically correspond to simple crystal forms, which often have large symbols and form clusters mainly around the most important structural forms of diamond.

Keywords: diamond, crystal morphology, goniometry, growth and dissolution sculptures, simple crystal forms.

- 1. Бартошинский З.В., Квасница В.Н. Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. Киев: Наук. думка, 1991. 172 с.
- Квасниця В.М., Івахненко С.О., Ільницька Г.Д., Супрун О.М., Лисаковський В.В., Коваленко Т.В., Бурченя А.В. Фігури розчинення на кристалах монокристалів алмазів, отриманих в області термодинамічної стабільності. *Інструментальне матеріалознавство*. 2022. Вип. 25. С. 133–143.
- 3. Кухаренко А.А. Алмазы Урала. Москва: Госгеолтехиздат, 1955. 515 с.

- 4. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. Москва: Наука, 1984. 170 с.
- 5. Ракин В.И. Морфология алмазов уральского типа. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 396 с.
- Шафрановский И.И. Кристалография округлых алмазов. Ленинград: Изд-во Ленинград. ун-та, 1948. 132 с.
- Fedortchouk Y., Li Zh., Chinn I., Fulop A. Geometry of dissolution trigons on diamonds: Implications for the composition of fluid and kimberlite magma emplacement. *Lithos.* 2024. Vol. 470–471, art. 107526.
- Kvasnytsya V. Crystal forms of natural microdiamonds. *Diam. Relat. Mater.* 2013. Vol. 39. P. 89–97.
- 9. Harris J.W., Smit K.V., Fedortchouk Y., Moore M. Morphology of monocrystalline diamond and its inclusions. *Rev. Mineral. Geochem.* 2022. Vol. 88, no. 1. P. 119–166.
- 10. Hartman P. The non-uniform distribution of faces in a zone. Z. Krist. 1965. Vol. 121. P. 78-80.
- 11. Tappert R., Tappert M.C. Diamonds in Nature: A Guide to Rough Diamonds (Chapter 4. The surface textures of diamonds). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. P. 71–90.

Надійшла до редакції 25.10.24

Після доопрацювання 25.10.24

Прийнята до опублікування 30.10.24