

УДК 548.571+548.21

МОЗАІЧНА БУДОВА КРИСТАЛІВ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОЗЩЕПЛЕНИХ І СКРУЧЕНИХ ІНДИВІДІВ

І. Бакуменко

*Львівський національний університет імені Івана Франка
79005 м. Львів, вул. Грушевського, 4
E-mail: geomin@geof.franko.lviv.ua*

Розглянуто морфологічні особливості й умови утворення різних типів автодеформованих кристалів з невпорядковано- і впорядковано-мозаїчною будовою. Детальніше описано особливості зігнутих, скручених і розщеплених кристалів. Наведено інформацію про вплив різних чинників, які спричинюють утворення таких кристалів.

Ключові слова: мозаїчні кристали, розщеплені і скручені кристали, сферокристали, згин кристалів.

У підручниках та інших публікаціях Є.К. Лазаренка та його учнів приділено значну увагу різним аспектам кристалогенезу, типоморфізму і кристаломорфології не тільки поширених монокристалічних **мікродефектних** кристалів (плоскогранних, поліцентричних, скелетних, антискелетних та ін.), а й **макродефектних** неправильно-мозаїчних (блокових) і впорядковано-мозаїчних (розщеплених і скручених кристалів). Макроблокова (мозаїчна) будова кристалів може бути пов'язана з зовнішніми післяростовими деформаціями і з автодеформаціями (за Ю.О. Пуніним [13, 14]), які розвиваються в процесі росту кристалів. Ми розглянемо лише ростові явища, переважно особливості кристаломорфології різних типів зігнутих, скручених і розщеплених кристалів (рис. 1–5) та фактори, які спричинюють їхнє утворення.

Морфологія цих деформованих утворень тісно пов'язана з особливостями обрису монокристалів. Залежно від характеру анізотропії швидкостей росту монокристали можуть розростатись у вигляді майже одновимірних віскерсів (вусів, волокон, ниткоподібних кристалів), двовимірних тонких ламелей (стрічок або пластинок) і об'ємних кристалів з добре виявленою тривимірною секторіальністю. Під час росту в них часто розвиваються напруження (автодеформації), релаксація яких шляхом пластичних деформацій може призводити до згину, скручування, розщеплення, двійникування, блокування монокристалів, а також до комбінованої дії цих автодеформаційних процесів. Усе це призводить до мікро- і макропорушень ідеальної моноблокової будови і виявляється в зовнішній морфології цих кристалів та їхніх складніших агрегативних скупчень. Залежно від морфології та розташування субіндивідів у мозаїчних утвореннях простежують різні види їхнього розростання. Найпростіші з них наведено на рис. 1.

Розщеплення, згин та осьове скручування й формування розщеплених і скручених кристалів – явища досить поширені в царині мінералів і штучних кристалів [2–25]. На мікрорівні такі відхилення від ідеального плоскогранного росту, зумовлені

гетерометрією (несумірністю) окремих фрагментів єдиної структури, широко виявлені у формуванні трубчастих соленокристалів (хризотил, галузит, графіт), концентрично-зональних округло деформованих утворень (септехлорити), у розвитку дислокацій та інших структурних дефектів.

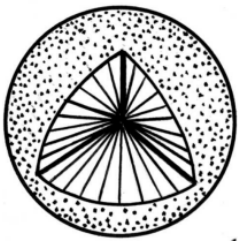
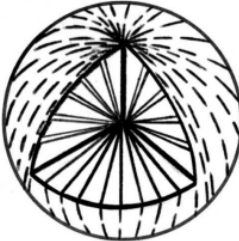
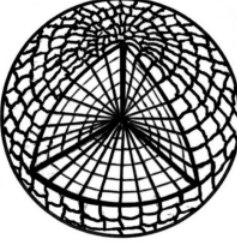
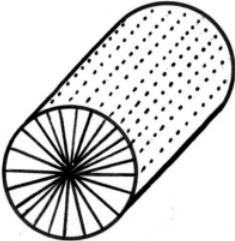

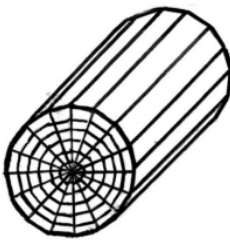
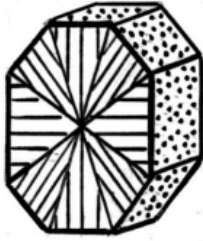
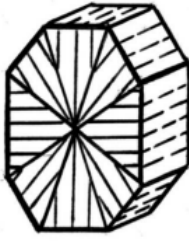
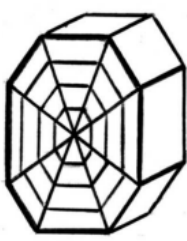
		Тип розростання субіндивідів		
		волокнистий	ламельярний	фасетковий
Характер площинний	кристалів сферичний	 1	 2	 3
	поверхні мозаїчних циліндричний	 4	 5	 6
		 7	 8	 9

Рис. 1. Найпростіші види розростання мозаїчних утворень з розвитком опуклих форм:

1 – волокнисто-сферолітове; 2 – ламелярно-сферолітове; 3 – фасетково-сферолітове; 4 – волокнисто-циліндричне; 5 – ламелярно-циліндричне; 6 – фасетково-циліндричне; 7 – волокнисто-секторіальне; 8 – ламелярно-секторіальне; 9 – фасетково-секторіальне.

На макрорівні подібні явища, зумовлені фактором гетерометрії секторів або зон росту, також призводять до згину, скручування, відносного стиснення або розтягнення наступних шарів, до блокування і розщеплення кристалів. Відповідно, порушується плоскогранність кристалів, і утворюються різні циліндричні, округлі, двояковігнуті, спіральні, гвинтові й інші кривогранні поверхні деформованих кристалів. Гетерометрія зон у кристалах не тільки стимулює появу автодеформацій струк-

тури та накопичення мікроструктурних дефектів, а й спричинює розвиток мікроблоковості (з дислокаційними та індукційними межами мікроблоків) та призводить до генерації і розростання самостійних закономірно чи незакономірно розорієнтованих субіндивідів з індукційними межами, а також до розвитку пов'язаних з первинними субіндивідами додаткових деформацій, що зумовлює саморозвиток наступних генерацій субіндивідів [13].

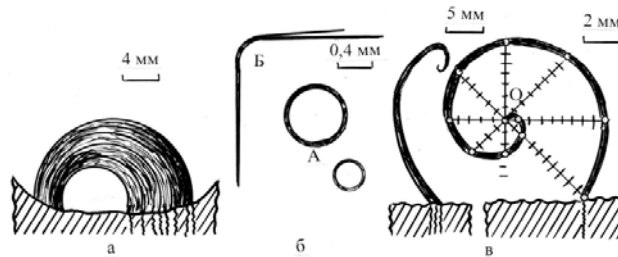


Рис. 2. Площинний згин віскерсів та антодитів:

a – антодитове напівкільце гіпсу в порожнині кварцової секреції; *б* – віскерсні кільця (*A*) та частково кільцевий згин (*B*) віскерсу джемсоніту (Баяс Край, Румунія [8]); *в* – вуса само-родного срібла у вигляді неправильної спіралі (ліворуч) та спіралі Архімеда (Джезказган, Казахстан).

Явища розорієнтації субіндивідів унаслідок гетерометрії, які характерні для будови блокових, розщеплених і скручених кристалів, виявляються в умовах неоднорідного як зонального і секторіального, так і локального, можливо навіть коміркового захоплення ізоморфних домішок. Це приводить до формування різних типів анатомічної будови впорядковано- і невпорядковано-мозаїчних кристалів.

Крім гетерометрії, пов'язаної з неоднорідним зональним або секторіальним захопленням ізоморфних структурних домішок, є й інші чинники, з якими пов'язані ростові деформації і розвиток згину, розщеплення та скрученості кристалів: нерівномірна адсорбція неструктурних домішок, яка також спричинює локальні, зональні та міжсекторіальні напруження, пластичні й крихкі деформації, викривлення шарів росту та зародження й утворення субіндивідів; локальні термічні аномалії на ділянках дуже інтенсивного росту кристалів, які супроводжуються деформаціями, утворенням дислокацій та субіндивідів; приростові механічні порушення структури, на яких генеруються субіндивіди з іншою орієнтацією; деформації, пов'язані з формуванням та ізоляцією первинних газово-рідких і кристалічних включень, а також інші чинники, які спричинюють розорієнтацію окремих ділянок під час росту кристалів.

Широко відомий [4, 12, 13] експериментально доведений зв'язок розщеплення з високим пересиченням мінералоутворювальних розчинів безпосередньо на адсорбувальній поверхні кристалів (ріст у кінетичній області за концентрацій, що перевищують деякий критичний поріг, нижче якого процес розщеплення не відбувається). Формування розщеплення первісно моноблокових кристалів починається з виникнення окремих розорієнтованих віциналоїдів, які розростаються в субіндиві-

ди, що виходять на поверхню кристала. Такі субіндивіди в одних випадках генеруються на гранях (у місцях накопичення домішок), в інших – виникають переважно в привершинних і приреберних ділянках кристалів (у місцях з підвищеною швидкістю розростання). Саморозвиток процесу розщеплення й надає таким кристалом специфічної форми.

Кристалографічна орієнтація та розташування блоків у мозаїчно-блокових кристалах можуть бути *незакономірними*. Такі неправильно-мозаїчні *блокові* кристали найпоширеніші. Секторіально-мозаїчні блокові кристали рідкісніші. Їх часто утворюють апофіліт (хрестоподібні граничні форми між секторами росту) та польові шпати. Окремі блоки-субіндивіди з дещо різною кристалографічною орієнтацією утворюють у цих секторіальних кристалах вrostки, морфологічно видовжені нормально до базисних граней секторів росту. Форма вrostків може бути різною: від пірамідально-тичкуватої до ламелярної та волокнистої. В разі суттєвої синхронної зміни товщини субіндивідів по зонах росту такі секторіальні кристали можуть набувати ще й яскраво виражених ознак зонально-мозаїчної будови. Як наслідок автodeформацій інколи розвивається специфічний морфологічно *незакономірний* згин кристалів з довільно змінним напрямом розщеплення. Це простежується в довільно зігнутих червоподібних кристалах хлориту і слюд, які часто зберігаються у вигляді включень у кварці (див. рис. 3, *д*).

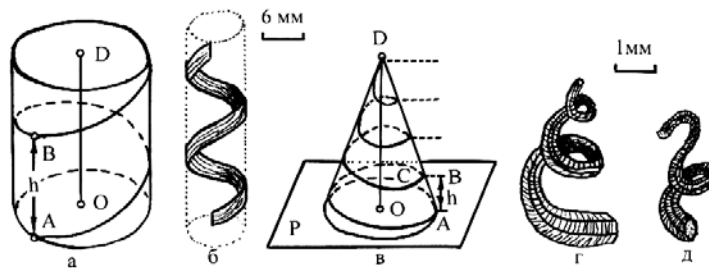


Рис. 3. Згин та скручування кристалів за законами просторових гвинтових ліній:

a – циліндрична гвинтова лінія; *б* – стрічковий антодит гіпсу, який розрісся за законом циліндричної гвинтової лінії; *в* – конічна гвинтова лінія; *г* – червоподібне кристалічне включення хлориту в кварці жил альпійського типу (Полярний Урал), яке розрослося за законом конічної гвинтової лінії; *д* – червоподібне включення неправильної форми.

Однак найбільшу увагу дослідників привертають кристали з морфологічно *закономірною* розорієнтацією блоків і субіндивідів – з утворенням віялоподібних (преніт), снопоподібних (стильбіт, кварц, мусковіт, гіпс) і складніших форм *розщеплених* кристалів з закономірною розорієнтацією субіндивідів (кристали гейландиту з гранями у вигляді риб'ячої луски, різні паркетні кристали, сідлоподібні кристали доломіту й піриту (див. рис. 4, *з, д*) та *скручені* кристали кварцу (див. рис. 4, *в*) й турмаліну, в яких одночасно розвинені форми розщеплення і скручування. Кінцевим наслідком розщеплення може стати формування сферокристалів і сферолітів з радіально-променистою (радіально-волокнистою, радіально-ламелярною або радіально-тичкуватою) будовою (з прямолінійними субіндивідами – див. рис. 1, *1–3*) чи сфероїдолітів (з викривленими лінійновидовженими субіндивідами, як у деяких “нирок” плісового малахіту). Сферокристали особливо характерні для преніту,

“агатоподібного” флюориту, вілеміту, кальциту, арагоніту, піриту, марказиту, кулястих виділень калієвого польового шпату в обсидіані.

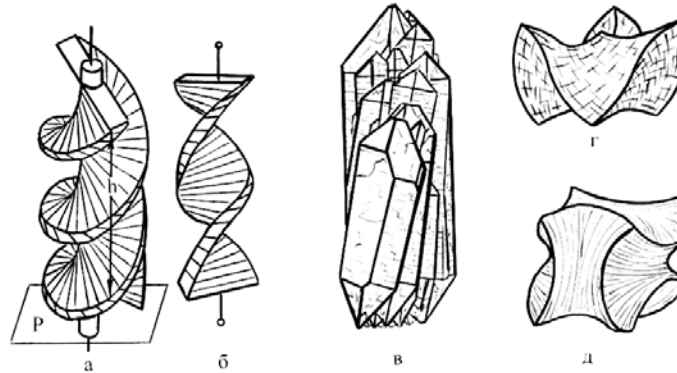


Рис. 4. Різні типи скручування кристалів:

a – схема скручування за законом гвинтового циліндроїда; *б* – моноосьове скручування пропелероподібного кристала антимоніту (Балей, Східне Забайкалля), реальний крок скручування значно більший; *в* – моноосьове скручування блокового кристала кварцу (Полярний Урал); *г* – поліосьове скручування мавпячих сідловин кальциту вздовж $3L_2$; *д* – поліосьове скручування піриту вздовж $4L_3$.

Особливості анатомії сферокристалів волокнистої будови залежать від співвідношень лінійної швидкості росту субіндивідів та кутової швидкості розщеплення. Вони детально розглянуті в працях Ф. Бернауера, Б. Попова, А.В. Шубнікова, Ю.М. Димкова та М.Н. Малєєва (рис. 20–22 у [8]). Морфологія сферокристалів з ламелярним і тичкуватим (фасетковим) розростанням субіндивідів вивчена набагато гірше.

В окремих випадках можуть формуватися специфічні сферокристали не радіально-променевої, а концентрично-зональної будови. Такі оолітоподібні сферокристали утворюються в разі сферичного згину шаруватих мотивів структур (типу поширених барботових очей, характерних для лепідоліту й мусковіту, або концентрично-шкаралупчастих куль мікрокліну, які трапляються зрідка, наприклад, у каменних пегматитах Голодного степу в Казахстані).

Розорієнтація субіндивідів під час розщеплення може бути *простою* – з формуванням базальних опуклих і бокових увігнутих *циліндричних* (лінійних) поверхонь (у кристалах, віялоподібно розщеплених симетрично до осі розщеплення, див. рис. 5, *г*) або *складною* – з формуванням *сферичних* (див. рис. 1, 1–3) та опукло-увігнутих *сідлоподібних* поверхонь (див. рис. 4, *г*, *д*), де такої єдиної осі розщеплення нема.

Для кристалів із шаруватими структурними мотивами дуже характерне моноплосинне розщеплення, яке призводить до формування подібних на блюдця кристалів-розеток (залізні троянди гематиту – див. рис. 5, *е*; пустельні троянди бариту, двосторонні розетки корунду, слюд і хлоритів). Для опису таких кривоградних кристалів і їхніх скупчень зручно використовувати запропоноване В.Н. Войцеховським і В.А. Мокієвським [1] поняття *орієнтації* як елемента поверхні кристала, нормального до конкретного напрямку в ньому. Плоскі грані цим методом будуть

проекуватись у вигляді точок, різні циліндричні поверхні – у вигляді ліній, а округлі – у вигляді плям.

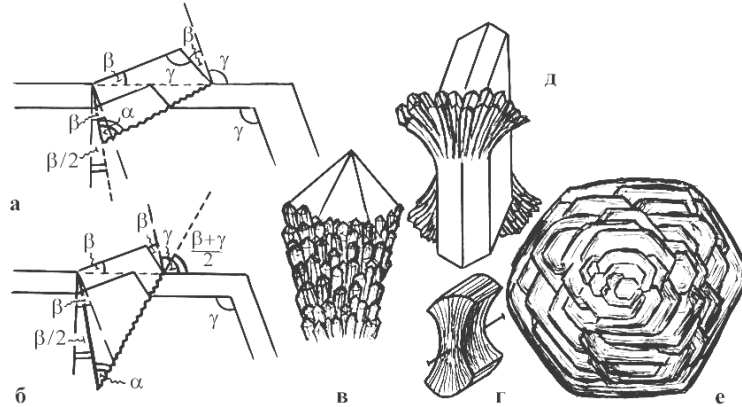


Рис. 5. Типи розщеплення кристалів та особливості будови відщеплених субіндивідів:

a, б – зміна форми перерізу відщепленого субіндивіда залежно від анізотропії швидкостей росту базальних і бічних граней (простежується збільшення привершинного кута α зі збільшенням анізотропії); *в* – моноосьове радіальне розщеплення граней призми кварцу відносно осі L_3 (пегматити, Каїбський гранітний плутон, Голодний степ, Казахстан); *г* – моноосьове моноплосинне розщеплення кристала з формуванням циліндричних угнутих і опуклих поверхонь; *д* – моноплосинне розщеплення відносно (010), локалізоване біля тупих вершин кристала гіпсу (оз. Зайсан); *е* – моноплосинне розеткоподібне розщеплення залізної троянди гематиту відносно (0001).

Скручені кристали також є різновидом упорядковано-мозаїчних зі специфічною розорієнтацією мікроблоків або субіндивідів навколо осі скручування. Скручування кристалів виявляється в *гомоосьовому* (див. рис. 4, *б, в*) і *поліосьовому* варіантах (див. рис. 4, *г, д*). Яскравим прикладом гомоосьового скручування на мікрорівні є мікрволокна халцедону, скручені й видовжені вздовж однієї з осей другого порядку. Дуже близьке до цього типу гвинтоподібне право- або лівостороннє скручування макрокристалів заноришового кварцу в жилах альпійського типу. Однак у скручених кристалах кварцу звичайно виявляється додаткове (протилежне за напрямом) скручування вздовж головної осі, що неодноразово фіксували дослідники [21].

У разі простого гомоосьового скручування антимоніту вздовж вертикальної подвійної осі формуються пропелероподібні кристали (див. рис. 4, *б*). Просте гомоосьове скручування шерлу навколо потрійної осі формує скручені кристали, які складаються з поздовжнього пучка субіндивідів, що гвинтоподібно розорієнтовані навколо осі скручування. Сполучення комбінованого поліплосинного розщеплення і поліосьового скручування приводить до утворення складніше огранених скручених кристалів: типу скручених кубів піриту, розщеплених відносно трьох координатних площин і скручених одночасно вздовж усіх $4L_3$ (див. рис. 4, *д*), або типу ромбедричних мавпячих сідловин доломіту й кальциту з трьома горизонтальними координатними осями скручування і трьома нормальними до них площинами розщеплення (див. рис. 4, *г*), або складних, менш симетричних сідлоподібних розеток

хлориту зі специфічною хвилястою конфігурацією бічних поверхонь. Нижче розглянемо детальніше морфологічні особливості й умови утворення зігнутих, скручених і розщеплених кристалів.

Згин кристалів. Згин віскерсних кристалів та їхніх вусоподібних волокнистих агрегатів (антодитів) у процесі росту часто приводить до формування так званих зігнутих кристалів (див. рис. 2, 3). Утворюються спіральні (див. рис. 2, *в*), псевдогелікоїдальні гвинтові (див. рис. 3, *б*), неправильні черво-, дротоподібні та інші форми. Розростання антодитів будь-якої форми, як це зазначив М.Н. Малєєв [8], відбувається в точках їхнього живлення в місці прикріплення до пористого субстрату (див. рис. 2, *а*). У цьому ж напрямі простежується потовщення антодитів. Їхній згин зумовлений різною швидкістю розростання окремих ділянок антодитів: агрегат згинається в напрямі, в якому росте з меншою швидкістю.

Розростання віскерсів за умов згину в разі нульового скручування та постійних значень лінійної і кутової швидкостей приводить до росту і видовження віскерсів уздовж певної ділянки дуги *кола* (див. рис. 2, *а*, *б*). Тобто в цих умовах росту кривина відповідних ділянок віскерсів є сталою, а скручування – нульовим (утворюється *площинна* лінійна форма). Для вусів джемсоніту навіть відоме утворення повних ідеальних так званих джемсонітових кілець (див. рис. 2, *б*; [8]). Зігнуті антодита гіпсу часто розростаються на стінках порожнин у вигляді напівкілець (див. рис. 2, *а*).

Часто згин волокнистих кристалів, що ростуть, відбувається за законами *спіральних* площинних кривих ліній: такі спіралі лежать в одній площині й обертаються навколо певного центра, а також одночасно віддаляються від нього. Найпростішою з цих кривих є спіраль Архімеда (див. рис. 2, *в*, праворуч). Точки спіралі Архімеда віддаляються від центра *O* пропорційно до кутового переміщення. За цим законом часто розростаються зігнуті антодита гіпсу й віскерси самородного срібла (див. рис. 2, *в*). Їхнє спіральне розростання свідчить про зростання лінійної швидкості росту волокон за сталої кутової швидкості. Одночасно зменшується кривина пізніших ділянок таких спіралей.

Залежно від співвідношень та змін лінійних і кутових швидкостей росту віскерсів і антодитів можуть утворюватись інші форми зігнутих кристалів, у тім числі неправильні спіралі та складніші криволінійні форми (деякі нитчасті кристали самородної сірки, мілериту, джемсоніту, мелантериту та інших мінералів [8]).

Згин з одночасним скручуванням кристалів часто відбувається за законами *просторових гвинтових ліній* (ліній двоякої кривини). У найпростіших випадках обертання цих ліній відбувається навколо поверхні уявного циліндра або конуса (див. рис. 3). У цьому разі точки гвинтових ліній одночасно зміщуються як навколо осі обертання *OD*, так і вздовж твірної цих уявних поверхонь.

Для найпростішої циліндричної гвинтової лінії (див. рис. 3, *а*) характерні стали значення як кута обертання навколо осі *OD*, так і лінійного зміщення вздовж твірної циліндра. Відповідно стали значення мають радіуси кривини і кручення. Циліндричні гвинтові лінії характеризує діаметр циліндра і крок *h* (довжина відрізка *AB* твірної циліндра між точками *A* і *B* її перетину з гвинтовою лінією). Сама ж гвинтова лінія від точки *A* до точки *B* робить один виток. Таку будову мають деякі стрічкові антодита мелантериту та гіпсу (див. рис. 3, *б*).

Для найпростішої конічної гвинтової лінії, яка навивається на поверхню конуса з його вершини (див. рис. 3, *в*), характерні стали значення кута обертання навколо

осі конуса OD й одночасного зміщення вздовж твірної конуса на сталі значення по висоті конуса. Тому в проекції на площину P , нормальну до осі конуса, така конічна гвинтова лінія дає спіраль Архімеда. Ця конічна гвинтова лінія за сталого значення кроку h має змінні значення радіусів кривини й кручення. За один крок ця гвинтова лінія робить виток від точки C до точки A . Таку будову мають деякі червоподібні кристали хлориту (див. рис. 3, z) та корунду. Є інші конічні криві, наприклад, зі сталим співвідношенням змінних радіусів кривини й кручення: вони в площині, нормальній до осі конуса, проєктовані у вигляді логарифмічної спіралі. Гвинтоподібно закручені віскерсні агрегати інколи невдало називають гелікоїдальними.

Скручені кристали характеризовані певним кроком гвинта (відстанню h повного оберту вздовж осі скручування – див. рис. 4, a) і коефіцієнтом скрученості (співвідношенням кроку гвинта до товщини скручених пластинчастих або дошкоподібних кристалів).

Найліпше вивчено скручені кристали кварцу. Вони часто трапляються в порожнинах жил альпійського типу (Альпи, Урал). Серед них розрізняють закриті (без додаткового розщеплення) і відкриті (див. рис. 4, b) форми, які супроводжуються розщепленням [7, 21].

В їхньому утворенні простежується дві стадії росту [6]. На *першій стадії* кристали не розщеплюються, а досягнувши певних розмірів, з якогось моменту скручуються і розростаються вздовж лише однієї з трьох кристалографічно еквівалентних осей другого порядку. Цю вісь скручування можна назвати *активною*. Тобто специфічною особливістю росту кристалів на цій стадії є те, що, розростаючись уздовж активної осі, вони майже не ростуть ні вшир, ні впоперек. Грані, які швидко ростуть уздовж активної осі, утворюють активну голівку з іншим характером розвитку граней, ніж бічні пасивні, видовжені вздовж активної осі. До стінок порожнин кристали прикріплені з протилежного кінця активної осі.

Унаслідок скручування в ідеальному випадку дві пасивні гексагонально-призматичні грані кварцу, зорієнтовані паралельно до активної осі, набувають кривогранної форми, близької до так званого *гвинтового циліндроїда* (див. рис. 4, a), а інші зберігають плоскогранність. Поверхня гвинтового циліндроїда формується шляхом переміщення твірної прямої (вона паралельна до L_3 кварцу) по двох протилежно зорієнтованих напрямних циліндричних гвинтових лініях (з однаковим кроком скручування). Твірна пряма, переміщуючись, зберігає паралельність певній площині (площині паралелізму P), яка орієнтована перпендикулярно до осі скручування. Переміщення твірної прямої відбувається за сталих значень кута повертання і кроку скручування. Площина паралелізму паралельна місцю прикріплення кварцу до стінки порожнини. В ідеальному випадку (у разі закритого скручування без розщеплення) поверхні обох скручених призматичних граней конгруентні (можуть бути суміщені шляхом накладання).

Крок гвинта скручених індивідів кварцу на першій стадії росту лінійно збільшується зі збільшенням їхньої товщини: від 25–85 (у середньому близько 55 см) за товщини 1 см до 110–360 см (у середньому близько 220 см) за товщини 4 см. Відповідно, безрозмірний коефіцієнт скрученості коливається в межах 25–85 (у середньому близько 55).

Спостереження [6] за розподілом інтенсивності радіаційного димчастого забарвлення в різних секторах росту скрученого кварцу дало змогу з'ясувати, що на першій стадії росту на активній голівці кристала набагато ліпше розвинені лише

грані великого ромбоедра й окремі трапецоедричні грані. Безбарвність пірамід росту добре розвинених трапецоедричних граней та інтенсивніше димчасте забарвлення пірамід росту великого (позитивного) ромбоедра свідчать про більшу кількість захоплених останніми радіаційних дефектів (домішок алюмінію). Різна кількість домішок і зумовлює появу міжсекторіальної гетерометрії, яка призводить до скручування кварцу.

Для *другої стадії* росту характерне відновлення звичайних співвідношень швидкостей росту призматичних і ромбоедричних граней. Трапецоедричні грані заростають, специфічна активна вісь зникає. Формуються відкриті скручені форми, ускладнені субіндивідами форм розщеплення.

Вище наведено приклади інших мінералів, які утворюють моно- і поліосьові скручені форми (див. рис. 4, б–д). Скручування антимоніту вздовж вертикальної L_2 часто супроводжується полісинтетичним двійникуванням з поперечним двійниковим штрихуванням (див. рис. 4, б). А сідлоподібне скручування доломіту і кальциту вздовж $3L_2$ майже завжди супроводжується розщепленням. Сідлоподібну форму доломіту пов'язують [25] з утворенням у структурі серій ростових мікроскопічних клинів, збагачених магнієм. Розвиток міжсекторіальної гетерометрії і скручування внаслідок появи автодеформацій вдалося змоделювати під час штучного вирощування різних кристалів за наявності домішок [5, 16 та ін.].

Розщеплені кристали. Морфологічні й генетичні особливості розщеплених (скручених за М.Ф. Єрофєєвим і А.Н. Карножицьким) кристалів, сферокристалів і сферолітів вивчало багато відомих мінералогів і кристалографів (О. Леман, Ф. Бернауер, Б. Попов, А.В. Шубніков, Д.П. Григор'єв, Ю.М. Димков, М.П. Юшкін та ін.). У з'ясуванні суті явища розщеплення останніми десятиріччями особливо важливі результати отримано петербурзькою школою кристалографів-експериментаторів (Т.Г. Петров, Ю.О. Пунін, Т.П. Ульянова та ін.), які розглянули зв'язки морфологічних особливостей цих специфічних утворень з умовами, причинами, механізмом розщеплення, динамікою і кінетикою процесу [12–15, 17–19].

Морфологічні особливості розщеплених кристалів. На початкових стадіях розщеплення на базальній поверхні монокристала-матриці з'являються незначно (на перші градуси, на кут β) розорієнтовані сателіти-віциналлоїди. Їхнє синхронне розростання з гранями матриці приводить до утворення блоків-субіндивідів з такою ж розорієнтацією (див. рис. 5, а, б). На зовнішній поверхні субіндивідів наявні ті ж грані, що огранюють матрицю. Велика базальна грань субіндивіда контактує з базальною гранню матриці по лінії, названій *лінією спряження* [17]. Ці базальні грані утворюють двогранний кут $(180-\beta)$. Вузькі бічні грані субіндивіда від базальної грані матриці відхиляються на кут $(\gamma+\beta)$.

На контактній поверхні за одночасного розростання граней субіндивіда і базальної грані матриці утворюється комплекс псевдограней пірамідальної форми (з вершиною в центрі зародження субіндивіда). З'ясовано, що ця поверхня представлена принципово різними псевдогранями. Псевдогрань, яка йде від лінії спряження базальних граней, названа [17] *зоною спряження*. Вона завжди орієнтована відносно базальної грані матриці дуже круто, майже вертикально (в ідеалі з відхиленням на кут $\beta/2$). По цій поверхні субіндивід міцно скріплений з матрицею, і вона має будову типу дислокаційної сітки на контакті блоків з малокутовими границями.

А псевдограні, утворені під час синхронного росту і взаємодії крутоорієнтованих бічних граней субіндивіда з базальною гранню матриці, мають типову індук-

ційну будову, подібну до псевдограней іхтіогліптів кварцу в письмовому граніті. По індукційних поверхнях субіндивіди легко відокремлюються від матриці. На відміну від крутоорієнтованої псевдограні в зоні спряження, орієнтація індукційних псевдограней залежить не лише від кута β , а й від співвідношення швидкостей росту базальних і бічних граней. За однакових швидкостей росту цих граней відповідні псевдограні орієнтуються вздовж бісектрис двогранних кутів $(\beta+\gamma)$, утворених бічними гранями субіндивіда з базальною гранню матриці, тобто під кутом $(\beta+\gamma)/2$ (див. рис. 5, б). Чим більша анізотропія швидкостей, тим положистіше орієнтовані індукційні поверхні (див. рис. 5, а) і тим тупішим стає поздовжній привершинний кут α між протилежними псевдогранями.

В одних випадках простежується приуроченість розщеплення до приреберних і привершинних ділянок матриці. Це пов'язують з більшою пересиченістю розчинів у цих ділянках завдяки сприятливішим умовам живлення в разі однорідної дифузії до них кристалоутворювальної речовини (внаслідок наявності додаткового сектора, з якого дифузійно живляться вершини й ребра).

В інших випадках поодинокі субіндивіди приурочені до різних ділянок посередині грані матриці. Таке розташування субіндивідів пов'язують з неоднорідним накопиченням домішок або з неоднорідним пересиченням по поверхні грані (розвитком декількох коміркових конвективних потоків живлення, які спричинюють появу окремих ділянок з підвищеним пересиченням). Утворені субіндивіди часто мають різні напрями розорієнтування, узгоджені з симетрією та орієнтацією ребер базальної грані (залізні троянди гематиту й інші розетки).

Проте в обох випадках можуть утворитись групи ("кущі") пізніших субіндивідів унаслідок послідовного галуження первинних або вторинних субіндивідів (переважно з зародженням пізніших субіндивідів у місцях виходу зон спряження). Відповідно, розрізняють субіндивіди різних порядків з приблизно однаковими взаємними кутами розорієнтації (відносно материнських субіндивідів).

Умови утворення розщеплених кристалів. Причинами зародження розорієнтованих субіндивідів у розщеплених кристалах вважають локальні напруження, які виникають під час росту кристалів. Джерела ростових напружень можуть бути різними: захоплення структурних і механічних домішок, кристалічних, аморфних, флюїдних включень, усадкові напруження, механічні ушкодження, некогерентне або частково когерентне стикування (змикання) шарів росту в разі їхнього зіткнення після обгинання об'ємних дефектів або скелетного росту [4, 13–15]. Однак згідно з експериментальними даними [13, 19], окрім розвитку певних напружень, обов'язковою умовою реалізації ростового розщеплення є високе пересичення (вище якогось критичного значення).

Критичні розміри стійких зародків субіндивідів, які виникають у деформованих ділянках приповерхневого шару кристала (унаслідок твердофазового механізму розростання деформаційного зародка, подібного до механізму рекристалізації), також залежать від пересичення розчинів [13, 19]. Окрім високого пересичення є багато похідних умов розщеплення (висока швидкість росту, інтенсивне захоплення домішок тощо).

Тут ми не будемо розглядати часових і швидкісних аспектів розщеплення – динаміку й кінетику цих процесів. Вони детально описані в [13], де проаналізовано процеси на обох стадіях розщеплення: під час зародження первинних субіндивідів,

їхнього розростання і ланцюгового характеру розмноження “кущів” вторинних субіндивідів. Експериментально з’ясовано, що в разі ланцюгового характеру динаміки утворення вторинних субіндивідів загальна кількість субіндивідів на розщепленому кристалі з часом збільшується експоненційно. Експериментально також підтверджено чіткі взаємозв’язки швидкості процесів зародження і розмноження субіндивідів та умов кристалізації (високе пересичення, наявність домішок, в’язкість, конвекційний рух розчинів тощо).

Зазначимо, що розщеплення, на відміну від скелетного росту, відбувається в умовах кінетичного режиму [4, 12, 13]. У кінетичному режимі, як відомо, лімітною компонентою, що визначає особливості росту кристала, є швидкість адсорбції кристалоутворювальних частинок поверхнею кристала. А відповідне зменшення їхньої концентрації в розчині у межовому шарі негайно компенсоване ззовні шляхом об’ємної дифузії. Ясно, що необхідною умовою розщеплення є не просто високе пересичення в об’ємі навколишнього розчину, а високе пересичення безпосередньо на фронті кристалізації в межовому шарі. Тому розщепленню сприяє поліпшення живлення граней шляхом збільшення швидкості руху розчинів біля кристала (вимушена конвекція).

Крім того, розщепленню може сприяти збільшення концентрації розчину на фронті кристалізації внаслідок уповільнення швидкості відкладання речовини на гранях у разі адсорбції нелокалізованих (рухомих) домішок (якщо не утворюються грані гальмування, які повністю припиняють ріст і тому не розщеплюються: цьому сприяє адсорбція локалізованих слаборухомих домішок). Збільшення концентрації домішок у випадку постійного перенасичення може збільшити їхню абсорбцію кристалом і саме цим спричинити появу в ньому додаткових напружень, які інтенсифікують зародження субіндивідів і розщеплення. Підвищення в’язкості розчинів також може уповільнити ріст граней і цим збільшити концентрацію розчину в межовому шарі та сприяти розщепленню (звичайно, якщо в’язкість не спричинить зниження швидкості зовнішнього загального масоперенесення, що зумовить зворотний вплив на розщеплення).

За достатнього нелімітованого об’ємно-дифузійного живлення кристала (малий дифузійний опір) в умовах високого перенасичення інтенсифікація розщеплення часто приводить до утворення дволісників, сферокристалів, а також сфероїдолітів (у разі додаткового згину субіндивідів). Одні автори розрізняють сфероліти й сферокристали за товщиною субіндивідів [20], інші сферолітами називають лише радіально-променисті утворення первинно-агрегативного зародження, а сферокристалами – пов’язані з розщепленням зародкових монокристалів. Ясно, що не завжди шляхом прямих спостережень це можна зафіксувати.

Скелетні кристали, на відміну від розщеплених, хоча й утворюються також у разі високого перенасичення розчинів, проте в умовах “голодування” граней під час інтенсивного розростання приреберних і привершинних ділянок (з утворенням реберних і вершинних наростань або навіть реберних і вершинних динамічних форм). У цьому випадку домішки відтісняються на середину граней, що додатково уповільнює або повністю блокує ріст фасеток.

Отже, скелетні кристали формуються в умовах ліміту об’ємно-дифузійного живлення в разі високого дифузійного опору [4, 12, 13]. В проміжних умовах (у випадку високого загального перенасичення, проте зі зменшенням дифузійного опору) на вершинах скелетних форм додатково генеруються явища розщеплення з утво-

ренням дендритів – гіллястих агрегативних розростань.

1. *Войцеховский В.Н.* О нормальном и тангенциальном росте кристаллов // Минерал. сб. 1969. № 23. Вып. 3. С. 251–260.
2. *Воробьева А.С., Пунин Ю.О., Ульянова Т.П.* Расщепление локальнодеформированных кристаллов при росте // Кристаллография и кристаллохимия. Л., 1974. Вып. 3. С. 188–192.
3. *Григорьев Д.П.* Онтогенез минералов. Львов, 1961.
4. *Краснова Н.И., Петров Т.Г.* Генезис минеральных индивидов и агрегатов. С.-Пб., 1997.
5. *Кузьмина М.А., Мошкин С.В., Пунин Ю.О.* Скручивание кристаллов в процессе их роста // Физика кристаллизации. Тверь, 1999. Вып. 14. С. 24–35.
6. *Кузьмина М.А., Пунин Ю.О., Каменцев И.Е.* Особенности внешней и внутренней морфологии скрученных кристаллов кварца // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1987. Ч. 116. Вып. 4. С. 445–453.
7. *Леммлейн Г.Г.* Морфология и генезис кристаллов. М., 1973.
8. *Малеев М.Н.* Свойства и генезис природных нитевидных кристаллов и их агрегатов. М., 1971.
9. *Мошкин С.В., Руссо Г.В., Нардов А.В.* Кинетика роста, двойникования и расщепления кристаллов сульфата кальция // Всесоюз. совещ. по росту кристаллов. Тбилиси, 1977. Т. 2. С. 148–149.
10. *Павлишин В.І.* Основи морфології та анатомії мінералів: Навч. посібник. К., 2000.
11. *Павлишин В.И., Юшкин Н.П., Попов В.А.* Онтогенетический метод в минералогии. К., 1988.
12. *Петров Т.Г., Трейбус Е.Б., Пунин Ю.О., Касаткин А.П.* Выращивание кристаллов из растворов. Л., 1983.
13. *Пунин Ю.О.* Расщепление кристаллов // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1981. Ч. 110. Вып. 6. С. 666–686.
14. *Пунин Ю.О.* Образование автодеформационных дефектов при росте кристаллов из растворов // Рост кристаллов. М., 1983. Т. 14. С. 108–117.
15. *Пунин Ю.О.* Происхождение автодеформационных дефектов кристаллов // Минералогическая кристаллография и ее применение в практике геологоразведочных работ: Сб. науч. трудов. К., 1986. С. 106–114.
16. *Пунин Ю.О., Болдырева О.М.* Характер деформации и условия образования скрученных кристаллов щавелевой кислоты // Физика кристаллизации. Калинин, 1980. С. 46–55.
17. *Ульянова Т.П., Петров Т.Г., Пунин Ю.О.* Морфология расщепления кристаллов // Кристаллография и кристаллохимия. 1973. Вып. 2. С. 101–114.
18. *Ульянова Т.П., Пунин Ю.О., Петров Т.Г.* Закономерности образования вторичных субиндивидов при расщеплении кристаллов // Кристаллография и кристаллохимия. 1974. Вып. 3. С. 193–201.
19. *Ульянова Т.П., Пунин Ю.О., Петров Т.Г.* Основные закономерности расщепления кристаллов при росте // Рост кристаллов. Ереван, 1977. Т. 12. С. 133–138.
20. *Шубников А.В., Флинт Е.Е., Бокий Г.Б.* Основы кристаллографии. М.-Л., 1940.
21. *Юхтанов П.П.* Скрученные кристаллы кварца. Сыктывкар, 1989.

22. Юшкин Н.П. Морфология и рост расщепленных кристаллов целестина // Генезис минеральных индивидов и агрегатов. М., 1966. С. 201–215.
23. Bernauer F. Gedrillte Kristalle // Forsch. Kristallkunde. Berlin. 1929. H. 2. S. 102.
24. Rykart R. Bergkristall. Form und Schönheit alpiner Quartz. Ott Verlag. Thun und München, 1971.
25. Searl A. Saddle dolomite: a new views of its nature and original // Mineral. Mag. 1989. Vol. 53. N 5. P. 547–555.

**MOSAIC STRUCTURE OF CRYSTALS,
SPLIT AND TORSIONED INDIVIDUALS' PECULIARITIES**

I. Bakumenko

*Ivan Franko National University of Lviv
Hrushevskogo st. 4, UA – 79005 Lviv, Ukraine
E-mail: geomin@geof.franko.lviv.ua*

The most important factors caused crystals splitting and twisting have been determined. Morphological peculiarities of the crystals formed under monoplane and polyplane splitting as well as homoaxial and polyaxial twisting are characterised.

Key words: mosaic crystals, split and torsioned crystals, spherical crystals, crystals' bend.

Стаття надійшла до редколегії 28.08.2002

Прийнята до друку 19.09.2002