

# Studijní opory k předmětu Mineralogie I

## Všeobecná mineralogie, část II.

podzimní semestr, rozsah výuky 3/0

vypracoval: Václav Vávra

Základní orientace v textu:

**červeně** jsou označeny důležité základní definice

**modře** jsou značené doplňující informace

**zeleně** jsou značeny základní anglické termíny

obrázky a doplňující informace najdete na: <http://mineralogie.sci.muni.cz>

### 2.1 Vznik krystalů

Krystaly představují vysoce uspořádanou hmotu v pevném skupenství a obvykle vznikají krystalizací z látek kapalných (roztok, tavenina), plynných nebo pevných. Jelikož v plynném i kapalném skupenství neexistuje uspořádání stavebních částic na dlouhou vzdálenost, můžeme krystalizaci z těchto skupenství chápat jako vznik periodického uspořádání s přechodem do pevné fáze.

**Krystal vzniká při definované teplotě, tlaku a chemickém složení krystalizujícího roztoku.**

Každý vznik krystalu je definován fyzikálně chemickými podmínkami. Jsou to především teplota a tlak při krystalizaci a složení krystalizující fáze. Změna podmínek při krystalizaci se může projevit na výsledných krystalech např. vznikem jiného krystalového tvaru nebo odlišnými fyzikálními vlastnostmi.

#### 2.1.1 Krystalizace

Krystalizace probíhá v různých fyzikálních podmínkách a různých chemických prostředích.

Ke krystalizaci může docházet řadou procesů, z nichž nejčastější jsou:

- kondenzace páry
- tuhnutí kapaliny
- odpařování nasyceného roztoku
- ochlazování nasyceného roztoku
- chemické srážení nebo
- eutektické a perieutektické pochody v pevné fázi.

Výše uvedené procesy se v přírodě uplatňují různou měrou a některé z nich se používají při laboratorním pěstování monokrystalů.

### 2.1.1.1 Krystalizace z plynů

Krystalizace z plynné fáze je nejméně běžný případ vzniku minerálů. Proces se označuje jako **sublimace**. Příkladem může být vznik sněhových vloček ve vzduchu nebo tvorba síry na sopečných fumarolách. Oxid siřičitý uvolněný v magmatickém procesu se redukuje reakcí s oxidem uhelnatým za vzniku ryzí síry. Ta se v plynném stavu dostává na povrch, kde krystalizuje na chladnějších místech.

### 2.1.1.2 Krystalizace z roztoků a tavenin

Příkladem krystalizace z roztoku může být vznik halitu nebo kamence. Budeme-li rozpouštět halit ve vodě, dojdeme do stadia, kdy zůstává v roztoku nerozpustný zbytek a mezi pevnou fází a roztokem vzniká rovnovážný stav. V takovém případě označíme roztok s rozpuštěným halitem při dané teplotě jako **nasycený**. Zvýšením teploty nasyceného roztoku se stává **nenasyceným**, protože rozpustnost pevné látky se zvyšuje s teplotou. Budeme-li z nasyceného roztoku odpařovat vodu nebo snížíme-li jeho teplotu, dostaneme **přesycený** roztok. Z přesyceného roztoku může dojít ke krystalizaci a to přirozeně nebo uměle vyvolané. Krystalizaci vyvoláme tzv. očkovaním, kdy vložíme těleso (nečistota, krystal) do roztoku. K samovolné krystalizaci dojde v případě, že vzniknou *krystalizační jádra – nuklea*.

Pokud má krystalizace z roztoku plynule probíhat musí být splněna některá z následujících podmínek:

- snižuje se teplota roztoku nebo taveniny
- zvyšuje se koncentrace krystalizujícího roztoku odpařováním rozpouštědla
- dosycuje se krystalizující roztok krystalizující látkou.

Příkladem rozsáhlé krystalizace minerálů z roztoku je vznik ložisek evaporitů, kdy dochází ke krystalizaci v mořských lagunách za vhodných klimatických podmínek.

Asi častějším případem v přírodě je krystalizace z taveniny. Tento proces je spjat se vznikem minerálů ve všech typech plutonických i vulkanických hornin. Při krystalizaci z tavenin je hlavní řídicí veličinou teplota, v menší míře se podílí i tlak a celkové složení taveniny. V geologických procesech mluvíme o magmatické tavenině (nebo lávové tavenině), která je systémem zpravidla 10–15 hlavních komponent. Proces krystalizace z magmatu probíhá zpravidla postupně a jednotlivé fáze (minerály) vznikají v závislosti na fyzikálně chemických podmínkách prostředí. Základem pro krystalizaci pevné fáze je opět vznik **krystalizačního jádra**, které se zvětšuje apozicí iontů jednotlivých prvků přítomných v magmatu.

### 2.1.1.3 Krystalizace v pevné fázi

Krystalizace v pevném stavu probíhá především v metastabilních systémech, jako jsou látky s neuspořádanou vnitřní stavbou (látky amorfni). V amorfních látkách sice neexistuje uspořádání na dlouhou vzdálenost, ale lokální uspořádání stavebních částic zde najdeme v rámci stavebních jednotek (např. tetraedry  $\text{SiO}_4$  v opálu). Tyto uspořádané domény mohou posloužit jako krystalizační zárodky, které jsou základem pro postupnou rekrystalizaci v pevném stavu.

Za krystalizaci v pevném stavu můžeme považovat všechny fázové změny v horninách, které jsou spojeny s metamorfními pochody a všechny typy polymorfních přeměn.

### 2.1.2 Růst krystalů

Některé minerály jsou vyvinuty v dokonalých krystalech, jiné mají vyvinutou jen část krystalových ploch nebo plochy vyvinuty vůbec nemají. Tvar výsledného krystalu je ovlivněn podmínkami během krystalizace. Jsou to zejména následující:

- dostatek atomů nebo iontů nezbytných pro vznik krystalu a možnost slučovat se v odpovídajících poměrech
- fyzikálně chemické podmínky krystalizace, které mají vliv zejména na rychlost růstu
- velikost prostoru, ve kterém ke krystalizaci dochází.

Podmínkou pro následný růst krystalů je vznik zárodků – **krystalizačních jader**. Jakmile tato jádra přesáhnou kritickou velikost, postupuje jejich růst. Z okolního roztoku se stavební částice (ionty, molekuly) ukládají na povrch rostoucího krystalu. Tento proces se označuje jako **apozice**. V nejbližším okolí krystalu postupně ubývá stavebních částic a snižuje se tak jejich koncentrace a vytváří se krystalizační dvorec. Další růst krystalu je možný pouze díky difúzi mezi krystalizačním dvorcem a okolní přesycenou taveninou.

### 2.1.3 Rychlost a směr růstu krystalů

Většina krystalů není tvarově homogenním tělesem, je tedy jasné, že v různých směrech je rychlost růstu krystalu různá. Kolmice spuštěné ze zárodečného bodu (většinou totožný se středem krystalu) na krystalové plochy udávají růstové směry těchto ploch. Rychlost postupu dané krystalové plochy při jejím růstu se označuje jako **růstová rychlost**.

**Krystalové plochy se stejným tvarem a růstovou rychlostí označujeme jako fyzikálně a krystalograficky stejnocenné.**

Objeví-li se plochy s jiným tvarem a jinou růstovou rychlostí, jsou vůči původním plochám různocenné.

Směr růstu krystalových ploch a výsledný **habitus** krystalu je úzce spjat se symetrií krystalové struktury. Existuje-li na krystalu směr s malou rychlostí růstu (např. tabulkovité nebo lístečkovité krystaly), má elementární buňka v tomto směru nejdelší periodu identity. Podobně směru s velkou růstovou rychlostí (sloupcovité a jehlicovité krystaly) odpovídá nejkratší mřížková perioda identity.

**Na rovnoměrně rostoucím krystalu jsou nejlépe vyvinuté ty plochy, které odpovídají strukturním rovinám s největší retikulární hustotou (s největším počtem uzlových bodů).**

Z hlediska rychlosti růstu různocenných ploch můžeme říci, že na krystalu se prosadí plochy s nízkou růstovou rychlostí.

Souvislost mezi růstovou rychlostí a retikulární hustotou je zřejmá – na plochy s vyšší retikulární hustotou se musí vázat více stavebních částic a tak je jejich rychlost růstu nižší, než u ploch s nízkou retikulární hustotou. Vyšší rychlost růstu ploch s malou retikulární hustotou je podpořena i faktem, že mají vyšší povrchovou energii. Vysokou retikulární hustotu mají plochy s nízkými hodnotami Millerových indexů a ty se také na krystalech objevují nejčastěji.

#### 2.1.4 Vliv podmínek krystalizace na růst krystalů

Rovnoměrně vyvinutý krystal je v přírodních podmínkách velmi vzácný. Vyžaduje to ideální krystalizační podmínky, které je možné dodržet zpravidla jen v laboratoři. V přírodě se setkáváme nejčastěji s tzv. **různoměrným vývinem krystalů**. Takové krystaly nejsou zcela pravidelné a vykazují odchylky od ideálních tvarů. Tyto jevy jsou způsobeny kolísáním teploty při krystalizaci, změnou tlakových podmínek, změnou složení výchozího roztoku nebo prouděním krystalizujícího roztoku.

krystalizace - crystallization	přesycený roztok – supersaturated solution
kondenzace - condensation	nukleus - nucleus
sublimace - sublimation	růstová rychlost – growth rate
nasycený roztok – saturated solution	krystalová plocha – crystal face

## 2.2 Morfologie krystalu

Minerály, s výjimkou amorfních fází, mají určité vnitřní uspořádání částic, od kterého je odvozen jejich krystalový tvar. Minerály se v přírodě obvykle vyskytují ve formě krystalických agregátů, které vznikají při krystalizaci, kdy krystalizující hmota zcela vyplní prostor (většina hornin). V některých případech jsme schopni jednotlivé krystalky v agregátu rozlišit pouhým okem, v jiných případech nelze krystalický původ agregátu určit makroskopicky a označujeme jej jako **mikrokrystalický agregát**. Pokud jsou krystalová individua v agregátu tak malá, že je nelze rozlišit ani mikroskopem, ale můžeme je detekovat RTG difrakčními technikami, hovoříme o **agregátech kryptokrystalických**. Pokud ve

strukturu minerálu zcela chybí uspořádání na dlouhou vzdálenost, je minerál označován jako amorfni. Výskyt krystalů omezených pravidelnými krystalovými plochami je v přírodě méně častým jevem.

**Krystaly, charakteristické pro jednotlivé minerály, jsou vlastně geometrickými mnohostěny, více či méně pravidelnými.**

Povrch krystalu je tvořen plochami, hranami a rohy. Vzájemné úhlové vztahy spolu s velikostí a tvarem ploch tvoří **morfologii krystalu**. Morfologie krystalu určitého minerálu závisí na podmínkách při krystalizaci, tj. na teplotě, tlaku, složení roztoku, směru proudění roztoku a velikosti krystalizačního prostoru. Morfologii krystalků studuje morfologická krystalografie.

### 2.2.1 Vztah mezi strukturou a morfologií krystalu

Každý minerál má svoji vnější krystalovou formu a zároveň svoje vnitřní uspořádání stavebních částic. Mezi morfologií krystalu a jeho vnitřní strukturou existuje velmi úzký vztah. Krystalová struktura je složena ze stavebních částic (obvykle atomy, ionty nebo molekuly), které jsou periodicky uspořádány v prostoru a tvoří různé typy strukturních rovin. Některé z těchto strukturních rovin se projeví na morfologii krystalu jako krystalové plochy.

**Každá krystalová plocha na krystalu je paralelní se systémem odpovídajících strukturních rovin. Podobně každá krystalová hrana odpovídá systému uzlových přímek ve struktuře.**

Odpovídající si krystalové plochy a strukturní roviny můžeme popsat stejnými Millerovými symboly (hkl) a stejně tak krystalové hrany a uzlové přímky struktury. Z morfologie krystalu nejsme schopni získat absolutní hodnoty o základní buňce strukturní mřížky, ale jsme schopni zjistit úhlové vztahy mezi rovinami a hranami a relativní poměr mezi mřížkovými parametry struktury.

### 2.2.2 Základní morfologické rysy krystalových těles

Díky různým podmínkám během krystalizace se může reálný tvar krystalu velmi lišit od ideálního geometrického tvaru. Lokální změny v teplotě, koncentraci a proudění roztoku mohou např. způsobit rychlejší apozici částic v některých částech krystalu. Tyto zcela běžné odchylky se označují jako **různoměrný vývin krystalů**.

Těleso krystalu se skládá z krystalových ploch, krystalových hran a krystalových rohů. Jejich vzájemný počet je definován Eulerovou rovnicí, která je platná pouze pro monokrystaly (neplatí pro srostlice se zapuklými úhly hran):  $P$  (plochy) +  $R$  (rohly) =  $H$  (hrany) + 2.

**Součet počtu ploch ( $P$ ) a rohů ( $R$ ) na krystalu je roven počtu hran ( $H$ ) zvýšený o 2.**

Na krystalech se vyskytují plochy různého druhu. Podle symetrie rozeznáváme **plochy pravidelné**, které lze souměrně rozdělit více jak dvěma řezy na zrcadlově shodné poloviny

např. čtverec, rovnostranný trojúhelník nebo pravidelný šestiúhelník. **Plochy souměrné** lze rozdělit nejvýše dvěma řezy na zrcadlově shodné poloviny např. obdélník nebo rovnoramenný trojúhelník. Ostatní plochy (bez roviny symetrie) se označují jako **nesouměrné**.

Krystalová hrana je linie, ve které se sbíhají dvě krystalové plochy. **Skutečná krystalová hrana** je takové místo na krystalu, kde se přímo setkávají dvě různoběžné krystalové plochy. Pokud se plochy nestýkají přímo, hovoříme o hraně myšlené. Prostorový vztah stýkajících se ploch vyjadřujeme buď přibližně – hrana ostrá, tupá, vypuklá, zapuklá, nebo přesně pomocí úhlu krystalové hrany. Vnitřní úhel hrany ( $\alpha$ ) je úhel mezi vnitřními stranami ploch, vnější úhel hrany ( $\epsilon$ ) je doplněk vnitřního úhlu do  $180^\circ$  a zároveň je to úhel kolmic spuštěných na krystalové plochy ze středu krystalu.

Krystalový roh je bod na krystalu, kde se sbíhají krystalové hrany. Krystalové rohy dělíme podobně jako plochy na pravidelné, souměrné a nesouměrné, podle stupně pravidelnosti plochy, která vznikne rovnoměrným seříznutím krystalového rohu.

**Pokud je krystal omezen krystalograficky stejnocennými plochami, označujeme toto geometrické těleso jako jednoduchý krystalový tvar. Je-li krystal omezen krystalograficky různocennými plochami, označujeme toto těleso jako spojku.**

### 2.2.3 Krystalografické osy

Popis každého krystalu se provádí vzhledem k referenčním souřadným osám, které se obecně označují jako krystalografické osy nebo **krystalografický osní kříž**. Osy většinou bývají rovnoběžné s hranami význačných krystalových ploch nebo kolmé na roviny symetrie krystalu. V ideálním případě jsou krystalografické osy rovnoběžné s hranami základní strukturní buňky.

U většiny krystalových soustav se osy obvykle označují jako  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Osa  $a$  má směr základního strukturního vektoru  $\mathbf{a}_0$  a její orientace je předozadní (brachydiagonála), osa  $b$  je ve směru základního strukturního vektoru  $\mathbf{b}_0$  s orientací pravolevou (makrodiagonála) a osa  $c$  má směr základního strukturního vektoru  $\mathbf{c}_0$  a její orientace je vertikální (vertikála).

Obecně má každá osa jinou délku a konec každé osy je označen plus nebo minus; pozitivní je přední část osy  $a$ , pravá část osy  $b$  a horní část osy  $c$  - opačné konce jsou negativní. Úhly mezi osami jsou konvenčně značeny jako  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Úhel  $\alpha$  je mezi osami  $b-c$ , úhel  $\beta$  je mezi osami  $a-c$  a úhle  $\gamma$  je mezi osami  $a-b$ . Můžeme se setkat se značením os symboly  $x (= a)$ ,  $y (= b)$ ,  $z (= c)$ .

Symetrii každého krystalu lze popsat pomocí jednoho z šesti krystalografických osních křížů, které rozdělují krystaly do sedmi **krystalových soustav** (trigonální a hexagonální soustava mají shodný osní systém).

Často se krystalové soustavy člení do skupin. Jako soustava vyšší kategorie se vyčleňuje kubická, do soustav střední kategorie patří trigonální, hexagonální a tetragonální a soustavy nižší kategorie jsou rombická, monoklinická, triklinická.

Horizontální osy v krystalografickém kříži označujeme jako osy pasné, které protínají pasné rohy a pasné hrany. Dvěma osami prochází tzv. osní rovina. Tři osní roviny dělí krystalografický kříž na osm oktantů, v hexagonální a trigonální soustavě je to dvanáct dodekantů.

#### 2.2.4 Základní poměr parametrů krystalu

Osy krystalografického kříže krystalu jsou rovnoběžné s vektory základní strukturní buňky daného minerálu. Platí tedy:  $a \sim a_0$ ;  $b \sim b_0$ ;  $c \sim c_0$ . Libovolnou plochu na krystalu můžeme vyjádřit pomocí úseků, které plocha vytíná na jednotlivých krystalových osách a totéž platí i pro odpovídající strukturní rovinu. Vyjádříme-li to absolutně, budou mít úseky vytnuté strukturní rovinou v mřížce krystalu hodnoty, které jsou násobky velikosti základních mřížkových parametrů struktury v měřítku  $10^{-10}$  m.

Stejně tak vytíná úseky na jednotlivých krystalografických osách obecná plocha krystalu, která musí odpovídat konkrétnímu systému strukturních rovin.

Jak se zvětšuje velikost krystalu, zvětšují se i násobky úseků, které plocha vytíná na osách. Poměr těchto násobků se ale nemění, takže velikost krystalu nehraje ve stanovení poměru parametrů žádnou roli. Dvě plochy, které vytínají úseky na osách  $x_1:y_1:z_1 = 2a_0:2b_0:2c_0$  a  $x_2:y_2:z_2 = 3a_0:3b_0:3c_0$ , mají stejnou orientaci vůči osnímu kříži.

Aby bylo možné porovnávat plochy na různě velkých krystalech, posunujeme všechny plochy na ose b na jednotkovou vzdálenost od počátku. Numericky vyjádřeno:

$$a_0 : b_0 : c_0 \quad / \text{vše dělíme } b_0$$

$$a_0/b_0 : 1 : c_0/b_0$$

výsledkem je poměr  $a : b : c$ , kde  $b = 1$ .

Poměrný vztah vytnutých úseků  $a : b : c$ , kde  $b = 1$  označujeme jako základní poměr parametrů krystalu. Lze ho snadno vypočítat z mřížkových parametrů, které získáme RTG analýzou.

#### 2.2.5 Krystalové plochy

Všechny plochy na krystalu lze charakterizovat základním poměrem parametrů nebo jejich násobkem a takové plochy se označují jako základní. **Soubor krystalograficky stejnocenných ploch na krystalu se označuje jako krystalový tvar. Krystaly tvořené více krystalovými tvary se označují jako spojky.**

### 2.2.5.1 Weissovy a Millerovy symboly

Indexy krystalových ploch umožňují přesnou definici polohy každé plochy v souřadném systému. Starší symbolika z roku 1816 jsou tzv. Weissovy symboly, které vyjadřují trojpoměr součinu odvozovacích koeficientů a základního poměru parametrů  $ma : nb : pc$ , kde  $m, n, p$  jsou odvozovací koeficienty na daných osách. Je-li plocha rovnoběžná s některou ze souřadných os, je příslušný odvozovací index roven  $\infty$ . Např. plocha rovnoběžná s osou  $b$  a vytínající jednotkový úsek na osách  $a, c$ , je vyjádřena symbolem  $1a : \infty b : 1c$ . Plocha, která vytíná všechny tři osy v jednotkových úsecích má symbol  $1a : 1b : 1c$  a označuje se jako jednotková plocha. Weissovy symboly jsou jednoduché a názorné, ale dnes se používají Millerovy symboly zavedené v roce 1839. Millerovy symboly jsou celá malá nesoudělná čísla, která definují plochu na základě recipročních hodnot odvozovacích koeficientů bez potřeby znalosti základního poměru parametrů. Odvozovací indexy s hodnotou nekonečno ( $\infty$ ) se v symbolu označují nulou, např.  $\infty a : \infty b : c = (001)$ .

### 2.2.5.2 Indexování krystalových ploch

Vytvoření Weissova indexu pro určitou krystalovou plochu je poměrně snadné, pokud známe základní poměr parametrů a odhadneme odvozovací indexy. Většinou se ale pro indexování ploch používá Millerova symbolika, k jejímuž vytvoření potřebujeme pouze odvozovací indexy. Princip vytváření Millerových symbolů je stejný jako u indexování strukturních rovin. Je-li krystalová plocha rovnoběžná s některou osou, objeví se na odpovídajícím místě 0, např. plocha rovnoběžná s osami  $a, c$  má symbol  $(010)$ . Vytíná-li plochy osy v jednotkových úsecích má symbol  $(111)$ .

### 2.2.5.3 Symbolika v hexagonální a trigonální soustavě

V soustavách hexagonální a trigonální je princip indexování ploch zcela totožný, pouze krystalografický osní kříž je čtyřosý. Rovina kolmá na vertikálu (osa  $c$ ) obsahuje tři pasné osy  $a_1, a_2, a_3$ . Používá se systém indexování pomocí čtyř symbolů, tzv. **Bravaisovy symboly**. Indexy mají obecné označení  $(hkil)$  a pro pasné osy platí pravidlo, že hodnoty  $h + k + i = 0$ . Díky této závislosti se někdy uvádí jen tři hodnoty a čtvrtá se nahrazuje tečkou, protože je jasně dána, např.  $(21.1)$  musí být jednoznačně  $(21\bar{3}1)$ .

### 2.2.5.4 Základní typy krystalových ploch

Podle polohy krystalových ploch vůči krystalografickým osám, můžeme vyčlenit plochy jednoúsekové (utínají pouze jednu osu, s ostatními jsou rovnoběžné), dvojúsekové a trojúsekové.

### 2.2.5.5 Vlastnosti krystalových ploch na reálném krystalu



Krystalové plochy na reálném krystalu nemusí být dokonale vyvinuté nebo nemusí mít zcela hladký povrch. Při růstu krystalu v přírodních podmínkách dochází k řadě fyzikálně-chemických změn, které se odrazí na kvalitě krystalových ploch. Defekty na krystalových plochách se označují jako akcesorie a u některých minerálů mohou sloužit jako dobrý určovací znak.

### 2.2.6 Krystalové hrany a jejich indexování

Pro popis krystalových hran se používá Millerova symbolika, podobně jako při indexování uzlových přímk ve struktuře. Krystalografický směr osy a má Millerův symbol [100], směr osy b je [010] a směr osy c pak [001].

### 2.2.7 Význam závorek v Millerově symbolice

V Millerově symbolice se používá několik typů závorek, které mají svůj specifický význam:

- (hkl) – symbol značí konkrétní rovinu (plochu na krystalu) [hkl] – symbol značí konkrétní přímk (hranu na krystalu)
- {hkl} – symbol značí soubor krystalograficky ekvivalentních rovin, patřících jednomu krystalovému tvaru
- <hkl> – symbol označuje soubor krystalograficky ekvivalentních přímk.

morfologie krystalu – crystal morphology	osní kříž – crystallographic axes
krystalový tvar – crystal form	agregát - aggregate
krystalová hrana – crystal edge	Millerův symbol – Miller indices

## 2.3 Krystalové tvary

Obecně je termín krystalový tvar používán k vyjádření celkového vnějšího vzhledu krystalového tělesa. V krystalografii je pro vnější tvar krystalu používáno označení **habitus**, zatímco výraz **krystalový tvar** se používá ve speciálním významu. Pokud je těleso krystalu omezeno pouze stejnocennými krystalovými plochami, označujeme toto omezení jako jednoduchý krystalový tvar. Je-li těleso krystalu tvořeno dvěma a více krystalovými tvary, označujeme ho jako spojku.

V každém krystalovém oddělení (bodové grupě) existuje tvar, jehož plochy vytínají na jednotlivých krystalografických osách různé délky. Označuje se jako **obecný krystalový tvar** se symbolem {hkl}. Všechny ostatní krystalové tvary se označují jako **speciální**.

Krystalový tvar, jehož plochy zcela omezují krystalové těleso v prostoru, se označuje jako **uzavřený krystalový tvar**. Krystalový tvar, který sám o sobě není schopen omezit krystal, se nazývá otevřeným krystalovým tvarem a vyskytuje se vždy ve spojkách.

### **2.3.1 Krystalové tvary a symetrie**

Vztah mezi výchozí krystalovou plochou, prvky symetrie přítomnými na krystalu a výsledným krystalovým tvarem je důležitý. Vezmeme-li jako výchozí jednotkovou plochu (111), zobrazí se tato v oddělení se středem symetrie pouze jako otevřený tvar pinakoid (dvojploší), zatímco v nejvýše symetrickém oddělení kubické soustavy vznikne operacemi symetrie dalších 7 ploch a výsledkem je uzavřený tvar oktaedru.

**Počet ploch krystalového tvaru je určen symetrií krystalového oddělení.**

Plochy náležející jednomu tvaru se mohou lišit velikostí i morfologií díky deformacím krystalu, které vznikají v přírodních podmínkách.

Odvození méně symetrických krystalových tvarů je možné provést z tvarů holodrických systematickou redukcí krystalových ploch – tzv. meroedrickou operací.

### **2.3.2 Pojmenování krystalových tvarů**

Níže uvedená nomenklatura krystalových tvarů vychází z klasifikace Grotha (1895) s modifikací podle Reogerse (1935). Toto schéma rozlišuje 48 různých krystalových tvarů, rozlišených podle úhlových vztahů krystalových ploch. Všechny krystalové tvary lze rozdělit do sedmi krystalových soustav.

#### **2.3.2.1 Pedion**

Pedion je otevřený krystalový tvar obsahující jednu plochu. Vyskytuje se pouze na spojce alespoň dvou krystalových tvarů.

#### **2.3.2.2 Sfenoid**

Sfenoid je otevřený krystalový tvar složený ze dvou různoběžných ploch, souměrných podle dvojčetné rotační osy symetrie. Může se vyskytovat pouze na spojkách.

#### **2.3.2.3 Dóma**

Dóma je otevřený krystalový tvar složený ze dvou různoběžných ploch symetrických podle roviny symetrie. Vyskytuje se pouze na spojkách s dalšími krystalovými tvary.

#### **2.3.2.4 Pinakoid**

Pinakoid je otevřený krystalový tvar tvořený dvěma paralelními plochami. Vyskytuje se pouze na spojkách s jinými tvary.

#### **2.3.2.5 Pyramidy**

Pyramida je otevřený krystalový tvar, skládající se z různého počtu různoběžných ploch, které se protínají v jednom bodě. Pyramidy se vždy vyskytují na spojkách.

Podle počtu ploch rozlišujeme:

- trigonální pyramida má tři plochy
- rombická a tetragonální pyramida mají čtyři plochy
- hexagonální a ditrigonální pyramida mají šest ploch
- ditetragonální pyramida má osm ploch
- dihexagonální pyramida má dvanáct ploch.

### 2.3.2.6 Dipyramidy

Dipyramida je uzavřený krystalový tvar, skládající se z různého počtu různoběžných ploch. Polovina ploch se protíná v jednom bodě, druhá polovina ploch se protíná v bodě na opačném konci krystalu. Lze si ji představit jako dvě pyramidy navzájem souměrné podle horizontální roviny zrcadlení.

Podle počtu ploch rozlišujeme:

- trigonální dipyramida má šest ploch
- rombická a tetragonální dipyramida mají osm ploch
- hexagonální a ditrigonální dipyramida mají dvanáct ploch
- ditetragonální dipyramida má šestnáct ploch
- dihexagonální dipyramida má dvacet čtyři plochy.

### 2.3.2.7 Trapezoedry

Trapezoedr je uzavřený krystalový tvar s různým počtem ploch, které mají tvar asymetrických různoběžníků (na dobře vyvinutém jednoduchém tvaru). Polovina ploch se protíná v bodě na horním konci krystalu, druhá polovina v bodě na spodním konci krystalu a všechny plochy se stýkají v „klikatě“ běžících pasných hranách. Plochy v horní polovině krystalu jsou vůči spodním plochám mírně pootočený kolem vertikály (o méně než 60°). Tvar vzniká kombinací 3-, 4- nebo 6-četné rotační osy symetrie s kolmými dvojčetnými rotačními osami symetrie.

Podle počtu ploch rozlišujeme:

- trigonální trapezoedr má šest ploch
- tetragonální trapezoedr má osm ploch
- hexagonální trapezoedr má dvanáct ploch.

### 2.3.2.8 Skalenoedry

Skalenoedr je uzavřený krystalový tvar s různým počtem ploch, které mají na ideálním krystalu tvar skalenických trojúhelníků. Polovina ploch se protíná v bodě na horní polovině krystalu, druhá polovina se protíná v bodě na opačném konci. Pasné hrany mají klikatý průběh a plochy stýkající se v těchto hranách neleží nad sebou, ale jsou vůči horizontální rovině střídavě otočeny okolo 2-četné osy střídavě vpravo a vlevo.

Podle počtu ploch rozlišujeme:

- tetragonální skalenoedr má osm ploch
- ditrigonální skalenoedr má dvanáct ploch.

### 2.3.2.9 Disfenoidy

Disfenoid je uzavřený krystalový tvar, ve kterém se střídají dvě horní a dvě spodní plochy po 90°.

Podle symetrie rozlišujeme:

- rombický disfenoid
- tetragonální disfenoid.

### 2.3.2.10 Romboedr

Romboedr (klenec) je uzavřený krystalový tvar, na kterém se střídají tři horní plochy a tři spodní plochy po 60°.

### 2.3.2.11 Prizma

Prizma je otevřený krystalový tvar, skládající se z různého počtu různoběžných ploch, jejichž společné hrany (skutečné i myšlené) jsou vzájemně rovnoběžné.

Podle počtu ploch rozlišujeme:

- trigonální prizma má tři plochy
- rombické a tetragonální prizma mají čtyři plochy
- hexagonální a ditrigonální prizma mají šest ploch
- ditetragonální prizma má osm ploch
- dihexagonální prizma má dvanáct ploch.

### 2.3.2.11 Uzavřené tvary kubické soustavy

Všechny krystalové tvary kubické soustavy jsou uzavřené a mohou se vyskytovat pouze na kubických krystalech. Naopak tvary uvedené v předchozích kapitolách se nikdy neobjeví na kubickém krystalu.

**Krystalové tvary kubické soustavy rozlišujeme podle symetrie a počtu ploch.**

Základní krystalové tvary seřazené podle počtu ploch jsou uvedeny v přehledu:

- tetraedr má čtyři trojúhelníkové plochy, které se protínají ve stejně dlouhých hranách,
- hexaedr (krychle) má šest navzájem kolmých čtvercových ploch, které se sbíhají ve stejně dlouhých hranách,
- oktaedr má osm ploch ve tvaru rovnostranných trojúhelníků, které se sbíhají do bodu v horní a dolní polovině krystalu (podobně jako dipyramida),
- dvanáctiploché tvary tvoří rombický dodekaedr (dvanáctistěn kosočtverečný), trigon-tritetraedr (dvanáctistěn trojúhelníkový), tetragon-tritetraedr (dvanáctistěn čtyřúhelníkový) a pentagon-tritetraedr (dvanáctistěn pětiúhelníkový),
- čtyřiadvacetiploché tvary tvoří tetrahexaedr (čtyřiadvacetistěn krychlový), tetragon-trioktaedr (čtyřiadvacetistěn čtyřúhelníkový), trigon-trioktaedr (čtyřiadvacetistěn

trojúhelníkový), hexatetraedr, pentagon-trioktaedr (čtyřiadvacetistěn pětiúhelníkový) a didokaedr,

- čtyřicetiosmiplochý tvar je hexaoktaedr.

pedion – pedion	trapezoedr – trapezohedron
pinakoid – pinacoid	disfenoid – disphenoid
sfenoid – sphenoid	romboedr – rhombohedron
dóma – dome	skalenoedr – scalenohedron
pyramida – pyramid	krychle – hexahedron (cube)
dipyramida – dipyramid	oktaedr - octahedron

## 2.4 Popis krystalografických oddělení (bodových grup)

K označení každého krystalového oddělení (bodové grupy) je použito mezinárodního Hermann - Mauguinova symbolu. Zastoupení minerálů v jednotlivých soustavách není rovnoměrné, nejvíce je minerálů s vysokou symetrií, přibližné zastoupení uvádí přehled:

triklinická (2 %), monoklinická (21 %), rombická (20 %), tetragonální (12 %), hexagonální (19 %) a kubická (26 %).

Největší počet minerálních druhů je zastoupen v *holoedrickém* oddělení každé soustavy. Tato oddělení jsou uvedena v následujícím přehledu.

### 2.4.1 Soustava triklinická

Krystaly triklinické soustavy se vztahují ke krystalografickému kříži se třemi nezávislými osami a, b, c, které svírají zcela obecné úhly. Pro orientaci triklinických krystalů v prostoru jsou obvykle dodržována tato základní pravidla:

1. Nejvýraznější zóna je vertikální; osa této zóny je totožná s krystalografickou osou c.
2. Tvar {001} se svažuje dopředu doprava
3. Ve vertikální zóně mohou být vybrány dva tvary - jeden jako {100} a druhý jako {010}.

Směr os a a b je pak určen protnutím těchto tvarů. Osa b by měla být delší než osa a.

Obecně by mělo pro mřížkové parametry platit, že  $c_0 < a_0 < b_0$  a všechny úhly jsou tupé.

#### Oddělení triklinicky pinakoidální (symbol –1)

Jediným prvkem symetrie tohoto oddělení je střed symetrie (jednočetná inverzní osa symetrie). Obecným tvarem oddělení je otevřený krystalový tvar – pinakoid. Pinakoid je tvořen dvěma identickými paralelními plochami. Je-li krystal orientován vzhledem k souřadným osám, Millerovy indexy pinakoidu určují jeho pozici:

- a) jednoúsekové pinakoidy  $\{100\}$ ,  $\{010\}$  a  $\{001\}$ . Každý z těchto pinakoidů protíná jednu krystalografickou osu a s ostatními je rovnoběžný. Pinakoid a (přední) protíná osu a; pinakoid b (boční) protíná osu b; pinakoid c (bazální) protíná osu c.
- b) dvojúsekové pinakoidy  $\{0kl\}$ ,  $\{h0l\}$  a  $\{hk0\}$ . Tvar  $\{0kl\}$  je rovnoběžný s osou a a může být pozitivní  $\{0kl\}$  nebo negativní  $\{0-k-l\}$ ; tvar  $\{h0l\}$  je rovnoběžný s osou b a může být pozitivní  $\{h0l\}$  nebo negativní  $\{-h0-l\}$ ; tvar  $\{hk0\}$  je paralelní s osou c a je pozitivní  $\{hk0\}$  nebo negativní  $\{-h-k0\}$ .
- c) trojúsekový pinakoid  $\{hkl\}$ . Tvar  $\{hkl\}$  je pozitivní pravý,  $\{h-kl\}$  je pozitivní levý,  $\{hk-l\}$  je negativní pravý a  $\{h-k-l\}$  je negativní levý. Každý z těchto dvojplochých tvarů se může vyskytovat nezávisle na jiném.

V tomto oddělení krystalují např. chalkantit (modrá skalice), mikroklin, plagioklasy, rodonit, wollastonit a další.

#### 2.4.2 Soustava monoklinická

Krystaly s monoklinickou symetrií se vztahují ke třem nestejnocenným osám, úhly  $\alpha$  a  $\gamma$  jsou  $90^\circ$ . Ve většině krystalů je úhel  $\beta$  (mezi osami a, c) větší než  $90^\circ$ , někdy je velmi blízký této hodnotě (např. staurolit). V takovém případě není monoklinická symetrie zřejmá z morfologie a krystal se označuje jako pseudorombický.

Prvky symetrie mohou být rovina symetrie a dvojitá rotační osa symetrie nebo jejich kombinace (vzniká pak i střed symetrie). Rotační dvojitá osa symetrie nebo směr kolmý k rovině symetrie jsou orientovány souhlasně s krystalografickou osou  $b$ , osa  $a$  se sklání vpřed a osa  $c$  je vertikální. Osa  $b$  je dána jednoznačně, ze zbývajících dvou směrů volíme za vertikálu směr růstový (nejhustěji obsazené uzlové přímky) – pro volbu parametrů základní buňky platí  $c_0 < a_0$ .

#### Oddělení monoklinicky prizmatické (symbol $2/m$ )

Rotační 2-četná osa symetrie je orientována souhlasně s krystalografickou osou  $b$ , osy  $a$ ,  $c$  leží v rovině symetrie, která je kolmá na směr osy  $b$ . Krystalografická osa  $a$  je skloněna vpřed a protíná těleso krystalu v jeho spodní části.

V oddělení mohou být přítomny dva krystalové tvary – pinakoid a prizma (obecný tvar). Prizma je čtyřplochý otevřený krystalový tvar  $\{hkl\}$  trojúsekových ploch. Z dvojúsekových ploch se operacemi souměrnosti zobrazí prizmata  $\{0kl\}$  a  $\{hk0\}$ . Prizma  $\{0kl\}$  protíná osy  $b$  a  $c$  a je paralelní s osou  $a$ . Obecný tvar může mít také formu spojky dvou nezávislých prizmat  $\{hkl\}$  a  $\{hk-l\}$ .

Pinakoidy rozlišujeme podle orientace na pinakoid přední (pinakoid a) se symbolem  $\{100\}$ , boční (pinakoid b) se symbolem  $\{010\}$  a bazální (pinakoid c) se symbolem  $\{001\}$ . Dále existují dvojúsekové pinakoidy  $\{h0l\}$  a  $\{-h0l\}$ , které jsou navzájem nezávislé.

V tomto oddělení krystalizují např. tyto minerály: amfiboly, pyroxeny, ortoklas, slídy, sádrovec, titanit, epidot, malachit.

### 2.4.3 Soustava rombická

Krystalové tvary se vztahují ke třem různocenným krystalografickým osám a, b, c. Osy svírají navzájem úhel  $90^\circ$ . Relativní délka os (jejich vzájemný poměr) je pro každý rombický minerál jiný. Krystaly se zpravidla orientují tak, že nejdelší růstový směr je ve směru vertikály (směr osy c), z pasných os je delší osa b. Pokud je na krystalu vyvinut výrazně pinakoid tak, že je krystal tabulkovitý, je tento pinakoid obvykle orientován jako  $\{001\}$ .

V symetrii rombických krystalů se vyskytují dvojčetné rotační osy, roviny symetrie nebo jejich vzájemná kombinace. Tyto kombinace dávají vzniknout třem bodovým grupám (krystalografickým oddělením).

#### Oddělení rombicky dipyramidální (symbol $2/m\ 2/m\ 2/m$ )

Krystaly tohoto oddělení jsou symetrické podle tří různocenných roviny symetrie, které jsou rovnoběžné s osními rovinami. V jejich průsečnicích vznikají tři různocenné dvojčetné rotační osy symetrie, které jsou totožné s krystalografickými osami. Společný průsečík všech prvků symetrie je střed symetrie.

Obecným tvarem  $\{hkl\}$  je rombická dipyramida, která je složena z osmi trojúsekových ploch ve tvaru nerovnostranného trojúhelníku (skalnický trojúhelník). Pokud se jeden z odvozovacích indexů rombické dipyramidy zvětšuje až do nekonečna, vzniká jedno ze tří dvojúsekových prizmat  $\{hk0\}$ ,  $\{h0l\}$  a  $\{0kl\}$ . Jednoúsekové plochy se v tomto oddělení zobrazují jako pinakoidy  $\{100\}$ ,  $\{010\}$  a  $\{001\}$ .

V tomto oddělení krystaluje řada důležitých minerálů: amfiboly, pyroxeny, andalusit, baryt, topaz, síra, aragonit, antimonit, olivín a další.

### 2.4.4 Soustava tetragonální

Krystaly s tetragonální symetrií se vztahují k trojosému pravoúhlému krystalografickému kříži, ve kterém je osa c vertikální a osy a, b jsou na ni kolmé a vzájemně stejnocenné. Často se používá označení pasných os jako  $a_1$  a  $a_2$ . Krystaly se orientují čtyřčetnou rotační osou nebo čtyřčetnou inverzní osou symetrie ve směru vertikály. Plochy se obecně značí symbolem  $(hkl)$ , kdy platí  $h > k$ .

#### Oddělení ditetragonálně dipyramidální (symbol $4/m\ 2/m\ 2/m$ )

Vertikální krystalografická osa  $c$  je totožná se čtyřčetnou rotační osou symetrie, na kterou je kolmá horizontální rovina symetrie. Kombinace těchto prvků symetrie vyvozuje existenci  $2 + 2$  vertikálních rovin symetrie, jejichž průnik s horizontální rovinou dává vzniknout  $2 + 2$  dvojčetným rotačním osám. Dvě dvojčetné rotační osy odpovídají krystalografickým osám  $a_1$ ,  $a_2$  a druhé dvě mají mezosní směr – svírají s  $a_1$  a  $a_2$  úhel  $45^\circ$ .

Z plochy v obecné poloze vznikne přítomnými prvky symetrie obecný tvar ditetragonální dipyramida  $\{hkl\}$ . Tvar je složený z 16 nerovnostranných trojúhelníků a v pasném řezu najdeme pravidelný osmiúhelník - ditetragon. Odvozovací indexy na jednotlivých osách mohou nabývat hodnot v intervalu ( $n > 1$ ,  $n < \infty$ ).

Pokud budou odvozovací indexy na obou pasných osách právě 1, páry ploch nad oktanty splynou v jedinou plochu a ditetragonální pasný průřez se změní na prvořadý tetragonální a vznikne prvořadá tetragonální dipyramida  $\{hhl\}$ . Pokud bude odvozovací index na jedné z pasných os právě  $\infty$ , splývají páry ploch ležících ve dvou sousedních oktantech a výsledkem je tvar druhořadé tetragonální dipyramidy  $\{h0l\}$ .

Vyjdeme-li z ditetragonální dipyramidy a odvozovací parametr na ose  $c$  bude  $\infty$ , dostaneme tvar ditetragonálního prizmatu  $\{hk0\}$ , který se skládá z osmi pravoúhlých vertikálních ploch, které svírají střídavě ostřejší a tupější úhly.

Podle stejného principu odvodíme z tetragonální protodipyramidy a deuterodipyramidy tetragonální prvořadé prizma (protoprizma)  $\{110\}$  a tetragonální druhořadé prizma (deuteroprizma)  $\{100\}$ .

Bazální pinakoid  $\{001\}$  vzniká, když odvozovací indexy na obou pasných osách dosáhnou hodnoty  $\infty$ . Tvar je složen ze dvou paralelních ploch, kolmých k 4-četné rotační ose.

[S touto symetrií krystaluje např. kasiterit, zirkon, rutil nebo vesuvián.](#)

#### 2.4.5 Soustava hexagonální

Krystalová oddělení v hexagonální soustavě vychází z hexagonální strukturní mřížky, a krystaly jsou popisovány vzhledem k čtyřosému krystalografickému kříži. Tři osy, označované jako  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , leží v horizontální (pasné) rovině, mají stejnou délku a svírají úhel  $120^\circ$  mezi svými pozitivními konci. Čtvrtá je vertikální osa  $c$ . Osní roviny rozdělují prostor osního kříže na dvanáct dodekantů.

Ve směru vertikály je orientována šestičetná rotační nebo inverzní osa symetrie, takže do této soustavy řadíme i oddělení  $-6$  a  $-6m2$ , která mají trigonální symetrii ( $-6 = 3/m$ ). Indexování ploch pomocí Millerových symbolů je v tomto osním systému nevýhodné (např. plochy jednoho tvaru mají různé symboly). Mnohem lépe vyhovují čtyřčíselné indexy ploch



označované jako Bravaisovy symboly (hk-il). Třetí číslice v symbolu je sumou prvních dvou, násobená -1; jinak vyjádřeno platí:  $h + k + i = 0$ .

### **Oddělení dihexagonálně dipyramidální (symbol 6/m 2/m 2/m)**

Vertikální osa  $c$  je totožná s rotační šestičetnou osou symetrie, v pasné rovině leží šest dvojčetných os – tři souhlasí s krystalografickými osami a tři půlí úhel mezi nimi. Dále je přítomna jedna pasná rovina symetrie a šest rovin vertikálních.

Obecným tvarem oddělení je dihexagonální dipyramida {hk-il} složená z 24 ploch ve tvaru rovnoramenných trojúhelníků. Pasný řez odpovídá pravidelnému dihexagonu – dvanáctiúhelník se střídajícími se ostřejšími a tupějšími úhly.

Dosáhne-li odvozovací index na jedné z os v pasné rovině  $n = 1$ , spojí se plochy v dodekantech a vznikne hexagonální dipyramida prvořadá (protodipyramida) {h0-hl}. Dosáhne-li odvozovací index obecného tvaru na jedné z os  $n = 2$ , vznikne hexagonální dipyramida druhořadá (deuterodipyramida) {hh-2hl}. Rozlišení obou tvarů je možné na vhodné spojce.

Dosáhne-li odvozovací parametr na ose  $c$  hodnoty  $\infty$ , vznikne z dihexagonální dipyramidy dihexagonální prizma {hk-i0}, z hexagonální protodipyramidy hexagonální protoprizma {10-10} a z hexagonální deuterodipyramidy hexagonální deuteroprizma {11-20}. Protoprizma se skládá ze šesti vertikálních ploch, z nichž každá vytíná dva stejné úseky na horizontálních osách a s třetí je paralelní. Deuteroprizma se skládá také ze šesti vertikálních ploch, které ale protínají dvě horizontální osy ve stejné délce a třetí osu v délce poloviční.

Bazální pinakoid {0001} je složen ze dvou rovnoběžných ploch, které jsou kolmé k šestičetné ose a paralelní s horizontální rovinou symetrie.

### **2.4.6 Soustava trigonální**

Krystalografický osní kříž je totožný s křížem hexagonální soustavy, pouze ve směru vertikální osy  $c$  najdeme vždy trojčetnou rotační nebo trojčetnou inverzní osu symetrie. Indexování krystalových ploch má stejný princip jako v hexagonální soustavě.

### **Oddělení ditrigonálně skalenoedrické (symbol $\bar{3}2/m$ )**

Ose  $c$  odpovídá trojčetná inverzní osa symetrie (kombinace trojčetné rotační osy a středu symetrie), tři dvojčetné rotační osy symetrie odpovídají třem pasným osám. Tři vertikální roviny symetrie v meziosních směrech jsou kolmé na dvojčetné osy.

Obecným tvarem oddělení je ditrigonální skalenoedr, který můžeme odvodit z dihexagonální dipyramidy střídavým vynecháváním dvou ploch v horní a dolní polovině krystalu. Plochy

skalenoedru jsou omezeny třemi různocennými hranami a mají tvar skalenického trojúhelníku. Rozlišujeme ditrigonální skalenoedr pozitivní {hk-il} a negativní {kh-il}.

Dosáhne-li odvozovací index na ose c hodnoty  $p = \infty$  vzniká dihexagonální prizma {hk-i0}. Je-li odvozovací index ditrigonálního skalenoedru na některé z pasných os  $n = 1$  vzniká protoromboedr (prvořadý klenec) pozitivní {h0-hl} a negativní {0h-hl}. Krystalový tvar se skládá ze šesti ploch kosočtvercového omezení. Romboedr, jehož odvozovací parametr dosáhne na vertikále hodnotu  $p = \infty$ , přechází na hexagonální protoprizma {10-10}.

Odvozovací index ditrigonálního skalenoedru s hodnotou  $n = 2$  na pasné ose dává vzniknout hexagonální deuterodipyramidě {hh-2hl}. Z odvozovacího parametru  $p = \infty$  na vertikále odvodíme hexagonální deuteroprizma {11-20}. Na krystalech tohoto oddělení může být přítomen i bazální pinakoid {0001}.

V tomto oddělení krystalují některé velmi důležité minerály, např. kalcit, siderit, magnezit, hematit nebo korund.

#### 2.4.7 Soustava kubická

Krystaly kubické soustavy se vztahují ke třem navzájem kolmým krystalografickým osám stejné délky. Pouze formálně se tyto stejnocenné osy označují  $a_1, a_2, a_3$ .

Symboly v mezinárodním značení odpovídají krystalograficky významným směrům – první symbol je vztažen ke směru krystalografických os (mohou být přítomny tři 4-četné rotační nebo inverzní osy symetrie, nebo tři 2-četné osy symetrie), druhý symbol odpovídá směru tělesové úhlopříčky krychle (směru čtyř diagonálních inverzních os trojčetné symetrie) a třetí symbol odpovídá prvku symetrie ve směru protilehlých hran krychle (celkem šest směrů stěnových úhlopříček krychle).

Při označování krystalových tvarů se vybírá symbol, kde jsou h, k, l kladné hodnoty (pokud je to možné) a  $h > k > l$ .

#### Oddělení kubicky hexaoktaedrické (symbol 4/m $\bar{3}$ 2/m)

Krystalovým osám odpovídají tři čtyřčetné rotační osy symetrie, na něž jsou kolmé tři osní roviny symetrie. V diagonálních směrech leží čtyři trojčetné inverzní osy symetrie. Šest dvojčetných rotačních os symetrie pólí úhly mezi krystalografickými osami a na ně je kolmých šest diagonálních rovin symetrie. Přítomen je i střed symetrie. Toto oddělení obsahuje maximální možnou kombinaci prvků symetrie a obecným tvarem je hexaoktaedr (osmačtyřicetistěn).

Hexaoktaedr {hkl} má nad každým oktantem okolo trojčetné inverzní osy šest rovnocenných trojúhelníkových ploch. Tyto vytínají všechny tři osy v různých délkách. Nejběžnějším tvarem je {321}.

Bude-li odvozovací index na všech krystalografických osách  $n = 1$ , splyne šest ploch nad každým oktantem do jediné a vznikne oktaedr  $\{111\}$ . V stereografické projekci leží poziční body oktaedru na trojčetných inverzních osách.

Dosáhnou-li odvozovací parametry plochy na dvou osách stejné hodnoty, vzniknou z hexaoktaedru dva hemiedry. V prvním případě splývají dvojploši hexaoktaedru mezi digirami a vzniká tetragon-trioktaedr (čtyřiadvacetistěn deltooidový)  $\{hkk\}$ . Nejběžnějším tvarem je  $\{211\}$ . Druhou možností je případ, kdy nové plochy tvaru vznikají splynutím dvojploši hexaoktaedru mezi tetragramy a vzniká tak trigon-trioktaedr (čtyřiadvacetistěn trojúhelníkový)  $\{hhk\}$ . Nejběžnější je tvar  $\{221\}$ .

Dosáhne-li na trigon-trioktaedru delší úsek  $n = \infty$ , splynou dvě plochy podle osních rovin symetrie a vznikne rombický dodekaedr (dvanáctistěn kosočtverečný)  $\{110\}$ .

Z hexaoktaedru odvodíme další krystalový tvar prodloužením jednoho úseku na libovolné ose na  $n = \infty$ . Splynou tak do nových ploch dvojploši podél osních rovin symetrie a vznikne tetrahexaedr (čtyřiadvacetistěn krychlový)  $\{hk0\}$ .

Pokud úseky na dvou osách budou  $n = \infty$  vznikne hexaedr (krychle)  $\{100\}$ .

[V tomto oddělení krystalují např. minerály: granát, fluorit, spinelidy nebo galenit.](#)

## **2.5 Krystalové srůsty**

Dokonalé (automorfni) krystaly jsou v přírodě relativně vzácné. Většina minerálů se vyskytuje ve formě zrnových agregátů, většinou jako součást hornin. Tato krystalová zrna jsou obecně xenomorfni (nepravidelně omezená), ale jejich vnitřní stavba je krystalická a symetrie odpovídá příslušné bodové grupě. Srůsty zrn v agregátu jsou zcela nahodilé, bez jakékoliv zákonitosti.

Relativně běžné jsou ale i srůsty dobře vyvinutých krystalů nebo nepravidelných zrn, které nejsou náhodné. Je to např. srůst shodných krystalických látek nebo prorůstání dvou krystalických látek různého složení (epitaxie). Tyto srůsty se řídí určitými pravidly a obecně se označují jako zákonité.

### **2.5.1 Náhodné srůsty**

Při krystalizaci se obvykle tvoří více krystalizačních zárodků, které se postupně vyvíjí a mají vzájemně zcela nahodilou orientaci. Vzniklé krystaly se pak navzájem dotýkají nebo srůstají bez jakékoliv morfologické závislosti a takové srůsty označujeme jako náhodné nebo nezakonité.

## 2.5.2 Zákonité srůsty

Srůsty některých minerálů se řídí svojí strukturou a tato srůstová zákonitost se projeví i v morfologické orientaci srůstajících krystalů. Obvykle se rozlišují srůsty paralelní, dvojčatné, vícečatné a epitaktické.

### 2.5.2.1 Paralelní srůsty

Paralelní srůst je agregát identických krystalů, jejichž krystalografické osy a plochy jsou paralelní. Takové agregáty (i když reprezentovány několika jedinci) označujeme stále jako monokrystaly (vzhledem k jejich struktuře). Srůsty tohoto typu jsou velmi pravděpodobné, protože na úrovni atomů je celková potenciální energie uspořádání atomů ve struktuře nižší než u náhodných srůstů. Příklady takových srůstů najdeme u křemene, kalcitu nebo barytu .

Při krystalizaci může díky odlišnostem ve fyzikálních podmínkách dojít k mírnému vychýlení jednotlivých krystalů z paralelního směru. Takový srůst se pak označuje jako hypoparalelní srůst. Rovněž paralelní obrůstání horní poloviny krystalu nebo narůstání krystalů na sebe ve směru vertikály se zpravidla řadí k paralelním srůstům. Příkladem mohou být holubníkovitý, resp. žezlovitý srůst křemene nebo cvočkovité srůsty kalcitových klenců.

### 2.5.3.2 Dvojčatné srůsty

Jedná se o symetrický srůst dvou nebo více krystalů stejné látky. Tyto krystalograficky definované srůsty se označují jako dvojčatné krystaly (nebo dvojčata). Individua obou krystalů jsou vzájemně souměrná podle dvojčatného prvku symetrie (pozor ne dvojčetný!), který je vzájemně převádí do dvojčatné pozice. Často se na tělese dvojčatného krystalu objevují tupé úhly krystalových hran. Dvojčatné srůsty krystalů se vyjadřují zákonem dvojčatné symetrie, kterým může být:

1. dvojčatná rovina symetrie (krystalová plocha  $(hkl)$  nebo rovina symetrie).
2. dvojčatná osa symetrie (osa zóny, kolmice na dvojčatnou rovinu nebo lichočetná osa symetrie).

Zákon dvojčatné symetrie (zkráceně dvojčatný zákon) definuje dvojčatnou rovinu symetrie  $(hkl)$  nebo dvojčatnou osu symetrie  $[uvw]$ . Dvojčatné srůsty je možné charakterizovat i pomocí roviny dvojčatného srůstu. Ve většině případů se jedná o rovinu totožnou s dvojčatnou rovinou symetrie.

Dvojčatné krystaly jsou obvykle rozdělovány na **kontaktní dvojčata** (dotyková) a **penetrační dvojčata** (prorostlice). Kontaktní dvojčata se srůstají v dvojčatné rovině (mají pravidelný dotykový povrch), penetrační dvojčata jsou definována zpravidla směrem dvojčatné osy - jejich srůstová plocha je nepravidelná.

### 2.5.4.3 Vícenásobné srůsty

Vícenásobné dvojčatění vzniká, pokud opakovaně aplikujeme stejný dvojčatný zákon. Při dvojnásobném opakování vznikají trojčata, při trojnásobném opakování čtyřčata atd. Srůstá-li podle stejného zákona více jedinců, označujeme dvojčatění jako opakované nebo častěji **polysyntetické**. Jsou-li srůstové plochy rovnoběžné, vzniká polysyntetické dvojčatění, které posunuje jednotlivé krystaly určitým směrem, např. dvojčatění plagioklasů podle albitového zákona nebo polysyntetický srůst aragonitu.

Pokud nejsou srůstové plochy dvojčatných krystalů rovnoběžné, vzniká **cyklické** dvojčatění. Vznikají tak cyklická trojčata nebo čtyřčata nebo dvanáctčata a za určitých podmínek se může pomyslný kruh uzavřít.

Cyklické nebo penetrační srůsty některých minerálů vedou ke vzniku dojmu, že celková symetrie tělesa je vyšší než skutečná (pseudosymetrie). Takové srůsty se označují jako **mimetické** a setkáváme se s nimi např. u aragonitu nebo křemene.

#### 2.5.4.5 Epitaxe

Pokud podle určitého pravidla srůstají dvě různé krystalické látky, mluvíme o epitaxi. Může se jednat o srůsty dvou polymorfních modifikací, kdy složení je shodné, ale odlišuje se struktura, nebo dva různé minerály, jejichž složení a struktura jsou rozdílné. Důvodem takového srůstu je existence strukturních rovin u obou minerálů, které jsou si na úrovni atomové stavby podobné. Příkladem může být srůst staurolitu podle plochy (010) s kyanitem podle plochy (100), prorůstání plagioklasu podle (001) s mikroklinem podle (001) či (010), srůst tabulkovitého xenotimu a sloupcovitého zirkonu podle zóny [001] nebo rutilu a hematitu.

#### 2.5.3 Pseudomorfózy

Jako pseudomorfóza se označuje jev, kdy vnější tvar minerálu neodpovídá jeho chemickému složení. Vzniká nahrazením původního minerálu jiným minerálem, který zaujme krystalový tvar předchozího. Příkladem může být nahrazení kubického krystalu pyritu limonitem, potom hovoříme o pseudomorfóze limonitu po pyritu. Mezi pseudomorfózami se někdy vyčleňují různé typy podle geneze.

Pseudomorfóza s.s. probíhá rozpouštěním jednoho minerálu za současné krystalizace druhého při zachování původního tvaru např. z prostorových důvodů. Mezi oběma minerály nedochází k chemické reakci. Příkladem může být vyloužení barytu a jeho nahrazení křemenem.

Pseudomorfóza alterací je založena na přeměně původního minerálu, kdy nahrazující minerál vzniká chemickou reakcí z původního minerálu při zachování původního tvaru. Běžnými příklady je reakce anhydritu na sádrovec nebo přeměna galenitu na anglesit.

**Perimorfóza** (obalová pseudomorfóza) je případ, kdy na původní minerál vykrystaluje tenká vrstvička symetricky odlišného minerálu. Symetrie minerálu, který vidíme, neodpovídá jeho chemickému složení, příkladem může být tenký povlak křemene narostlý na kubickém krystalu fluoritu. Původní minerál může být přítomen pod vrstvičkou nového minerálu, nebo může být postupem času rozpuštěn a odstraněn.

**Paramorfóza** je případ vzájemné přeměny polymorfních modifikací určité látky. Při změně PT podmínek je původní polymorfní modifikace nahrazena jinou, ale původní symetrie je zachována. Typickým příkladem je křemen ve výlevných horninách, kdy při krystalizaci vzniknou krystaly hexagonálního  $\beta$ -křemene a během chladnutí horniny dojde při 573°C k přeměně na  $\alpha$ -křemen, ale původní tvar je zachován.

**Zoomorfóza** nebo **fytomorfóza** je případ kdy vhodný minerál impregnuje živočišnou nebo rostlinnou fosílii a získává tak její tvar.

kontaktní dvojčce – contact twins	pseudomorfóza – pseudomorphism
penetrační dvojčce – penetration twins	epitaxe – epitaxis