

DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE



Deformacijski mehanizmi - procesi deformacije kamnin, ki potekajo v mikroskopskem in atomskem merilu. Lahko so *lomni* ("brittle") ali *duktilni* ("ductile").

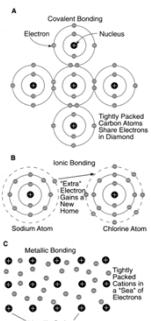
[PONOVIMO: kaj vse vpliva na reologijo minerala/kamninev?]

Mikrostrukture - strukture, ki nastajajo v tem merilu.

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

1

Kristalna struktura in trdnost snovi

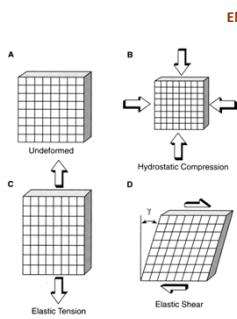


Kristalna mreža in tipi vezi v kristalih
Atomi, ioni in molekule so urejeni v kristalno mrežo; njihov razpored je ravnotežen in tak, da rabi kar najmanj energije. Glavni tipi vezi v kristalih: kovalentna, ionska, kovinska.

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

2

Kristalna struktura in trdnost snovi



Elastična deformacija kristalne mreže

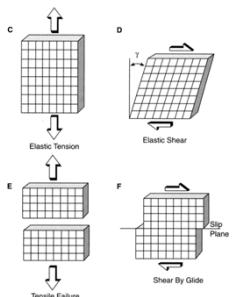
Pri elastični deformaciji se pod vplivom napetosti zmanjša/poveča razdalja med atomi kristalne mreže idealnega(!) kristala. Če napetost popusti, se atomi zaradi potencialne energije vezi med njimi vrnejo v prvotno lego.
Lahkoto "težavnost" deformacije - točnost kristalne mreže - podajajo moduli elastičnosti (E, G, K). Ti moduli imajo višje vrednosti pri kristalih z bolj nefleksibilnimi vezmi.

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

3

Kristalna struktura in trdnost snovi

Prekoračitev meje elastičnosti

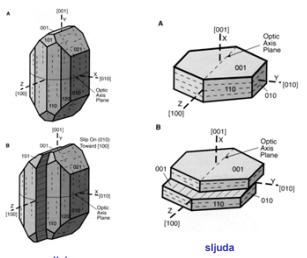


Vazi v kristalu se pretrgajo; potek razpoke je odvisen od zgradbe kristala (planske sibkosti) in smeri napetosti. Laho pa pride le do zdrsa v kristalni mreži: premaknjeni atomi ponovno vzpostavijo vezi s sosednjimi atomi \Rightarrow spremeni se oblika kristala.

Kristalna struktura in trdnost snovi

Drsni sistemi v kristalih

Zdrsi v kristalni mreži potekajo vz dolž značilnih drsnih ploskev in v značilnih smereh \Rightarrow ploskev in smer zdrsa definirata drsni sistem.



Lega in orientacija drsnih sistemov je odvisna od vrste in moči vezi v kristalni mreži, ter od prostorskega razporedja vezi in atomov v mreži. Razkolne ploskve v kristalih kažejo, v katerih smereh so vezi najšibkejše. Nekateri minerali (npr. kremen) razkolnosti nimajo.

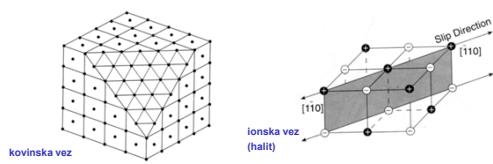
Kristalna struktura in trdnost snovi

Drsni sistemi v kristalih

Kovinska vez: najlažji zdrs, kjer so kationi najgosteji (najmanjša razdalja za premik kationa z enega mesta na drugega v kristalni mreži)

Ionski kristali: najlažji zdrs v takih smereh, da ne pridejo v stik ioni z enakim nabojem (primer: halit)

Kompleksni kristali: zdrsi v ravneh, kjer je treba pretrgati najšibkejše vezi ali kar najmanjše število močnih vezi. V silikatih se denimo razkolne in drsne ploskve izogibajo močni kovalentni vezi med Si in O (\Rightarrow zato je kremen (čisti Si oksid) tako trden).



Kristalna struktura in trdnost snovi

Theoretična trdnost kristalov

Theoretična trdnost (meja elastičnosti) kristala je odvisna od tipa in moči vezi, naboja in razdalj med atomi, ter simetrije kristala in jo je mogoče računsko določiti. Minerali z zelo nizko trdnostjo se običajno lahko deformirajo s sočasnimi premiki ob mnogih drsnih sistemih \Rightarrow duktilni tok. Vezi določajo tudi kemijske lastnosti minerala \Rightarrow njegovo reaktivnost in obnašanje ob deformaciji.

Material	Shear Strength (GPa)	Cleavage Strength (GPa)
Metallic Cu	1.2	3.9
NaCl (ionic solid)	2.84	0.43
MgO (simple oxide)	1.6	3.7
Quartz (covalent solid)	4.4	16
Diamond (covalent solid)	121	205

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

7

Kristalna struktura in trdnost snovi

Napake in nepravilnosti v kristalni mreži

Dejanske izmerjene trdnosti kristalnih mrež so mnogo manjše od teoretičnih vrednosti, kar je posledica napak in nepravilnosti v kristalni mreži.

dejanske vrednosti

Mineral or Rock Type	Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Cu	10	—
Calcite	14	—
Halite	27	—
Shale	30	8
Sandstone	50	10
Limestone	80	10
Basalt	100	10
Granite	160	14
Quartzite	360	—

teoretične vrednosti

Material	Shear Strength (GPa)	Cleavage (tensile) Strength (GPa)
Metallic Cu	1.2	3.9
NaCl (ionic solid)	2.84	0.43
MgO (simple oxide)	1.6	3.7
Quartz (covalent solid)	4.4	16
Diamond (covalent solid)	121	205

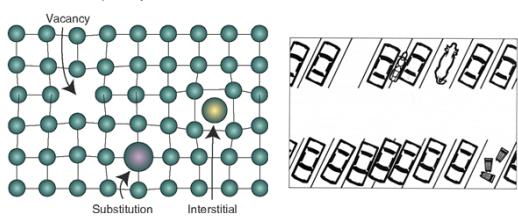
Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

8

Kristalna struktura in trdnost snovi

Napake in nepravilnosti v kristalni mreži

Točkovne nepravilnosti: prazna mesta v mreži, intersticiji atomi, vključki "nečistoč". Primer: praznine pomagajo pri procesu difuzije atomov. Intersticiji atomi in vključki lahko povečajo trdnost mreže.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

9

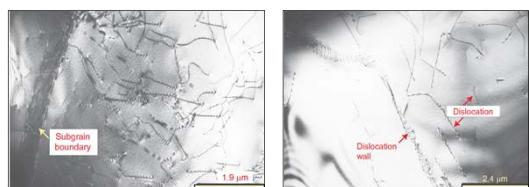
Kristalna struktura in trdnost snovi

Napake in nepravilnosti v kristalni mreži

Linearne nepravilnosti ali dislokacije.

Planarne nepravilnosti: meje med zrni, "subkristali", mehanski dvojčki.

Ostale nepravilnosti: tekočinski vključki, mikrorazpoke.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

10

Deformacijski mehanizmi

Kateri deformacijski mehanizmi bodo delovali pri deformaciji in kako se bodo kristalne strukture v kamnini deformirale, je odvisno predvsem od mineralne sestave, velikosti zrn, temperature, okoliškega pritiska, pritiska fluidov, diferencialne napetosti in hitrosti obremenjevanja. V kamninah z le eno mineralno fazo ponavadi zadostuje eden ali dva deformacijska mehanizma, v kamninah z več minerali in v spreminjačajočih se pogojih pa lahko nastopa mnogo različnih kombinacij.

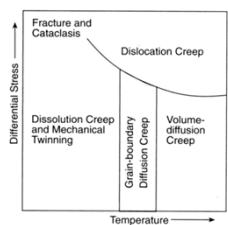
Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

11

Deformacijski mehanizmi

Deformacijski diagram kaže, ob kakšnih fizikalnih pogojih delujejo različni deformacijski mehanizmi. Glavni deformacijski mehanizmi so:

- mikrolom, kataklaza in trenjsko drsenje
- mehansko dvojčenje
- lezenje (difuzivno, disolučijsko in dislokacijsko)

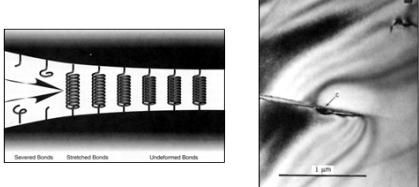


Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

12

Mikrolom, kataklaza in trenjsko drsenje

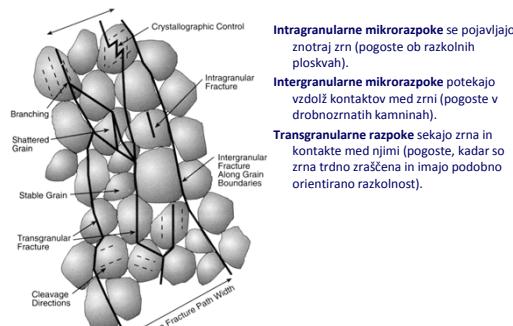
so lomne deformacije v zrnskem in subzrnskem merilu. Zaradi napetosti nastajajo mikrorazpoke, ki rastejo in se povezujejo v večje razpoke. Zaradi mikrorazpok, ki "koncentrirajo" napetosti (gl. Griffithovo teorijo v poglavju o razpokah), je porušna trdnost kamnin in mineralov pri nizkih temperaturah precej nižja od teoretične. Mikrorazpoke začnejo rasti na mejah med zrni, ob vključkih, porah, dvojčkih, dislokacijah, itd. Napetosti, ki povzročijo nastanek mikrorazpok, lahko nastanejo zaradi tektonike, gravitacijske ali termične obremenitev.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

13

Mikrolom, kataklaza in trenjsko drsenje



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

14

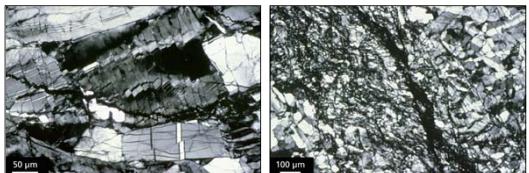
Mikrolom, kataklaza in trenjsko drsenje



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

15

Mikrolom, kataklaza in trenjsko drsenje



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

16

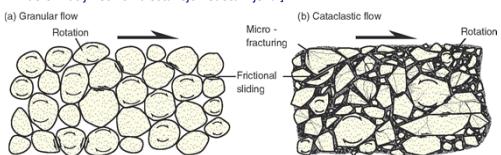
Mikrolom, kataklaza in trenjsko drsenje

Kataklaza

je penetrativno lomljenje in drobljenje kamnine, ki večinoma nastopa v prelomnih conah; nastane agregat močno pretrih mineralnih zrn in kosov kamnine v osnovi iz močno zdrobljenih zrn. Taka zdrobljena kamnina lahko "teče" s pomočjo kontinuiranega drobljenja, trenjskega drsenja in rotacije zrn

⇒ **kataklastično tečenje**.

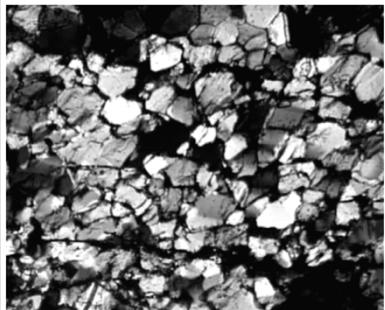
[Podoben proces je **granularno tečenje** v nelitificiranih kamninah, kjer pa zrna pri deformaciji večinoma ostanejo nedotaknjena.]



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

17

Mikrolom, kataklaza in trenjsko drsenje

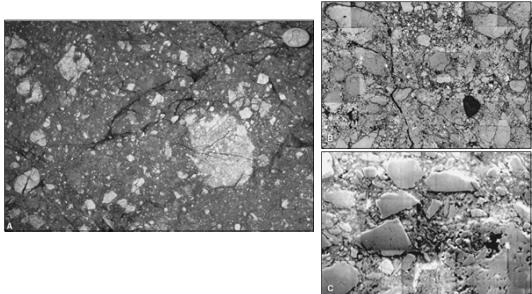


Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

18

Mikrolom, kataklaza in trenjsko drsenje

Kataklastične kamnine so penetrativno razpokane, zrna pa so praviloma ostroroba. Kamnina ponavadi izgleda presenetljivo enako v vseh merilih.



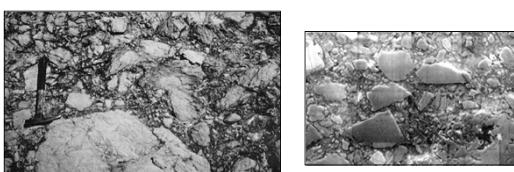
Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

19

Mikrolom, kataklaza in trenjsko drsenje

Posledice kataklaze: manjšanje velikosti zrn, slabšanje sortiranosti, povečevanje volumena.

Proces kataklaze ovira visok okoliški pritisk (povečanje trenja, težja k manjšanju volumena), zato sta kataklaza in kataklastično tečenje omejena na plitva območja skorje (največkrat na prelomne cone).

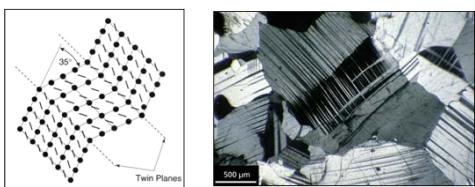


Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

20

Mehansko dvojčenje in zgibanje

Dvojčenje je deformacijski mehanizem, pri katerem se kristalna mreža ne zlomi, ampak le zapogne. Najpreprostejši primer: stržna zapognitev in rotacija dela kristalne mreže preko dvojčične ravnine (\Rightarrow zrcalni dvojčki). Zapogibni kot je odvisen od kristalne strukture minerala. Tako mehansko dvojčenje pogosto nastopa v kalciitu in plagioklazih.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

21





Mehansko dvojčenje in zgibanje

Pogoji za mehansko dvojčenje

- prisotnost ustrezone šibke ravnine dvojčenja v kristalni mreži
- ravina dvojčenja mora biti ustrezeno orientirana glede na smer glavnih napetosti (stržna komponenta napetosti vzdolž dvojčične ravnine mora biti dovolj velika, da lahko deformira kristalno mrežo)
- pretežno neodvisno od okoliškega pritiska in temperature
- zahteva pa relativno visoke diferencialne napetosti

Twin Planes

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

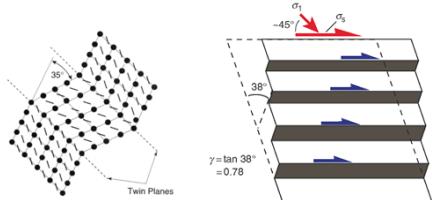
24

Mehansko dvojčenje in zgibanje

Pogoji za mehansko dvojčenje

Dvojčenje je relativno hiter proces. Skupna količina deformacije je omejena s kristalografijo minerala (primer: kalcitni dvojčki se lahko zapogejo do $38^\circ \Rightarrow \max \gamma = 0.35$).

Kakšnakoli dodatna deformacija se mora kompenzirati po kakem drugem mehanizmu (plitvo v skorji denimo z lomom kristalne mreže).

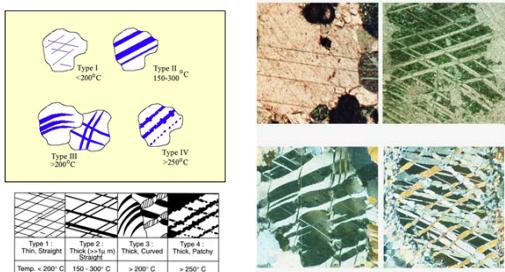


Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

25

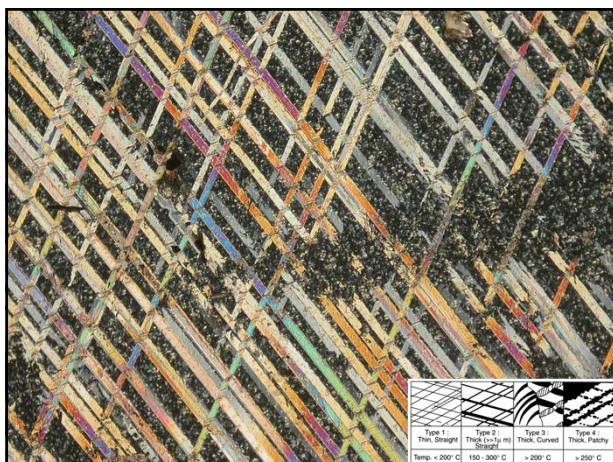
Mehansko dvojčenje in zgibanje

Geometrija in izgled kalcitnih dvojčkov sta povezana s temperaturo in količino deformacije.

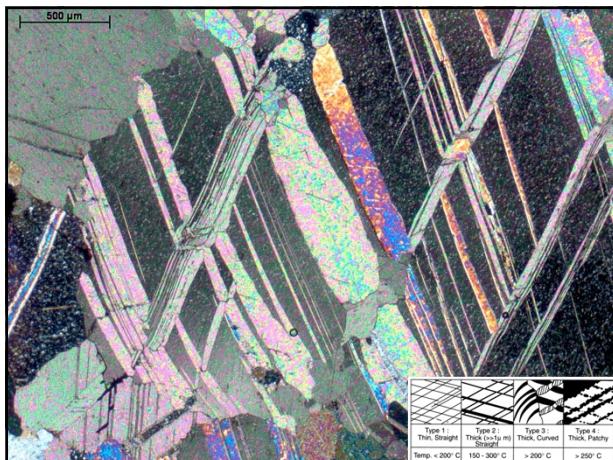


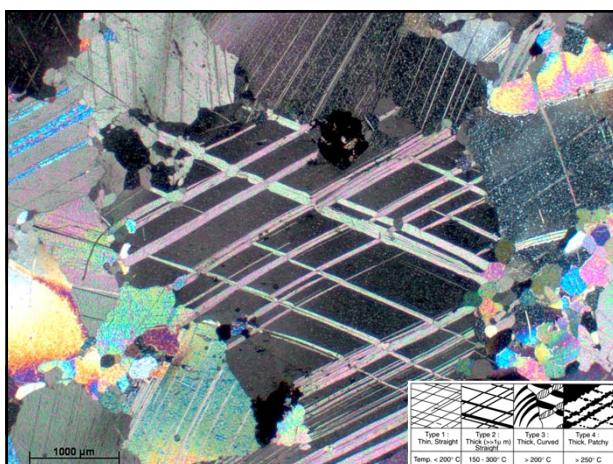
Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

26





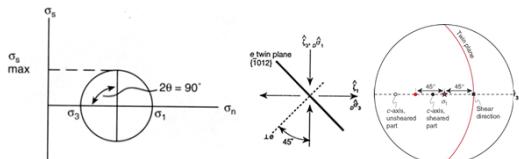




Mehansko dvojčenje in zgibanje

Določitev glavnih osi deformacije in napetosti s pomočjo dvojčkov

Pri dvojčenju se aktivirajo le tiste dvojčne ravnine, ki ležijo v ugodni orientaciji glede na σ_1 ; idealna je lega pod kotom 45° , saj je v tej orientaciji stržna komponenta napetosti na dvojčno ravino največja.
Kristalografška os c kalcitnega kristala (katere orientacija je mogoče izmeriti pod mikroskopom s Fedorovo mizico) pri dvojčenju teži k vzporednosti s $\sigma_1 \Rightarrow$ izmerimo veliko število c osi in statistično določimo srednjo orientacijo, ki verjetno odraža orientacijo σ_1 v času deformacije.



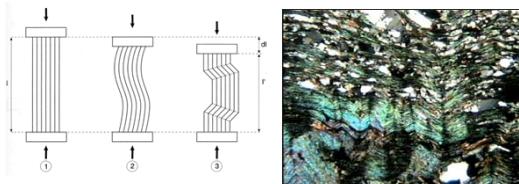
Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

31

Mehansko dvojčenje in zgibanje

Zgibanje kristalne mreže ("kinking")

Tudi pri zgibanju se mreža zapogiba preko ravnin šibkosti v kristalu. Zapognitve so združene v **zapognitvene pasove** ("kink bands"), ki imajo drugačno optično orientacijo kot ostanek kristala \Rightarrow **pasovi potemnitve**.
Zgibanju so posebej podvrženi lističasti minerali. Zapognitveni kot pri zgibanju ni omejen!



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

32

Lezenje

Ponovimo: lezenje je...?

...počasna plastična deformacija pri napetostih, ki so mnogo manjše od porušne trdnosti kamnine.

Poznamo difuzivno lezenje, disolucijsko lezenje in dislokacijsko lezenje.

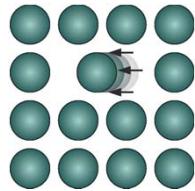
Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

33

Difuzivno lezenje

Difuzija je premikanje atomov skozi mineralna zrna, vzdolž meje med zrni ali v pornih fluidih med zrni. Difuzija je aktivirana termično in zato poteka pri višjih temperaturah. Velike hitreje kot v trdini poteka v tekočini.

Difuzija skozi trdino je dosti hitrejša, če kristalna mreža vsebuje praznine in druge napake. Najbolj učinkovita je v drobnozrnatih kamninah, kjer atomom ni treba prepetovati prevelikih razdalj.



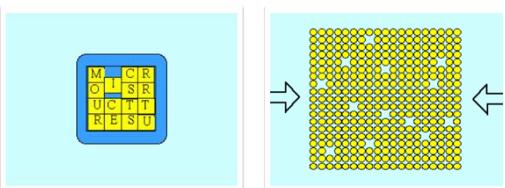
Predavanja iz Tektonike, Iekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

34

Difuzivno lezenje

Volumsko difuzivno lezenje (Nabarro-Herringovo lezenje)

Pri visoki temperaturi in usmerjenem pritisku je difuzija znotraj kristalov dovolj hitra, da omogoča deformacijo mineralnih zrn. Atomi menjajo mesta v kristalni mreži s prazninami in se gibljejo stran od območij visokih tlačnih napetosti k območjem nizkih napetosti \Rightarrow praznine se uničijo, oblika kristala se spremeni.



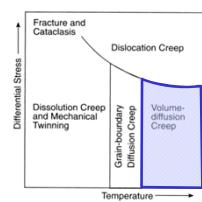
Predavanja iz Tektonike, Iekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

35

Difuzivno lezenje

Volumsko difuzivno lezenje (Nabarro-Herringovo lezenje)

Volumsko difuzivno lezenje je najbolj učinkovito v izometričnih zrnih, kjer je difuzijska pot kratka. Proses je zelo počasen in je učinkovit le pri nizkih diferencialnih napetostih in zelo visokih temperaturah (blizu tališča minerala).



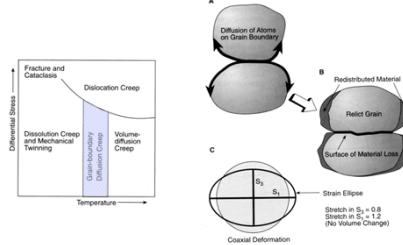
Predavanja iz Tektonike, Iekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

36

Difuzivno lezenje

Lezenje vzdolž meja zrn (Coblevo lezenje)

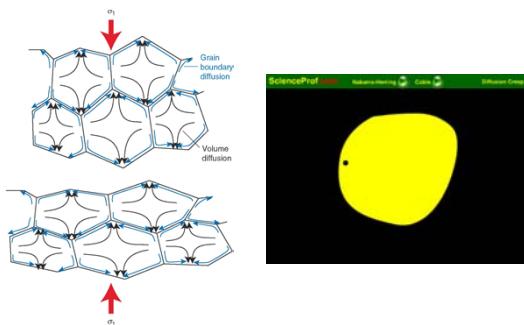
Atomi se od območij visokih tlaknih napetosti gibljejo vzdolž meja mineralnih zrn. Difuzijska pot je sicer dolga, vendar je proces hitrejši in učinkovitejši od volumske difuzije, zato se lahko odvija pri nižji temperaturi.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

37

Difuzivno lezenje

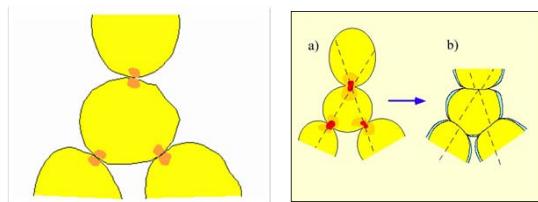


Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

38

Disolucijsko lezenje

Disolucijsko lezenje ali raztopljivanje pod pritiskom ali mokro lezenje
⇒ selektivno odstranjevanje, transport in ponovno izločanje materiala s pomočjo fluida fluida na meji zrn ali s pomočjo pornega fluida. Tekoča faza namreč močno izboljša učinkovitost prenosa materiala od območij pod visokim pritiskom v območja nizkega pritiska.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

39

Disolucijsko lezenje

Korozija zrn je največja na območjih pod visokimi tlaknimi napetostmi (orientacija glede na σ_1 , stiki s togimi zrni). Običajno so tudi nekatera zrna bolj topna od ostalih.

Zaradi raztopljanja se koncentracija fluida poveča v območjih pod tlaknimi napetostmi in zmanjša na mestih z nizkimi napetostmi \Rightarrow gradient kemijske koncentracije, ki povzroča migracijo raztopljenje snovi.

Predavanja iz Tektonike, Iekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

40

Disolucijsko lezenje

Razen z difuzijo se raztopljenia snov lahko giblje tudi zaradi samega gibanja fluida.

Predavanja iz Tektonike, Iekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

41

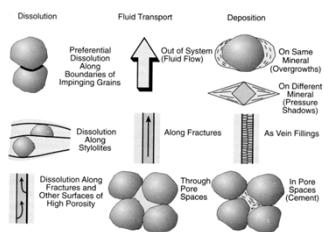
Disolucijsko lezenje

Če fluid odnaša raztopljen material daleč od izvora (npr. pri metamorfizmu), se zaradi raztopljanja/disolucijskega lezenja zmanjša volumen kamnine.

Predavanja iz Tektonike, Iekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

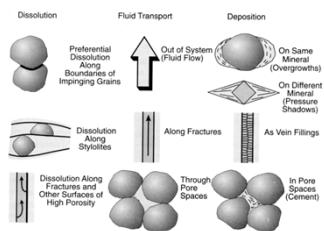
42

Disolucijsko lezenje



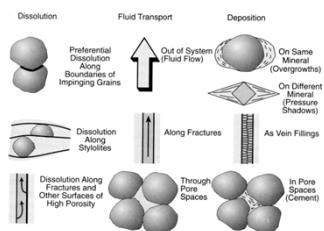
Na območjih kontinuiranega raztopljanja ponavadi nastanejo **stiloliti** in nakopičenja manj topnih mineralov (gline, sljude, organska snov).

Disolucijsko lezenje



Raztopljen material se lahko odlaga v obliki **preraščanje** na mineralnih zrnih, v vlačnih ali v klinastih "bradah" v napetostnih sencah.

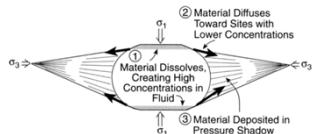
Disolucijsko lezenje



Bolj podvrženi disoluciji so visokotopni minerali in zrna z nečistočami ali napakami v kristalni mreži.

Disolucijsko lezenje

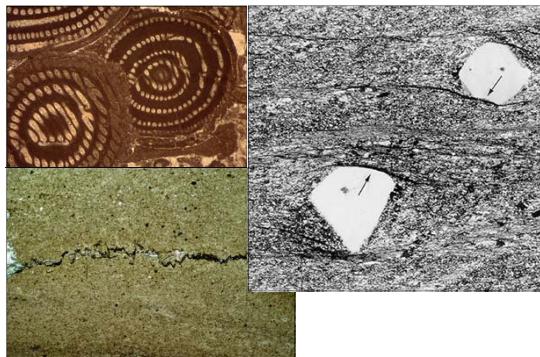
Raztopljen material se lahko odlaga v obliki **preraščanj** na mineralnih zrnih, v **vlaknih** ali v klinastih "bradah" v **napotostnih sencah**.
Vlakna rastejo v smeri minimalne glavne napetosti σ_3 . S kombinacijo raztopljanja in nove rasti se spreminja oblika mineralnih zrn
⇒ nova oblika nakazuje napetostne razmere.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

46

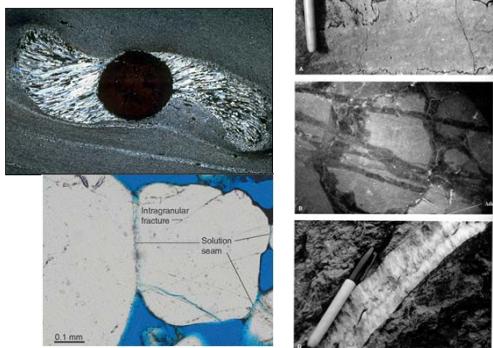
Disolucijsko lezenje



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

47

Disolucijsko lezenje



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

48

Disolucijsko lezenje

Sčasoma lahko proces disolucijskega lezenja postane neučinkovit zaradi prevelike razpotegnjenoosti mineralnih zrn (predolga migracijska pot), cementacije, kompakcije, zaraščanja razpok \Rightarrow "strain hardening" - prenehanje lezenja.

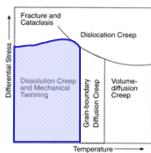
Disolucijsko lezenje

Pogoji za disolucijsko lezenje

Proces disolucijskega lezenja se lahko odvija v velikem razponu temperature in napetosti, prísoten pa mora biti medzrnski fluid. Proses je učinkovit celo pri nizkih temperaturah (diageneza, anhimetamorfizem)

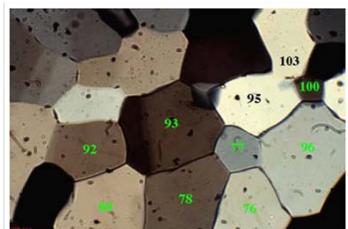
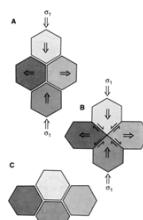
\Rightarrow nastanek kompakcijskih stololitov v apnencu.

Disolucijsko lezenje je najbolj učinkovito v "nezrelih" kamninah (glinavci, laporji, apnenci), posebej drobnozrnatih. Hitrost deformiranja je obratno sorazmerna s kubom velikosti zrn \Rightarrow ob manjšanju velikosti zrn zaradi raztajanja se hitrost deformacije povečuje (neke vrste "strain softening").



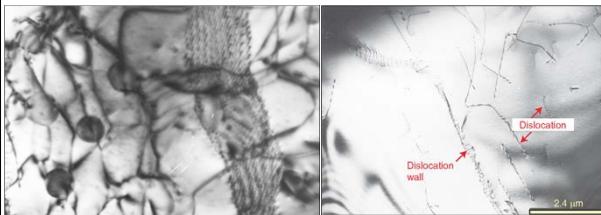
Superplastično lezenje

- \Rightarrow kombinacija suhega/mokrega lezenja vzdolž meja zrn in medzrnskega drsenja.
- omogoča visoke hitrosti deformiranja ob nizkih diferencialnih napetostih
 - idealna je visoka temperatura (višja od polovice temperature tališča) in drobnozrnata kamnina (spodnja skorja, plastičnost)
 - zrna ostanejo znotraj navidez nedeformirana (|)



Dislokacijsko lezenje

⇒ spremenjanje oblike (distorcija) kristala vzdolž drsnih ravnin s pomočjo zelo lokalizirane in začasne deformacije mreže, ki potuje vzdolž drsne ravnine.



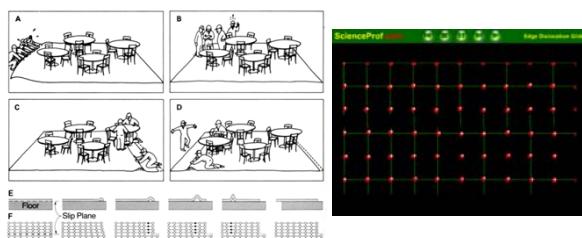
Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

52

Dislokacijsko lezenje

Deformacija cele kristalne mreže z zdrsom ob drsnih ravnin je energijsko prezahtevna - prekiniti je treba preveč vezi med atomi naenkrat. Pri dislokacijskem lezenju je naenkrat aktiviran le majhen del drsne ravnine. **Dislokacija** je linija, ki loči že deformirani (zdrslji) del kristalne mreže od nedeformiranega.

Sprememba oblike kristala je **plastična**. Kristal se po dislokacijskem zdrsu popolnoma zaceli in ohrani prvotno trdnost.

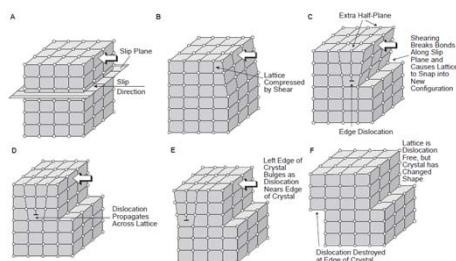


Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

53

Dislokacijsko lezenje

Robne dislokacije so orientirane pravokotno na smer drsenja. Napredovanje robnih dislokacij imenujemo *drsenje dislokacij* in se praviloma odvija vzdolž kristalografiskih ravnin s šibkimi vezmi.

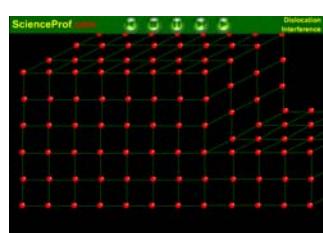
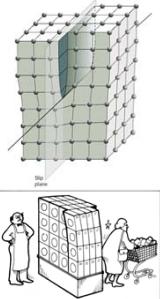


Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

54

Dislokacijsko lezenje

Vijačne dislokacije so orientirane vzporedno smeri drsenja. Dislokacije pogosto preskakujejo iz ene ravnine v drugo in spreminjačo značaj iz robnih v vijačne in obratno - **mešane dislokacije**.

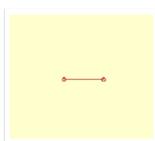


Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

55

Dislokacijsko lezenje

Dislokacije se lahko širijo iz točke v **dislokacijski zanki**.

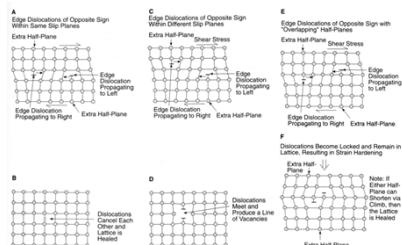


Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

56

Dislokacijsko lezenje

Interakcija dislokacij v kristalu povzroča nastanek praznin in **dislokacijskih vozlov**, kjer se deformacija "zataknje"
⇒ s povečevanjem števila dislokacij postaja dislokacijsko drsenje čedalje teže ("strain hardening").



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

57

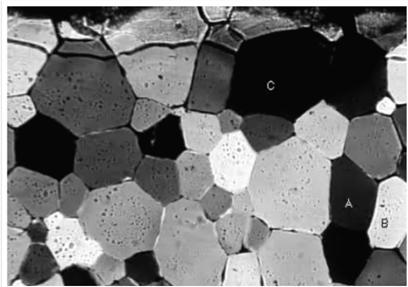
Regeneracija in rekristalizacija

⇒ procesa, ki "popravlja" kristalno mrežo - odpravlja napake in zmanjšuje prebitno energijo, shranjeno v mreži. Pri **regeneraciji** ("recovery") se preurejajo in uničujejo dislokacije v kristalni mreži. Pri **rekristalizaciji** in **neomineralizaciji** se zrna z nepravilnostmi pretvorijo v nova zrna (ali novo konfiguracijo zrn) brez napak.
Regeneracija in rekristalizacija se lahko odvija med deformacijo (**dinamična rekristalizacija**) ali po končani deformaciji (**statična rekristalizacija**).
Dinamična rekristalizacija sproti odpravlja ovire v kristalni mreži, ki nastajajo pri dislokacijskem lezenju ⇒ brez dinamične rekristalizacije deformacija z dislokacijskim lezenjem sploh ni mogoča!
Hitrost deformiranja z dislokacijskim lezenjem je zato pogojena s hitrostjo regeneracije in rekristalizacije.
Rekristalizacija sproti briše sledove mikrostrukturnih deformacij, zato po deformaciji običajno izgleda, kot da se minerali sploh ne bi deformirali.

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

58

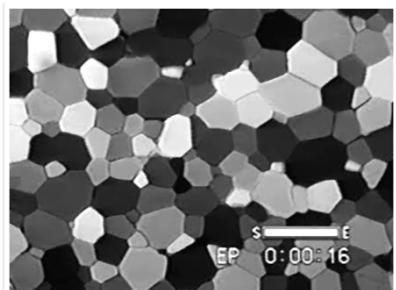
Dinamična rekristalizacija



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

59

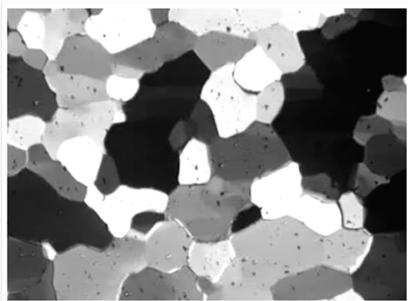
Statična rekristalizacija



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

60

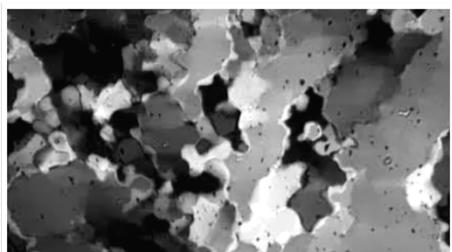
Dinamična rekristalizacija



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

61

Statična rekristalizacija



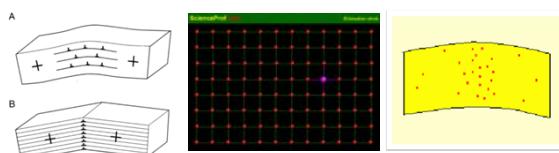
Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

62

Regeneracija in rekristalizacija

Regeneracija kristalne mreže poteka večinoma s pomočjo **vzpenjanja dislokacij** po mreži preko ovire ali ven iz mineralnega zrna.

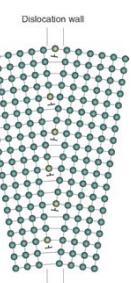
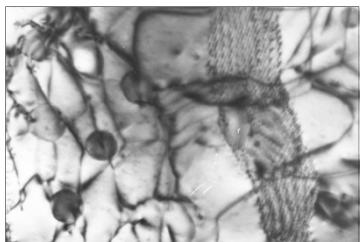
Pri **rotacijski rekristalizaciji** se dislokacije zberejo v ravnine, ki ločijo rahlo različno orientirane dele kristala - "subkristali" - "zrna znotraj zrn" ("subgrains"). Če se pri napredovanju deformacije kot med "subkristali" dovolj poveča (nad 10° - 15°), lahko govorimo o nastanku novih zrn.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

63

Regeneracija in rekristalizacija



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

64

Regeneracija in rekristalizacija



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

65

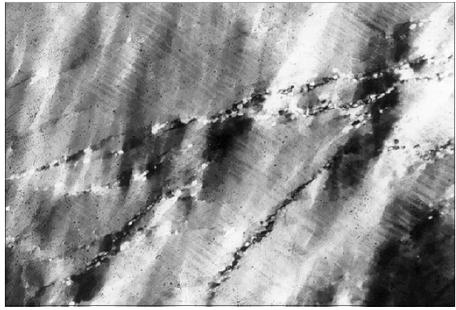
Regeneracija in rekristalizacija



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

66

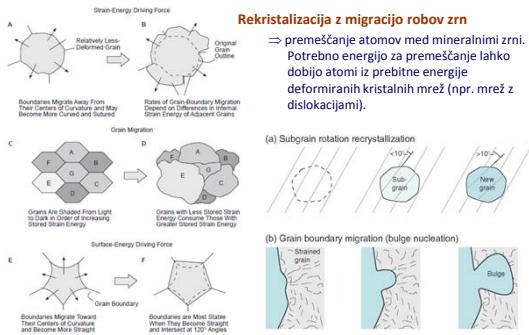
Regeneracija in rekristalizacija



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

67

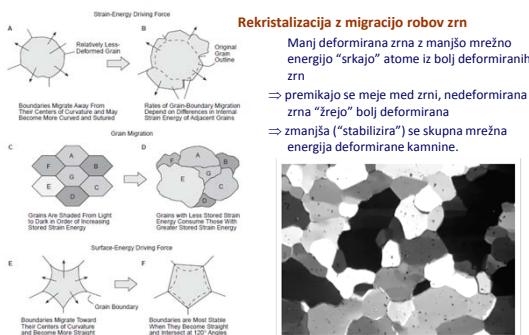
Regeneracija in rekristalizacija



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

68

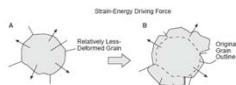
Regeneracija in rekristalizacija



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

69

Regeneracija in rekristalizacija

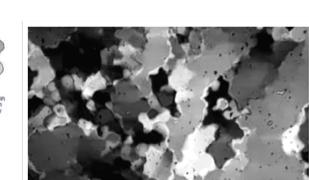


Boundaries Migrate Away From Their Original Position and May Become More Curved and Rounded.

Rekristalizacija z migracijo robov zrn

Drug možen vir energije za prehajanje atomov med zrni je površinska energija robov zrn

⇒ težja k ravnjanju robov in čim večjim kristalnim zrnom.



Grain Migration

↓

D

↓

E

↓

F

↓

G

↓

H

↓

I

↓

J

↓

K

↓

L

↓

M

↓

N

↓

O

↓

P

↓

Q

↓

R

↓

S

↓

T

↓

U

↓

V

↓

W

↓

X

↓

Y

↓

Z

↓

A

↓

B

↓

C

↓

D

↓

E

↓

F

↓

G

↓

H

↓

I

↓

J

↓

K

↓

L

↓

M

↓

N

↓

O

↓

P

↓

Q

↓

R

↓

S

↓

T

↓

U

↓

V

↓

W

↓

X

↓

Y

↓

Z

↓

A

↓

B

↓

C

↓

D

↓

E

↓

F

↓

G

↓

H

↓

I

↓

J

↓

K

↓

L

↓

M

↓

N

↓

O

↓

P

↓

Q

↓

R

↓

S

↓

T

↓

U

↓

V

↓

W

↓

X

↓

Y

↓

Z

↓

A

↓

B

↓

C

↓

D

↓

E

↓

F

↓

G

↓

H

↓

I

↓

J

↓

K

↓

L

↓

M

↓

N

↓

O

↓

P

↓

Q

↓

R

↓

S

↓

T

↓

U

↓

V

↓

W

↓

X

↓

Y

↓

Z

↓

A

↓

B

↓

C

↓

D

↓

E

↓

F

↓

G

↓

H

↓

I

↓

J

↓

K

↓

L

↓

M

↓

N

↓

O

↓

P

↓

Q

↓

R

↓

S

↓

T

↓

U

↓

V

↓

W

↓

X

↓

Y

↓

Z

↓

A

↓

B

↓

C

↓

D

↓

E

↓

F

↓

G

↓

H

↓

I

↓

J

↓

K

↓

L

↓

M

↓

N

↓

O

↓

P

↓

Q

↓

R

↓

S

↓

T

↓

U

↓

V

↓

W

↓

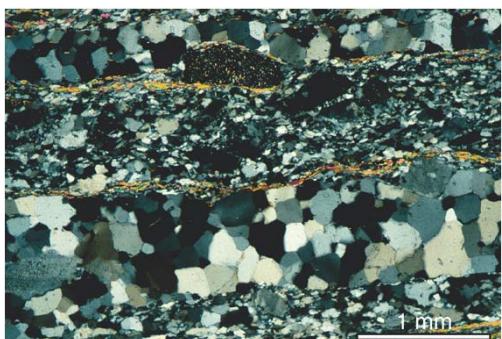
X

↓

Y

↓

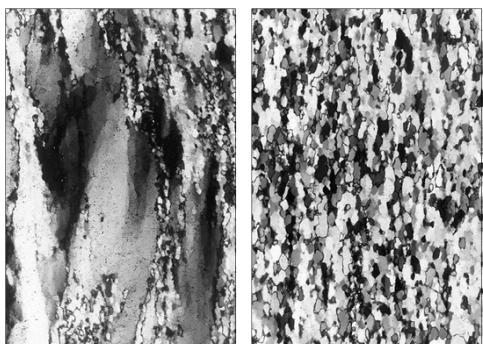
Regeneracija in rekristalizacija



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

73

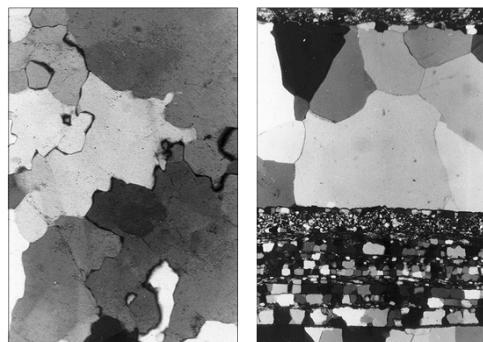
.....ična rekristalizacija (?)



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

74

.....ična rekristalizacija (?)



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

75

Regeneracija in rekristalizacija

Pogoji za rekristalizacijo

Za rekristalizacijo z migracijo robov zrn so ugodne srednje visoke do visoke temperature (večja vibracijska energija atomov). Hitrost migracije je odvisna od koncentracije napak v kristalni mreži, lege robu zrna glede na kristalografsko orientacijo kristala, ter prisotnosti fluidov (verjetno pospešujejo migracijo) ali nečistoč (zavirajo migracijo) vzdolž robov.

Medsebojni vpliv teh faktorjev povzroča spremembe v hitrosti migracije med različnimi zrni in znotraj istega zrna \Rightarrow robovi zrn postanejo nepravilne oblike (zlasti pri dinamični rekristalizaciji).

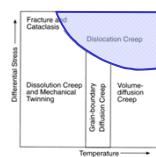
Pri dovolj visoki temperaturi po končani deformaciji postane odočuoč dejavnik površinska energija robov, zaradi česar se robovi zrvnajo, velikost zrn pa izenači.

Regeneracija in rekristalizacija

Pogoji za rekristalizacijo

Za rekristalizacijsko rotacijo so potrebne dovolj velike diferencialne napetosti (potrebne za nastanek in migracijo dislokacij) in dovolj visoke temperature za proces dviganja dislokacij (pri nižjih temperaturah prevlada proces migracije robov).

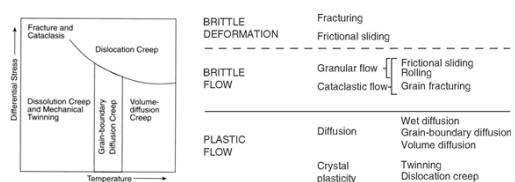
Ker sta tako rekristalizacija z migracijo robov zrn kot proces rekristalizacijske rotacije aktivirana termično, so za deformacije z dislokacijskim lezenjem potrebne srednje do visoke temperature.



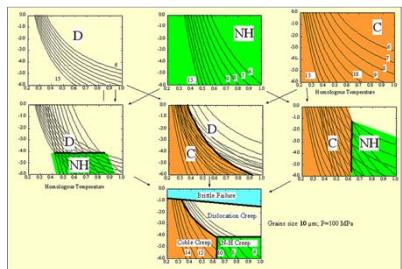
Deformacijski diagrami in eksperimenti

Eksperimentalni in teoretični podatki kažejo, da pri deformaciji ponavadi sočasno sodeluje več deformacijskih mehanizmov, ki pa se odvijajo z različnimi hitrostmi (odvisno od temperature, diferencialne napetosti, mineralogije, velikosti zrn, ...).

Deformacijski diagrami mineralov prikazujejo, kateri deformacijski mehanizem je dominanten pri danih fizikalnih pogojih (ponavadi temperaturi in diferencialni napetosti). Z izoliranimi je na diagramih označena hitrost deformatiranja za dane fizikalne pogoje.



Deformacijski diagrami in eksperimenti

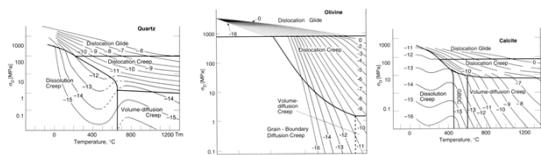


Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

79

Deformacijski diagrami in eksperimenti

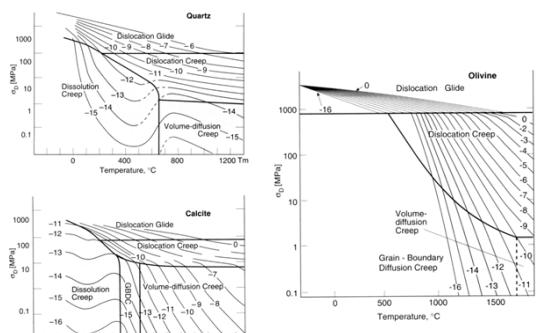
Deformacijski diagrami za nekatere najpomembnejše minerale v skorji - kremen, kalcit, olivin - so najverjetneje reprezentativni kar za večino deformacij, ki jih opazujemo. Kremen je en najpogostejših mineralov v skorji, kalcit je pomemben v sedimentnih kamninah (apnenec, marmor), olivin pa je najpogostejši mineral v zgornjem plazu.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

80

Deformacijski diagrami in eksperimenti



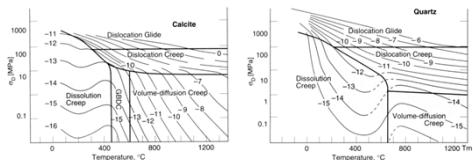
Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

81

Deformacijski diagrami in eksperimenti

Komentar k deformacijskim diagramom

Disolucijsko lezenje v plospnem prevladuje pri nizkih temperaturah in majhnih napetostih. Pri višjih napetostih prevladuje dislokacijsko lezenje, pri višjih temperaturah pa difuzivno lezenje.
Dislokacijsko lezenje je relativno "hitra" deformacija in lahko poteka v širokem temperaturnem razponu. Vendar se pri nizkih temperaturah dislokacije hitro "zatakejo"; običajno je nadaljnja deformacija lomna. Pri višjih temperaturah dislokacijsko lezenje poteka gladko, ker višja temperatura omogoča regeneracijo kristalne mreže in rekristalizacijo.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

82

Deformacijski diagrami in eksperimenti

Reologija lezenja

Teoretično izpeljane enačbe kažejo, da je hitrost deformacije pri difuzivnem in disolucijskem lezenju premo sorazmerna z diferencialno napetostjo \Rightarrow deformacijska tarej viskozni.
V nekaterih modelih dislokacijskega lezenja je hitrost deformacije sorazmerna s potenco diferencialne napetosti \Rightarrow dislokacijsko lezenje tarej omogoča precej večje hitrosti deformiranja.
Pri vseh vrstah lezenja je hitrost deformacije sorazmerna temperaturi (ker je hitrost omejena s hitrostjo difuzije). Omenili smo že, da je hitrost deformacije pri difuzivnem in disolucijskem lezenju večja, če so mineralna zrna manjša.

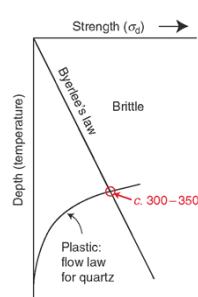
$$\dot{\epsilon} = A e^{\sigma_D} e^{-\frac{E}{RT}}$$

$$\dot{\epsilon} = A (\sigma_D)^n e^{-\frac{E}{RT}}$$

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

83

Reologija litosfere



Na podlagi podatkov o deformacijskih mehanizmih, sestavi Zemljine skorje in o spreminjanju tlaka in temperature v skorji z globino moremo predvidevati, kako se skorja deformira. V zgornjem delu skorje prevladujejo lomne deformacije, v spodnjem pa duktilne.

Lomno-duktilni prehod ("brittle-ductile transition") je globina, v kateri deformacije spremenijo značaj iz lomnih v duktilne.

Prehod ni ostra meja, ampak verjetno nekaj kilometrov debel pas postopnega prehoda. V kontinentalni skorji z granitsko sestavo duktilne deformacije verjetno prevladajo pri temperaturi nad 300°C (po deformacijskem diagramu za moker kremen). V tipični kontinentalni skorji je to okoli 15 km globoko, v območjih aktivne tektonike s povisanim geotermičnim gradientom pa lahko le 6 km globoko. Globina prehoda se lahko spremeni v obdobjih regionalnega segrevanja skorje (npr. pri intruziji plutona). Tudi pogrejanje kamnin ali njihov dvig na površje lahko povzroči prekrivanje prvotno lomnih deformacij z duktilnimi, in obratno.

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

84

Reologija litosfere

Model trdnosti skorje

Trdnost zgornjega dela skorje se linearno povečuje z globino - ta del skorje se deformira lomno ob prelomih, za kar velja trenjski zakon (premik je težji pri višjih okoliških pritisnikih).

Za globje dele skorje pa predpostavimo, da je njihova trdnost pogojena s trdnostjo najšibkejšega od pogostnih mineralov - kremena. Presek obeh trdnosnih krivulj nam definira lomno-ductilni prehod.

Kviz: zakaj najmočnejši potresi v kontinentalni litosferi nastajo v globini 10 - 15 km?

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

85

Reologija litosfere

Mimogrede: deformiranje polimineralne kamnine

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI II

Reologija litosfere

Model trdnosti lahko razširimo na celotno litosfero, pri čemer se trdnostna krivulja oceanske in kontinentalne litosfere seveda bistveno razlikujeta. Trdnost oceanske litosfere je v celoti pogojena s trdnostjo olivina, razen v zgornjem delu, ki se deformira lomno in je podvržen trenjskemu zakonu. V kontinentalni litosferi trdnost zgornjega dela skorje poguje trdnost mokrega kremena, pod MOHO pa trdnost olivina. V kontinentalni litosferi sta tako dva lomno-ductilna prehoda.

Predavanja iz Tektonike, lekcija 4: DEFORMACIJSKI MEHANIZMI IN MIKROSTRUKTURE

87