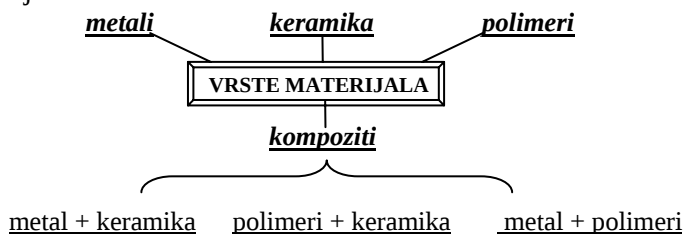


1. PODELA MATERIJALA

Sve što nas okružuje je materija, a deo nje pripada materijalima. Šta su materijali? Postoji više definicija materijala, a jedna od njih je da je to "materija koju ljudska bića upotrebljavaju i/ili prerađuju". U tom smislu, npr. stena (kamen) nije materijal već materija, ali kada se upotrebi za određenu svrhu kao što je npr. dobijanje betona, onda postaje materijal. Isto tako, drvo postaje materijal kada se prerađi na takav način da u tom novom obliku može da se koristi.

Da bi materijali mogli uspešno da se koriste treba da se odlikuju nizom svojstava (osobina), kao što su hemijska, fizička (toplotna, magnetna, optička), mehanička i nuklearna svojstva, koja su inače u neposrednoj vezi sa strukturom materijala. Dalje, materijali se koriste u određenom obliku, što znači da treba primeniti i odgovarajući postupak prerade. Proces dobijanja i prerade materijala su uglavnom zasnovani na fundamentalnim naukama kao što su fizika i hemija. Stoga se u ovom tekstu pretpostavlja da studenti poseduju određene predstave i saznanja iz osnovnog kursa fizike i hemije.

Materijali su podeljeni u četiri grupe koje čine **metalni materijali**, **keramički materijali**, **polimerni materijali** i **kompozitni materijali**, sl. 1.1, s tim što prve tri grupe predstavljaju osnovne materijale, a kompoziti se, kao četvrta grupa, dobijaju kombinacijom osnovnih materijala.



Slika 1.1. Četiri grupe materijala

Metalni materijali. Metalni materijali obuhvataju čiste metale, kao što su železo, aluminijum, cink, bakar, nikl i njihove kombinacije, poznate pod imenom *legure* (čelik, gvožđe, dural, mesing, bronza). Odlikuju se nekim opštim svojstvima kao što su dobra toplotna i električna provodljivost, relativno velika čvrstoća i krutost, dobra duktilnost (plastična svojstva i žilavost nekog materijala se često jednim imenom označavaju kao duktilnost), obradljivost i otpornost na udare. Koriste se, posebno legure kod kojih je moguće tačnom kombinacijom hemijskih elemenata i odabranim postupcima prerade poboljšati određena svojstva, za izradu konstrukcija i visoko opterećenih elemenata. Prema boji, metalni materijali su podeljeni na *crne (železne)* u koje se ubrajaju legure železa – čelici i gvožđa i ferolegure i na *obojene (neželezne) metalne materijale* koje čine svi ostali metali i legure. Ova grupa se dalje deli na grupu *lakih metala* (gustine $< 5 \text{ g/cm}^3$) u koje spadaju npr. aluminijum, magnezijumi titan i grupu *teških metala* (bakar, nikl, hrom, ...). Takođe, izdvaja se i grupa *plemenitih metala* (zlato, srebro, platina) i grupa *retkih metala* (cirkonijum, niobijum, ...).

Keramički materijali. Keramički materijali su neorganski, nemetalni materijali koji se sastoje od jedinjenja metalnih i nemetalnih elemenata povezanih jonskim i/ili kovalentnim vezama. Keramički materijali kao što su cigla, staklo, porcelan, neki izolacioni materijali i abrazivi, za razliku od metalnih materijala, imaju lošu toplotnu i električnu provodljivost. Ovi materijali imaju veoma veliku čvrstoću i tvrdoću, ali je njihova duktilnost,

obradljivost i otpornost na udar veoma niska. Stoga se ovi materijali ne koriste za izradu konstrukcija ili visoko opterećenih elemenata. Međutim, pošto mnogi keramički materijali imaju izvanrednu otpornost (postojanost) na visokim temperaturama, dobru korozionu postojanost u različitim sredinama i dobre optičke, toplotne i električne osobine (izolatori), primena im je raznovrsna i brojna.

Polimeri predstavljaju vrlo specifičnu grupu materijala jer s jedne strane čine osnovu žive ćelije i hranljivih materija (*biološki polimeri*), a s druge strane se od njih izrađuju različiti upotrebni delovi (*inženjerski polimeri*). Inženjerski polimeri mogu da budu *sintetički* (veštački) *polimeri* kao što su plastični materijali, lepkovi i elastomeri (gume) i *prirodni polimeri* - npr. kaučuk, vuna i celuloza. Polimeri imaju malu gustinu, lošu toplotnu i električnu provodljivost, malu čvrstoću, dobru otpornost prema koroziji, nisku cenu i nisu podesni za upotrebu pri povišenim temperaturama.

Plastični materijali (plastika) predstavljaju najvažniju vrstu inženjerskih polimera. To su materijali organske prirode koje sačinjavaju dugački molekulski lanci, nastali spajanjem manjih molekula procesom *polimerizacije*. Osnovni elementi koji ulaze u sastav plastičnih materijala su vodonik, kiseonik, ugljenik i azot, a pored njih često su prisutni fluor, hlor, silicijum i sumpor. Plastični materijali sve više zamenjuju delove koji su ranije izrađivani od metala, npr. u automobilskoj i vazduhoplovnoj industriji, prehrambenoj i metaloprerađivačkoj proizvodnji, i za izradu sportskih rekvizita. Ova zamena je uslovljena određenim prednostima kao što su: mala gustina, velika otpornost na hemijske uticaje, velike konstruktivne i proizvodne mogućnosti, prozračnost i relativno niska cena. Takođe, treba imati u vidu da u poređenju sa metalima plastični materijali imaju malu čvrstoću i krutost, nisku električnu i toplotnu provodljivost, visok koeficijent toplotnog širenja i relativno mali opseg radnih temperatura (najviše do 300°C) uz čest gubitak dimenzione stabilnosti.

Plastični materijali su velika i raznovrsna grupa sintetičkih polimera koji se raznim procesima obrade oblikuju u gotove proizvode.

Kompozitni materijali. Kompoziti su materijali koji se dobijaju kombinacijom dva ili više materijala tako se postignute osobine razlikuju od odgovarajućih osobina svakog materijala posebno. Beton i šper-ploča su tipični primeri jednostavnih kompozita, poznati iz svakodnevne upotrebe. Inače, kompozitni materijali se odlikuju niskom gustinom, imaju dobru čvrstoću, a neki kompoziti i dobru duktilnost, dobru otpornost na udar, postojanost pri povišenim temperaturama i otpornost na dejstvo agresivnih radnih medijuma.

U tab. 1.1 je dat kratak pregled osobina osnovnih grupa materijala.

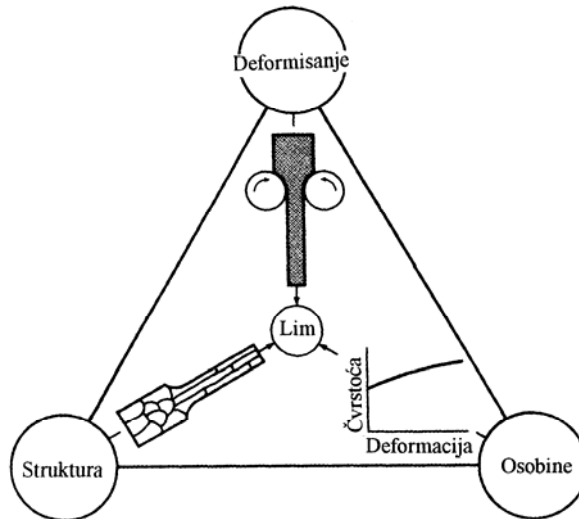
Tabela 1.1: Osnovne karakteristike glavnih grupa materijala

Osobine	Metali	Keramika	Polimeri
Gustina, g/cm ³	2 – 20	1 - 14	1 – 2.5
Električna provodljivost	visoka	niska	niska
Toplotna provodljivost	visoka	niska	niska
Duktilnost	visoka	niska	zadovoljavajuća
Zatezna čvrstoća, MPa	100 – 1500	100 – 400	-
Pritisna čvrstoća, MPa	100 – 1500	1000 – 5000	-
Žilavost loma, MNm ^{-3/2}	10 – 30	1 – 10	2 – 8
Max. radna temperatura, °C	1000	1800	250
Otpornost prema koroziji	niska	superiorna	srednja
Vrsta veze	metalna	jonska - kovalentna	kovalentna
Struktura	kristalna	kompleksna kristalna	amorfna

Materijali koji nalaze primenu u bilo kojoj grani tehnike su poznati pod zajedničkim imenom **inženjerski materijali**.

Materijali koji se koriste u mašinstvu se nazivaju **mašinski materijali**, a u zavisnosti od njihove namene podeljeni su u tri grupe. *Prvu grupu* čine **konstrukcioni materijali** koji se upotrebljavaju za izradu konstrukcija, mašinskih elemenata, uređaja, mašina, postrojenja i alata. Neophodno je da se, pre svega, odlikuju dobrim mehaničkim svojstvima, posebno čvrstoćom, što znači da treba dobro da podnose opterećenja. **Pomoćni materijali** čine *drugu grupu* mašinskih materijala, a koriste se za izradu manje opterećenih delova, npr. različitih zaptivki i spojnice, kao i za izradu izolacionih i koroziono otpornih slojeva. *Treća grupa* mašinskih materijala, **pogonski materijali**, se upotrebljava za proizvodnju, transformaciju i prenos različitih oblika energije. Ovu grupu materijala čine uglavnom organski materijali, a odnose se na sve vrste goriva (čvrsta, tečna i gasovita), zatim maziva, vodu i vazduh.

Osnovni cilj mašinske industrije je proizvodnja komponente koja ima tačno određen oblik i potrebna svojstva koja će da obezbede upotrebu te komponente u predviđenom vremenu. Zbog kompleksnosti zahteva, stručnjaci iz oblasti metalurgije i mašinstva moraju da rešavaju probleme kroz sveobuhvatno sagledavanje međusobne veze između strukture materijala, deformisanja materijala u gotov proizvod ili poluproizvod i krajnjih svojstava materijala, koja su istovremeno i zahtevana svojstva. Ako se promeni jedna karika u lancu veze struktura-svojstva-deformisanje, dolazi, kao posledica, do promene i druge dve. Na primer, deformisanje valjanjem u cilju dobijanja proizvoda oblika lima dovodi do promene njegove strukture i do porasta čvrstoće, sl. 1.2.



Slika 1.2. Veza između strukture, svojstava i deformisanja materijala

2. OSNOVNA SVOJSTVA MATERIJALA

Kod svih materijala se razlikuju hemijska, fizička, mehanička i tehnološka svojstva (osobine).

2.1. FIZIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

Temperatura topljenja/kristalizacije je temperatura na kojoj materijal prelazi iz čvrstog u tečno stanje, odnosno iz tečnog u čvrstog stanje. Neki materijali (legure), za razliku od čistih metala, kod kojih se ti prelazi odvijaju pri konstantnoj temperaturi, prelaze iz jednog u drugo agregatno stanje (tečno → čvrsto pri kristalizaciji, odnosno čvrsto → tečno pri topljenju) u određenom temperaturnom intervalu. U idealnom slučaju (čisti metali, veoma mala brzina promene temperature) temperatura topljenja je jednaka temperaturi kristalizacije. Temperatura topljenja materijala zavisi od energije potrebne da se razdvoje atomi. Temperatura topljenja ima veliki broj indirektnih uticaja na proizvodne procese i od velike važnosti je pri izboru materijala za izradu komponenata koje su u eksploataciji izložene visokim temperaturama, kao što su delovi mlaznih motora, industrijskih peći i delovi gde se razvija toplota usled trenja. Temperature topljenja nekih metala su:

Al – 660°C
 Cu – 1082°C
 Fe – 1536°C
 Pb – 327°C
 W – 3410°C

Polimeri amorfne strukture nemaju izraženu temperaturu topljenja jer na povišenim temperaturama prelaze u gumasto stanje, odnosno dolazi do **omekšavanja**.

Električna provodljivost je svojstvo materijala da može da provodi električnu struju. Električna struja je usmereno kretanje naelektrisanja kroz materijal. Metalni materijali su dobri provodnici električne struje. Električna provodljivost predstavlja recipročnu vrednost električne otpornosti materijala, koja se definiše kao mera sposobnosti materijala da

se suprotstavi proticanju električne struje. Prema sposobnosti za provođenje električne struje materijali se dele na *provodnike*, *poluprovodnike* i *dielektrike*, odnosno *izolatore*.

Magnetna svojstva materijala na makroskopskom nivou potiču od magnetnog momenta njegovih atoma i molekula. Različiti materijali imaju različito ponašanje kada se unesu u magnetno polje. Na osnovu ponašanja materijala u spoljašnjem magnetnom polju razlikuju se četiri vrste materijala: dijamagnetni, paramagnetni, feromagnetni i ferimagnetni materijali. Pripadnost materijala nekoj od ove četiri grupe zavisi od relativne magnetne permeabilnosti, μ_r , na sledeći način:

- $\mu_r < 1$ materijal spada u grupu dijamagnetnih,
- μ_r neznatno veća od 1 materijal je paramagnetan,
- $\mu_r \gg 1$ (do 10^6) materijal spada u grupu feromagnetnih, ili u slučaju keramičkih magneta – ferimagnetnih materijala.

Dijamagnetizam, koji je sa inženjerskog stanovišta neinteresantan, može da se objasni na sledeći način: Kada se materijal unese u spoljašnje magnetno polje dolazi do promene u kretanju elektrona, koja stvara lokalno polje oko svakog elektrona. Prema zakonu fizike koji je poznat kao Lencov zakon, nastalo polje ima suprotan smer od primenjenog spoljašnjeg magnetnog polja što dovodi do malog smanjenja u ukupnoj magnetizaciji. *Paramagnetizmom* se odlikuju materijali čiji atomi poseduju ukupni magnetni momenat (zbir spinskih i orbitalnih momenata) različit od nule i kada ne postoji spoljašnje magnetno polje. Kada se paramagnetni materijali unesu u spoljašnje magnetno polje, rezultujući magnetni moment se poklapa sa pravcem spoljašnjeg polja usled čega dolazi do njegovog pojačavanja, a permeabilnost postaje neznatno veća od 1.

Feromagnetni materijali imaju veoma izražena magnetna svojstva koja su posledica postojanja tzv. magnetnih domena – grupa atoma uređenih na takav način da su magnetni momenti njihovih elektrona međusobno paralelni i orijentisani u istom smeru. Kada se takav materijal unese u spoljašnje magnetno polje, dolazi do preorijentacije čitavih domena koji se postavljaju u smeru polja višestruko ga pojačavajući.

2.2. MEHANIČKA SVOJSTVA

Mehanička svojstva opisuju način na koji materijal odgovara na primenjeno opterećenje (silu) se jednim imenom nazivaju *mehanička svojstva*. Ona predstavljaju najvažniji pokazatelj pri izboru materijala i dimenzionisanju mašinskih elemenata, delova ili konstrukcije. Osnovna mehanička svojstva materijala su:

- **Čvrstoća** - sposobnost materijala da pruža otpor razaranju i pojavi zaostalih deformacija pod dejstvom spoljašnjih sila;
- **Tvrdoća** - otpor koji materijal pruža pojavi deformacija u površinskom sloju pri lokalnom dejstvu kontaktnog opterećenja.
- **Elastičnost** - svojstvo materijala da se vrati u prvobitan oblik posle prestanka dejstva spoljašnje sile.
- **Plastičnost** - sposobnost materijala da može da se obrađuje i menja oblik (kovanjem, valjanjem, izvlačenjem) bez prekida međuatomskih veza.
- **Žilavost** – sposobnost materijala da apsorbuje mehaničku energiju udara i da se pri tome pojavi značajna plastična deformacija pre loma.

Ova svojstva se određuju u laboratorijama, pod strogo definisanim uslovima ispitivanja, primenom standardnih procedura i na specijalno pripremljenim uzorcima (epruvetama). Mehanička i fizička svojstva najčešće korišćenih metala su data u tab. 2.1.

Tabela 2.1: Fizička i mehanička svojstva nekih metala

simbol elementa	gustina	temperatura topljenja	koeficijent linearnog širenja	specifična električna provodnost	tvrdća po Brinelu	zatezna čvrstoća	modul elastičnosti	procentualno izduženje
	ρ g/cm ³	T, °C	$\alpha \times 10^{-6}$	γ , MSm/m ²	HB	R _m , MPa	E, GPa	δ , %
Al	2,7	660	24,0	37,0	300	100	80	40
W	19,3	3370	4,0	18,1	1600	1100	400	-
Fe	7,87	1539	11,9	11,0	500	300	210	21-55
Co	8,9	1490	12,08	10,2	1250	700	200	3
Mg	1,74	651	25,7	23,0	250	200	45	15
Mn	7,44	1242	23,0	22,7	200	krt	krt	krt
Cu	8,94	1083	16,42	64,0	350	220	120	60
Ni	8,9	1452	13,7	8,5	600	450	220	40
Sn	7,3	232	22,4	8,5	80	300	40	40
Pb	11,34	327	29,5	4,9	50	18	12	50
Ti	4,5	1812	7,14	-	-	40	120	20-28
Cr	7,1	1550	8,1	38,4	1000	krt	krt	krt
Zn	7,14	419	32,6	17,4	350	150	100	5-20

2.3. HEMIJSKA SVOJSTVA MATERIJALA

Hemijska svojstva materijala zavise od njegove strukture, odnosno količine i vrste hemijskih elemenata koji učestvuju u njegovoj izgradnji. Ove osobine se obično mere i određuju u hemijskim laboratorijama, jer ne mogu da se određuju vizuelnim posmatranjem. Da bi hemijske osobine mogle da se mere neophodno je da dođe do promene ili razaranja materijala. U hemijska svojstva metalnih materijala, od značaja za industriju, spadaju sposobnost za oksidaciju, rastvorljivost, otpornost prema koroziji.

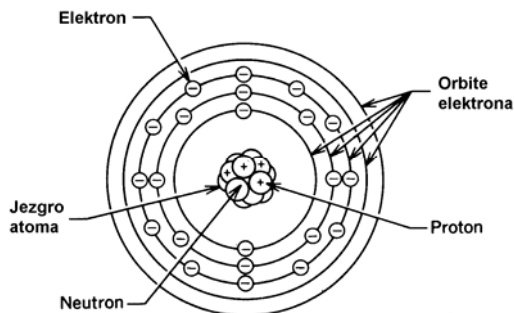
Da bi se shvatila struktura materijala neophodno je da se zna:

- (1) koji atomi, joni i molekuli su prisutni,
- (2) kako su atomi, joni i molekuli međusobno povezani i
- (3) na koji način su uređeni u prostoru.

Vrsta hemijskog elementa, odnosno njegova pripadnost grupi metala, nemetala ili inertnih gasova se određuje prema Periodnom sistemu elemenata. Hemijski element je čista supstanca koja ne može da se podeli (razdvoji, usitni) na sitnije, jednostavnije supstance bilo kojim poznatim hemijskim postupkom. Hemijski elementi se međusobno razlikuju po svojim svojstvima. U prirodi može da se nađe oko 90 elemenata; neki elementi su nepostojani i dobijaju se kao rezultat fisionih ili fuzionih reakcija. Prema Periodnom sistemu elemenata poznato je 107 elementa, ali sa onima koji se veštački dobijaju u laboratorijama, ukupan broj prelazi 120.

Svi hemijski elementi su sastavljeni od atoma, kao najmanjih, neutralnih čestica koje su nosioci svojstava svakog pojedinačnog elementa ili drugačije rečeno atomi predstavljaju

najmanji deo nekog hemijskog elementa koji zadržava osobine tog elementa. Atomi imaju veoma kompleksnu strukturu koja verovatno ni do danas nije do kraja otkrivena. U najjednostavnijem predstavljanju, atomi se sastoje od *protona* (pozitivno naelektrisanih čestica) i *neutrona* (neutralnih čestica) koji čine jezgro atoma oko koga, na različitim rastojanjima po orbitama (ljuskama, putanjama) kruže *elektroni* (negativno naelektrisane čestice), pri čemu je broj protona i broj elektrona isti, sl. 2.1.



Slika 2.1. Šematski prikaz atoma

Bez obzira što je masa protona ~2000 puta veća od mase elektrona, količina pozitivnog naelektrisanja protona i negativnog naelektrisanja elektrona je ista, tako da je sam atom neutralan. Svaki hemijski element ima svoj *atomski broj*, koji mu označava mesto u Periodnom sistemu elemenata i koji istovremeno pokazuje koliko se protona nalazi u jezgri. Elektronska konfiguracija atoma je definisana sa četiri kvantna broja, koji su označeni kao glavni, orbitalni, magnetni i spinski, i pomoću kojih mogu da se objasne fizičke i hemijske osobine materijala.

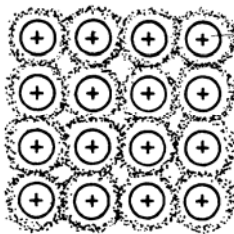
Broj elektrona u poslednjoj orbiti određuje kojoj grupi materijala Periodnog sistema će da pripada hemijski element – metalima, metaloidima, nemetalima ili inertnim gasovima. Ako se u poslednjoj orbiti nalazi 1-3 elektrona onda hemijski element pripada metalima i nalazi se u nekoj od prve tri grupe Periodnog sistema elemenata. Metaloidi uglavnom pripadaju četvrtoj a nemetali petoj, šestoj i sedmoj grupi Periodnog sistema elemenata, što znači da imaju 5, 6 odnosno 7 elektrona u poslednjoj orbiti.

Hemijski elementi koji čine grupu inertnih gasova imaju potpuno popunjenu poslednju ljusku elektronima, kaže se da se odlikuju stabilnom elektronskom konfiguracijom te stoga ne stupaju u reakcije sa drugim hemijskim elementima. Svi hemijski elementi, od I do VII grupe, teže da postignu stabilnu elektronsku konfiguraciju najbližeg inertnog gasa, što postižu odavanjem elektrona iz poslednje orbite (grupa metala), odnosno primanjem elektrona u poslednju orbitu (grupa nemetala).

Način postizanja elektronske stabilnosti ima direktne veze sa vrstom veze koja se ostvaruje između atoma istih i raznorodnih elemenata. S druge strane, vrsta veze koja se ostvaruje između atoma ima direktan uticaj na svojstva materijala, pa je odatle i proizašla podela materijala na metalne, keramičke i polimerne. Između atoma istih ili raznorodnih elemenata mogu da se obrazuju četiri različite vrste veza: *metalna*, *jonska*, *kovalentna* i *Van der Valsova*.

Metalna veza. Ova vrsta veze je karakteristična za metalne materijale, kod kojih u poslednjoj ljusci može da se nađe najviše tri elektrona. Ovi elektroni su relativno slabo vezani za pozitivno naelektrisano jezgro, pa stoga i relativno lako mogu da se odvoje od

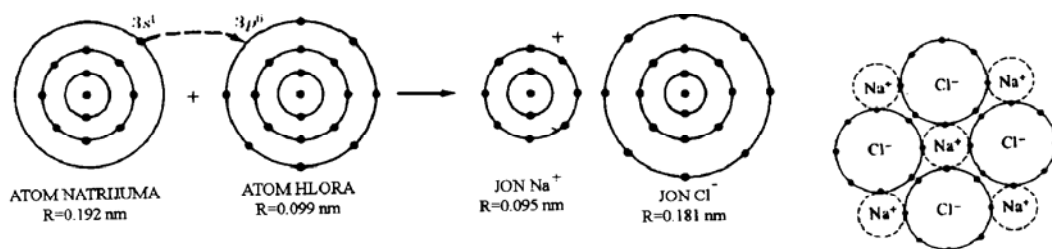
njega. Kada se više atoma metala, sl. 2.2, nađe na dovoljno malom međusobnom rastojanju i sa dovoljnom gustinom pakovanja, onda ti elektroni iz poslednje orbite mogu da se premeštaju sa jednog atoma na drugi, uz uslov da istovremeno neki drugi elektroni prelaze sa nekog drugog atoma na njihovo mesto. Na taj način atom sve vreme ostaje neutralan, jer ima uvek isti broj protona i elektrona, a s druge strane postoji stalno kretanje elektrona, koje je označeno kao elektronski oblak ili "elektronski gas".



Slika 2.2. Metalna veza

Uređenost atoma metala i postojanje elektronskog gasa kao posledicu ima specifične osobine karakteristične za metale. Električna provodljivost npr. ne predstavlja ništa drugo nego usmereno kretanje tog elektronskog gasa kada se na krajevima komada metala uspostavi potencijalna razlika. Duktilnost metala ili njihova sposobnost da se deformišu bez razaranja je posledica njihove gustine pakovanja i mogućnosti pomeranja atomskih ravni klizanjem jedne u odnosu na drugu bez međusobnog prekida veze pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja. Metalna veza je veoma jaka, što znači da se metalni materijali odlikuju velikom čvrstoćom.

Jonska veza. Ova veza je uglavnom karakteristična za keramičke materijale, a uspostavlja se između atoma metala koji teži da odaje svoje elektrone i atoma nemetala koji teži da primi elektrone, sl. 2.3. Pošto atom metala ostaje bez elektrona, on postaje pozitivno naelektrisan jon. Istovremeno, atom nemetala koji je te elektrone primio postaje negativno naelektrisan jon.



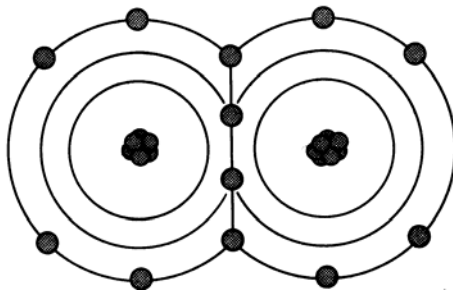
Slika 2.3. Jonska veza

Sile privlačenja koje se javljaju između pozitivno i negativno naelektrisanih jona su odgovorne za jačinu jonske veze, odnosno veliku čvrstoću. Međutim, materijali sa jonskom vezom su kruti, odnosno nisu duktilni kao metali. Pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja, kada dolazi do pomeranja atomskih ravni jedne u odnosu na drugu, u trenutku kada se istoimeno naelektrisani joni nađu jedan do drugog, javljaju se sile odbijanja usled čega dolazi do prekida veze.

Materijali, kod kojih postoji jonska veza, imaju u čvrstom stanju veoma malu električnu provodljivost zato što njihovi elektroni u poslednjoj ljuski ne mogu slobodno da se kreću kao elektronski gas. Međutim, u rastopljenom stanju, ovi materijali postaju

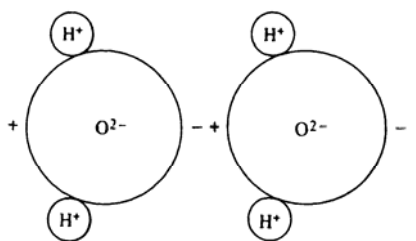
električni provodnici zato što postoje nezavisni joni, pozitivno i negativno naelektrisani, koji mogu da se kreću.

Kovalentna veza. Mnogi keramički materijali se odlikuju i kovalentnom vezom, koja se obrazuje tako što dva ili više atoma daju svoje elektrone u zajedničke parove koji istovremeno pripadaju i jednom i drugom atomu, čime svaki atom pojedinačno ostvaruje stabilnu konfiguraciju, sl. 2.4. Materijali sa ovom vrstom veze mogu da budu veoma tvrdi (npr. dijamant koji ima najveću tvrdoću od svih poznatih materijala), ali to nije opšte pravilo, a po pravilu su veoma loši provodnici toplote i elektriciteta.



Slika 2.4. Kovalentna veza - kiseonika (O_2)

Van der Valsova veza se javlja između molekula usled nesimetrije naelektrisanja, sl. 2.5, pri čemu pozitivno naelektrisani kraj jednog molekula privlači negativno naelektrisani kraj drugog molekula. Ova vrsta veze je znatno slabija od prethodnih, međuatomskih veza, pa se smatra sekundarnom vezom. Ovom vezom se objašnjava mala čvrstoća i velika deformabilnost nekih polimera, kod kojih su molekulski lanci međusobno povezani upravo Van der Valsovom vezom.



Slika 2.5. Van der Valsova veza - molekuli vode

DOBIJANJE MATERIJALA

Većina keramičkih proizvoda se izrađuju presovanjem praha ili čestica u oblike koji se naknadno zagrevaju do dovoljno visoke temperature radi međusobnog vezivanja čestica.

Plastični materijali nastaju spajanjem manjih molekula procesom polimerizacije. Proces polimerizacije su veoma složeni i raznovrsni, a dve osnovne vrste su kondenzacijska i adiciona polimerizacija.

Metalni materijali se dobijaju iz ruda, različitim procesima prerade.

IZBOR MATERIJALA

Veliki broj različitih materijala kao i stalni razvoj novih materijala, služi nam za ostvarivanje novih tehničkih rešenja u mašingradnji, procesnoj industriji, brodogradnji, vazduhoplovstvu i drugim oblastima mašinstva. Svi materijali imaju neka karakteristična svojstva, određenu oblast primene, prednosti i ograničenja.

Kada biramo materijal za konstrukciju, prvo što uzimamo u obzir su njegova mehanička svojstva: čvrstoća, tvrdoća, žilavost, modul elastičnosti. Mehanička svojstva moraju da budu takva da ne dođe do trajnih deformacija i loma pod opterećenjem kojem je komponenta izložena u eksploataciji.

Osim mehaničkih, u obzir moraju da se uzmu i fizička svojstva materijala: gustina, koeficijent linearnog širenja, temperatura topljenja, toplotna provodnost, električna, magnetna i tribološka svojstva.

Hemijska svojstva moraju takođe da se uzmu u obzir, naročito ako je konstrukcija izložena uticaju agresivne sredine. Oksidacija i korozija utiču na opšti pad svojstava materijala. Toksičnost i zapaljivost materijala za neke proizvode veoma su važni faktori pri izboru materijala.

Tehnološka svojstva materijala daju podatke o tome koji materijali mogu relativno lako da se liju, obrađuju deformisanjem (kovanje, valjanje, izvlačenje), mašinski obrađuju, zavaruju i termički obrađuju.

Pored svega navedenog, na izbor materijala za neki proizvod ili konstrukciju, utiče i njegova cena, kao i mogućnost nabavke i to u što prikladnijem obliku poluproizvoda. Posebno je značajno i kolike su rezerve materijala koji su na raspolaganju.

3. KRISTALNA STRUKTURA I GEOMETRIJA ELEMENTARNIH KRISTALNIH REŠETKI

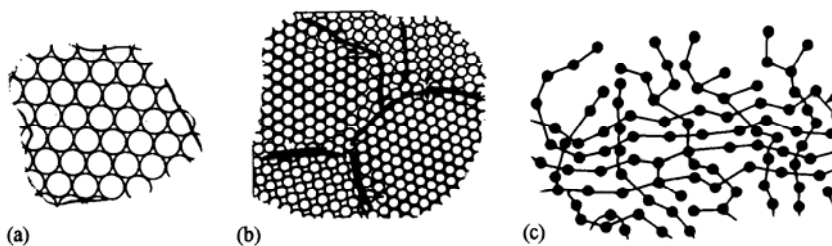
Struktura čvrstih materijala važnih za inženjersku praksu, uglavnom zavisi od rasporeda atoma, jona ili molekula u sklopu čvrstog tela kao i od sila veza između njih. Ako atomi ili joni u čvrstom telu imaju pravilan trodimenzionalni model rasporeda u prostoru oni formiraju čvrsto telo za koje se kaže da ima *kristalnu strukturu*.

Kada se pravilnost rasporeda atoma prostire po celoj zapremini, tj. na celo čvrsto telo, onda taj materijal nazivamo *monokristal* (slika 3.1a). Karakteristično za monokristale je anizotropija fizičkih i mehaničkih svojstava i to što prelaze iz tečne u čvrstu fazu na konstantnoj temperaturi.

U slučaju da se pravilan raspored atoma uspostavi na malom delu prostora materijala, ali se pojavljuje na velikom broju mesta i različito je orijentisan, kažemo da je materijal *polikristalan*. *Polikristalni materijal sastavljen je od velikog broja sitnih ili krupnih kristala spojenih u jednu celinu* (slika 3.1b). Za polikristalne materijale karakteristična je njihova "kvazi izotropnost" fizičkih i mehaničkih svojstava, zbog velikog broja kristala različito orijentisanih u prostoru. Polikristalni materijali prelaze iz čvrste u tečnu fazu na konstantnoj temperaturi, odnosno imaju tačno definisanu tačku topljenja.

Nasuprot ovih sređenih struktura, čvrsto telo može biti potpuno nepravilne građe, bez ponovljenih trodimenzionalno raspoređenih atoma, kao i bez grešaka u njihovom rasporedu: tačkastih, linijskih i površinskih. Takvu strukturu nazivamo *amorfnom* (slika 3.1c). Amorfni materijali su uređeni u obliku dugih lančastih molekula, izotropni su (fizička i mehanička svojstva su ista u svim pravcima), očvršćavaju u jednom temperaturnom

intervalu. Amorfnu strukturu imaju: staklo, veliki broj plastičnih materijala i neki metali koji se u fazi očvršćavanja hlade ekstremno velikim brzinama.



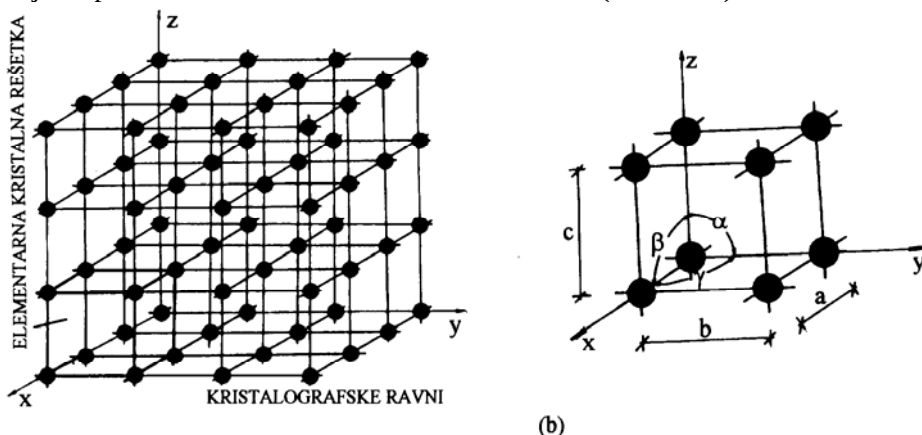
Slika 3.1. Struktura čvrstih materijala: (a) monokristal; (b) polikristal; (c) amorfni

Kristalna struktura

Svi metali i njihove legure, mnogi keramički i neki polimerni materijali formiraju kristalnu strukturu pod normalnim uslovima očvršćavanja. Prilikom prelaska iz tečnog u čvrsto stanje atomi se pravilno raspoređuju u *kristalografske ravni* (slika 3.2). Više ovakvih ravni paralelno postavljenih u prostoru grade *kristalnu rešetku*.

Kristalna rešetka prestavlja prostornu mrežu u čijim čvorovima su smešteni atomi kako je to pokazano na slici 3.2. Svaki čvor kristalne rešetke ima identičnu okolinu. Najmanja grupa atoma koja se ponavlja u prostornoj kristalnoj rešetki naziva se *elementarna kristalna rešetka*.

Veličina i oblik elementarne kristalne rešetke definisani su sa tri vektora - a , b i c , koji polaze iz ugla elementarne rešetke. Veličine vektora - a , b i c i uglovi među njima - α , β i γ , nazivaju se parametrima elementarne kristalne rešetke (slika 3.2b).



Slika 3.2 (a) Prostorna kristalna rešetka idealnog kristalnog tela; (b) Parametri elementarne kristalne rešetke

Kristalni sistemi

U zavisnosti od vrednosti parametara elementarne kristalne rešetke sve prostorne rešetke svrstavaju se u sedam različitih kristalnih sistema. Ovi sistemi prikazani su u tabeli 3.1. Neki od ovih sedam kristalnih sistema mogu imati različite elementarne kristalne rešetke. Postoje četiri tipa elementarnih kristalnih rešetki: prosta, prostorno centrirana, površinski centrirana i bazno centrirana.

Tabela 3.1. Podela kristalnih rešetki po kristalnim sistemima

Kristalni sistem	Parametri rešetke	Prostorna rešetka
kubni	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	prosta kubna prostorno-centrirana površinski-centrirana
tetragonalni	$a=b\neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	prosta tetragonalna prostorno-centrirana
ortorombični	$a\neq b\neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	prosta ortorombična prostorno-centrirana površinski-centrirana bazno-centrirana
romboedarski	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$	prosta romboedarska
heksagonalni	$a=b\neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ \gamma=120^\circ$	prosta heksagonalna
monoklinični	$a\neq b\neq c$ $\alpha=\gamma=90^\circ\neq\beta$	prosta monoklinična bazno-centrirana
triklinični	$a\neq b\neq c$ $\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90^\circ$	prosta triklinična

3.1 GEOMETRIJA ELEMENTARNIH KRISTALNIH REŠETKI

Geometrija elementarnih kristalnih rešetki može da se definiše u Dekartovom koordinatnom sistemu sa koordinatnim osama x , y , z , što je razmotreno za svaku kristalnu rešetku pojedinačno.

3.1.1. Položaj atoma u kubnoj elementarnoj kristalnoj rešetki

Za određivanje položaja atoma u elementarnoj kubnoj rešetki koristi se Dekartov koordinatni sistem sa koordinatnim osama x , y , z . U kristalografiji za početak koordinatnog sistema uzima se levi donji ugao elementarne kristalne rešetke. Položaj atoma u elementarnoj kristalnoj rešetki određuje se korišćenjem jediničnog rastojanja duž koordinatnih osa x , y i z , kako je to pokazano na slici 3.2.1a. Kao primer za određivanje položaja atoma uzmimo kubnu prostorno centriranu rešetku prikazanu na sl. 3.2.1b. Položaji atoma za osam rogljeva elementarne kubne prostorno centrirane rešetke su:

$$(0,0,0) \ (1,0,0) \ (0,1,0) \ (0,0,1) \\ (1,1,1) \ (1,1,0) \ (1,0,1) \ (0,1,1).$$

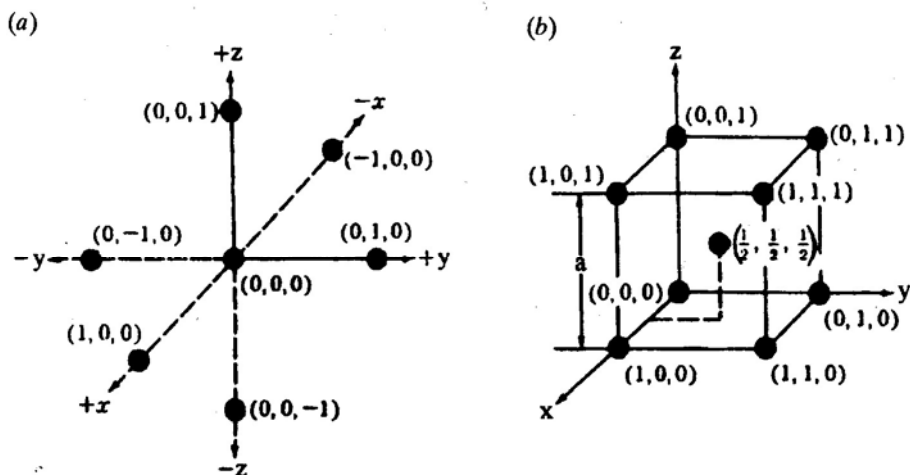
Centralni atom elementarne kubne prostorno centrirane rešetke ima sledeće koordinate položaja:

$$(1/2, 1/2, 1/2)$$

Na isti način mogu da se odrede i koordinate položaja kod elementarne kubne površinski centrirane rešetke.

3.1.2 Pravci kod kubne elementarne kristalne rešetke

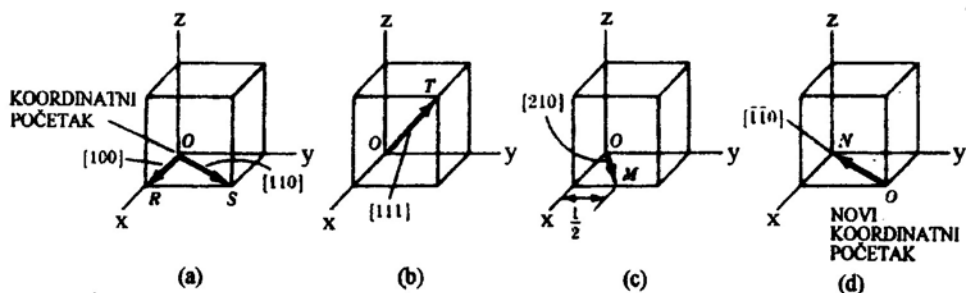
Često je potrebno pozivati se na određene pravce u kristalnim rešetkama. Ovo je naročito važno za metale i legure čija se svojstva menjaju sa promenom orijentacije kristala. Za kubne kristalne rešetke *kristallografski indeksi pravaca su komponente vektora pravca razložene duž svake koordinatne ose i svedene na najmanji ceo broj*.



Slika 3.2.1 (a) Dekartov koordinatni sistem za određivanje položaja atoma u elementarnoj rešetki; (b) Položaj atoma kod prostorno-centrirane rešetke.

Da bismo prikazali neke od pravaca kubne elementarne kristalne rešetke, nacrtajmo vektore pravaca koji polaze iz koordinatnog početka, koji je obično ugao kubne elementarne kristalne rešetke, a kraj vektora je na stranici kuba, kako je to pokazano na slici 3.2.2.

Koordinate položaja kraja vektora pravca na stranici kuba, pošto se prevedu u cele brojeve, predstavljaju indekse pravaca. Indeksi pravaca se stavljaju u uglaste zagrade bez zapeta između njih. Primer: koordinate položaja kraja vektora OR su (1,0,0) pa su indeksi pravca OR [100]; koordinate položaja kraja vektora OS su (1,1,0), a indeksi pravca vektora OS [110], (sl. 3.2.2a); koordinate položaja kraja vektora OT su (1,1,1), a indeksi pravca vektora OT [111], (sl. 3.2.2b); koordinate položaja vektora OM su (1,1/2,0), a kako indeksi pravca moraju biti celi brojevi, koordinate položaja vektora množimo sa 2 da bismo ih preveli u cele brojeve, pa prema tome indeksi pravca vektora OM postaju OM [210], (sl. 3.2.2c); u primeru na slici 3.2.2d, koordinate položaja kraja vektora ON su (1, 1, 0), jer je promenjen položaj koordinatnog početka, pa su indeksi pravca negativni, sto se obeležava crticom iznad negativnog broja, tako da su indeksi pravca vektora ON $\bar{1}\bar{1}0$. Posebno treba naglasiti da svi paralelni vektori pravaca imaju iste indekse pravaca rešetke.



Slika 3.2.2 Pravci kod kubne elementarne kristalne rešetke

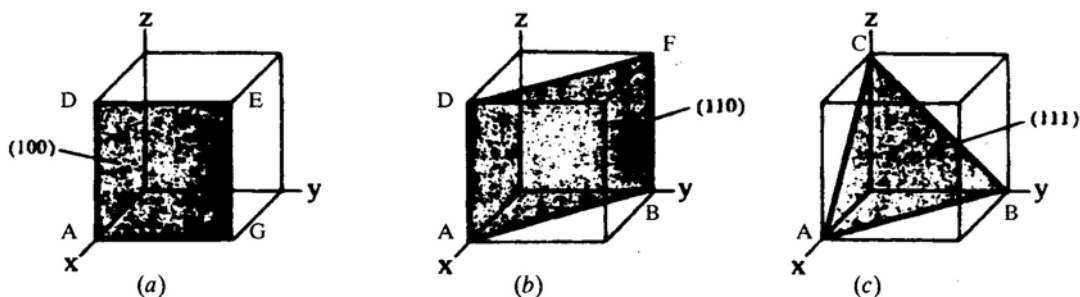
Pravce nazivamo *kristalografski ekvivalentnim* ako je rastojanje atoma duž svakog pravca jednako. Kao primer kristalografski ekvivalentnih pravaca uzmimo stranice kuba: $[100] [010] [001] [010] [001] [100] = \langle 100 \rangle$

Ekvivalentni pravci imaju zajednički indeks, koji se obeležava $\langle 100 \rangle$ i predstavljaju *familiju* stranica kuba. Drugi primer ekvivalentnih pravaca je familija pravaca dijagonale kuba $\langle 111 \rangle$. Treći primer je ekvivalentni indeks $\langle 110 \rangle$ koji predstavlja familiju pravaca dijagonale stranice kuba.

3.1.3 Kristalografske ravni kubne elementarne kristalne rešetke. Millerovi indeksi

Ponekad je potrebno pozivati se na određene kristalografske ravni unutar kristalne rešetke, ili poznavati orijentacije kristalografskih ravni, ili familije ravni kristalne rešetke, jer to ima uticaja na svojstva i ponašanje materijala.

Za definisanje kristalografskih ravni kod kubnih kristalnih struktura, Miller je uveo sistem obeležavanja indeksima (hkl) , koji se po njemu nazivaju *Millerovi indeksi*. Millerovi indeksi (hkl) predstavljaju *recipročne vrednosti odsečaka koje data ravan pravi na kristalografskim osama x, y i z*. Stranica kuba elementarne kubne rešetke predstavljena je jediničnom dužinom, a odsečak se meri delom od jedinične dužine. Na ovaj način dobijeni brojevi stavljaju se u male zagrade bez zapeta (hkl) . Kao primer Millerovih indeksa uzećemo karakteristične ravni kubne rešetke prikazane na slici 3.2.3. Ravan ADEG kubne rešetke, prikazane na sl. 3.2.3a, pravi odsečak na x-osi $OA = 1$, za y-osu je ∞ i za z-osu je ∞ , pa je Millerov indeks po definiciji: $(1/0A \ 1/\infty \ 1/\infty)$ odnosno $(1/1 \ 1/\infty \ 1/\infty)$, pa su indeksi (100) .



Slika 3.2.3 Millerovi indeksi za neke važnije ravni kubne kristalne rešetke

Za ravan ADFB kubne rešetke, prikazane na sl. 3.2.3, odsečak na x -osi $OA = 1$, na y -osi $OB = 1$ i za z -osu je ∞ , pa su Milerovi indeksi za datu ravan:

$(1/OA \ 1/OB \ 1/\infty)$, odnosno $(1/1 \ 1/1 \ 1/\infty)$, pa su indeksi (110) .

Za ravan ACB elementarne kubne kristalne rešetke, (sl. 3.2.3c), odsečak na x -osi $OA = 1$, za y -osu $OB = 1$ i za z -osu $OC = 1$, pa su Milerovi indeksi za datu ravan:

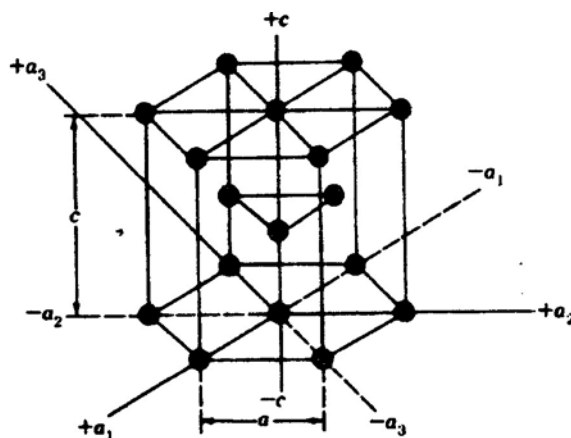
$(1/OA \ 1/OB \ 1/OC)$, odnosno $(1/1 \ 1/1 \ 1/1)$, pa su indeksi (111) .

Kod kristala sa visokom simetrijom postoje neparalelne ravni koje imaju identične atomske rasporede. Ovakve ravni su *kristalografski ekvivalentne*, kao što su ravni u kubnoj rešetki koje čine stranice kuba. Ekvivalentne ravni predstavljaju *familiju ravni*, imaju isti oblik, predstavljaju se indeksima jedne od ravni i stavljaju u veliku zagradu. Primer: familija $\{100\}$ označava svih šest stranica kuba (100) , (010) , (001) , $(\bar{1}00)$, $(0\bar{1}0)$, $(00\bar{1})$, familija $\{111\}$ ravni kubne rešetke (111) , $(\bar{1}11)$, $(1\bar{1}1)$, $(11\bar{1})$, $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(1\bar{1}\bar{1})$, $(\bar{1}1\bar{1})$ i familija $\{110\}$ ravni kubne rešetke (110) , (101) , (011) , $(1\bar{1}0)$, $(10\bar{1})$, $(01\bar{1})$.

3.1.4 Kristalografske ravni i pravci kod heksagonalne kristalne rešetke

Modificirani Milerovi indeksi pravaca i ravni koriste se za definisanje heksagonalne kristalne rešetke i koriste četiri indeksa h , k , i i l . Ako su određeni indeksi h , k i l tada je indeks i određen izrazom $-(h + k)$. Ovi indeksi nazivaju se *Miler-Braveovi indeksi* i kod njih se umesto tri ose x , y i z koriste četiri ose. Tri ose su u horizontalnoj ravni a_1 , a_2 i a_3 i postavljene su pod uglom od 120° i četvrta osa c je u pravcu z -ose, kako je to pokazano na sl. 3.2.4.

Miler-Braveovi indeksi za baznu ravan $K'O'MPLN'$ heksagonalne kristalne rešetke, prikazane na sl. 3.2.5a, su (0001) , jer su preseči ove ravni sa osama $a_1 = \infty$, $a_2 = \infty$, $a_3 = \infty$ i $c = 1$.



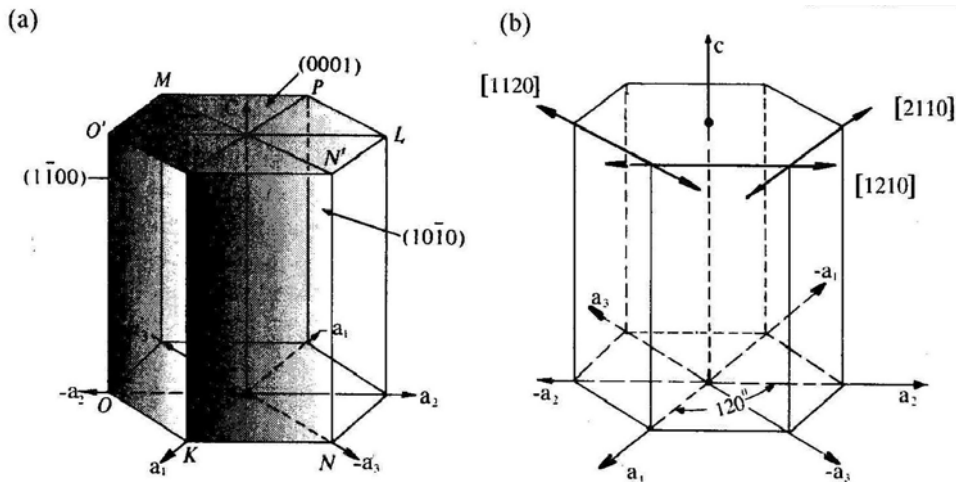
Slika 3.2.4 Četiri koordinatne ose kod heksagonalne kristalne rešetke

Ravan $KK'N'N$ ima odsečke na osama: $a_1 = 1$, $a_2 = \infty$, $a_3 = -1$ i $c = \infty$, pa su indeksi za datu ravan $(10\bar{1}0)$. Za ravan $OOK'K$ odsečki na osama su: $a_1 = 1$, $a_2 = -1$, $a_3 = \infty$ i $c = \infty$, pa su indeksi za datu ravan $(1\bar{1}00)$.

Za ostale ravni koje predstavljaju stranice prizme dobićemo neke druge indekse.

Sve ove ravni sačinjavaju jednu familiju koji označavamo sa $\{1010\}$.

Za definisanje pravca kod HGP koristimo, takođe četiri indeksa h , k , i i l . Indeksi pravaca h , k i i su koordinate vektora pravca na tri ose a_1 , a_2 i a_3 , a indeks l na osi c , s tim da je ugao između a_1 , a_2 i a_3 120° . Postupak određivanja pravca je potpuno identičan sa metodom koja je objašnjena kod kubnog sistema. Na sl. 3.2.5b naznačeni su važniji pravci kod HGP rešetke.

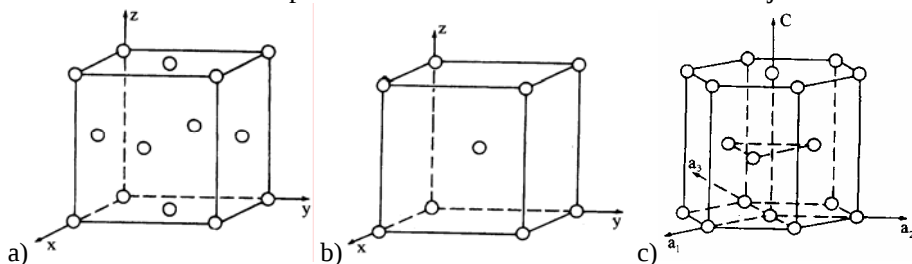


Slika 3.2.5 Milerovi indeksi za neke ravni heksagonalne kristalne rešetke.

3.2. Kristalna struktura metala

Veliki broj metala (oko 90%) kristališe u procesu očvršćavanja u jedan od tri tipa gusto pakovane kristalne rešetke: *kubnu prostorno centriranu* (KZC) (slika 3.3b), *kubnu površinski-centriranu* (KPC) (sl. 3.3a) i *heksagonalnu gusto pakovanu* (HGP) (sl. 3.3c).

Na pokazanim modelima elementarnih kristalnih rešetki atomi su prikazani kao lopte. Rastojanje između atoma kod kristalnih struktura metala je ekstremno malo i iznosi 0,1 do 0,7 nm. U zavisnosti od rasporeda atoma u rešetki određena su i svojstva metala.

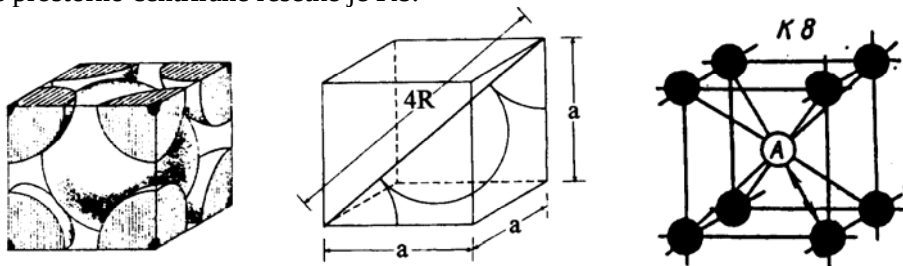


Slika 3.3. Elementarne kristalne rešetke po kojima kristališu metali: (a) kubna prostorno centrirana; (b) kubna površinski centrirana; (c) heksagonalna gusto pakovana

Kubna prostorno-centrirana rešetka

Kubna prostorno-centrirana rešetka ima atome koji su raspoređeni po rogljevima kuba i jedan atom smešten u preseku dijagonale kuba. Ovaj tip kristalne rešetke sadrži samo dva slobodna atoma: jedan u centru kuba i jedan atom po ukupnoj masi koju daju atomi raspoređeni po rogljevima kuba (svaki atom na roglju učestvuje sa $1/8$), slika 3.4.

Gustina pakovanja kubne prostorno centrirane kristalne rešetke određena je *koordinacionim brojem*, pod kojim se podrazumeva broj atoma koji okružuju ili dodiruju centralni atom. Što je koordinacioni broj veći, to je veća gustina pakovanja. Koordinacioni broj kubne prostorno centrirane rešetke je K8.



Slika 3.4. Kubna prostorno centrirana rešetka metala

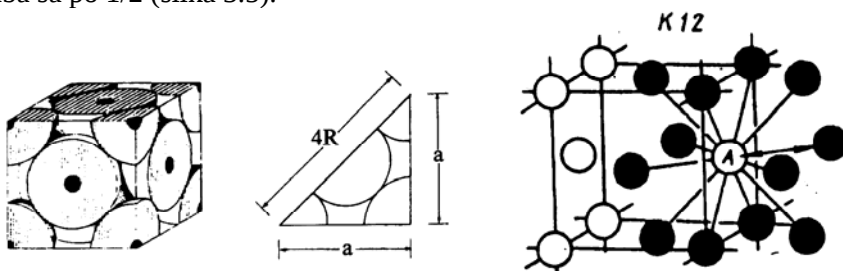
Koeficijent ispunjenja rešetke (KIR) određuje se iz odnosa zapremine atoma u rešetki i zapremine elementarne rešetke:

$$(KIR) = \frac{\text{zapremina atoma u rešetki}}{\text{zapremina rešetke}}$$

Za kubnu prostorno centriranu rešetku KIR iznosi 0,68. To znači da je 68% zapremine zauzeto atomima, a preostalih 32% je prazno. Kubna prostorno centrirana rešetka nije gusto pakovana jer atomi mogu da budu pakovani i bliže jedan drugom. Ovaj tip kristalne rešetke imaju: α -Fe, Cr, W, Mo i V.

Kubna površinski centrirana kristalna rešetka

Kubna površinski centrirana kristalna rešetka ima atome raspoređene po rogljevima kuba i po jedan atom u preseku dijagonale stranice kuba. Iz šematskog prikaza elementarne rešetke se vidi da je rešetka pakovana sa najvećom mogućom gustinom. Rešetka ima četiri slobodna atoma: osam atoma po rogljevima sa po 1/8 i šest atoma na stranicama kuba sa po 1/2 (slika 3.5).



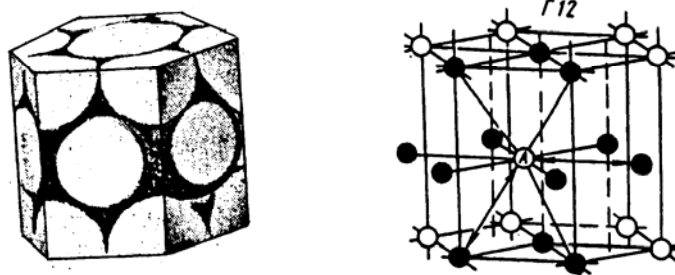
Slika 3.5. Kubna površinski centrirana rešetka metala

Kako kod ovog tipa rešetke svaki atom ima dvanaest najbližih atoma, to je *koordinacioni broj* K12. Koeficijent ispunjenja rešetke (KIR) za ovaj tip rešetke iznosi 0.74, što znači da je 74% zapremine zauzeto atomima i to je maksimalno moguće pakovanje za sfere sa istim prečnikom. Po ovom tipu kristalne rešetke kristališu metali kao što su: γ -Fe, Al, Cu, Ni i Pb.

Heksagonalna gusto pakovana kristalna rešetka

Heksagonalna gusto pakovana kristalna rešetka ima po jedan atom u uglovima i u centru šestougaonih osnova prizme i tri atoma u srednjoj ravni prizme.

Rešetka ima šest slobodnih atoma: tri atoma unutar prizme i dvanaest atoma na obe osnove prizme koji pripadaju sa $1/6$ i po dva atoma koji pripadaju sa $1/2$ elementarnoj rešetki (slika 3.6).



Slika 3.6. Heksagonalna gusto pakovana kristalna rešetka metala

Kako svaki atom kod heksagonalno gusto pakovane kristalne rešetke ima dvanaest najbližih atoma, to je koordinacioni broj K12. Koeficijent ispunjenja rešetke (KIR) = 0,74 što predstavlja maksimalno moguću gustinu pakovanja.

Odnos visine (c) šestougaone prizme (HGP) kristalne strukture i dužine strane njene osnove (a) - c/a , za idealnu heksagonalno gusto pakovanu rešetku je 1,633. Za metale Cd i Zn odnos c/a nešto je veći što ukazuje da su atomi kod ovih metala blago izduženi duž c -ose. Kod metala kao što su Mg, Co, Zr i Ti odnos c/a nešto je manji od 1,633; pa su atomi ovih metala blago zbijeni duž c -ose.

Polimorfija

Neki metali u zavisnosti od temperature i spoljnog pritiska mogu da imaju više tipova kristalnih rešetki. Ovaj fenomen se naziva *polimorfija* ili *alotropija*. Kako svojstva i ponašanje metala zavise uglavnom od oblika kristalne strukture, to je ovaj fenomen veoma važan sa gledišta termičke obrade metala, obrade deformacijom kao i za zavarivanje. Kao primer pokažimo promenu kristalne rešetke gvožđa od sobne temperature do temperature topljenja.

Gvožđe ima (KZC) i (KPC) kristalne rešetke od sobne temperature do temperature topljenja 1539°C. Alfa-gvožđe na temperaturama od -273° do 912°C ima (KZC) kristalnu rešetku. Gama-gvožđe od temperature 912° do 1394°C ima (KPC) kristalnu rešetku. Delta-gvožđe od temperature 1394° do 1539°C ima (KZC) kristalnu rešetku, ali ima nešto veći parametar rešetke od alfa-gvožđa. U tabeli 3.2 date su alotropske promene nekih metala.

Tabela 3.2. Alotropske promene kristalne rešetke nekih metala.

Metal	Kristalna rešetka na sobnoj temperaturi	Na drugoj temperaturi
Kobalt (Co)	(HGP)	KPC (>427°C)
Gvožđe (Fe)	(KZC)	KPC (912°-1394°C); KZC (>1394°C)
Litijum (Li)	(KZC)	HGP (<-193°C)
Titan (Ti)	(HGP)	KZC (>883°C)
Cirkonijum (Zr)	(HGP)	KZC (>872°C)

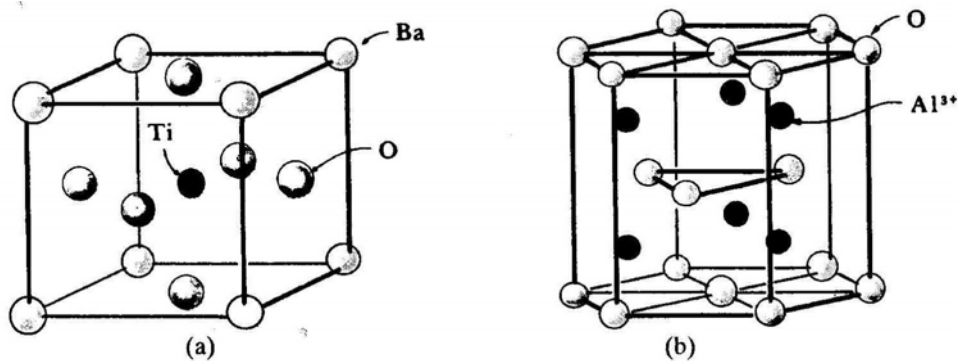
Anizotropija

Izučavanjem kristalnih rešetki metala videli smo da sve ravni nisu podjednako zaposednute atomima, niti su rastojanja između atoma u svim pravcima jednaka. Iz ovoga se može zaključiti da svojstva i ponašanje metala neće biti jednaki u svim pravcima. Elementarne rešetke metala su anizotropne, tj. imaju različita svojstva u različitim pravcima.

Metali koji se koriste u inženjerskoj praksi javljaju se uglavnom kao polikristalni materijali, tj. sastoje se od velikog broja anizotropnih kristala ($1\text{cm}^3=10000$ kristala). Kako je ovaj veliki broj kristala međusobno različito orijentisan, to su i svojstva u različitim pravcima manje više jednaka, pa se polikristalni materijali nazivaju “kvazi izotropnim”, odnosno imaju lažnu izotropiju. Lažna izotropija metala neće postojati ako su kristali orijentisani u istom pravcu. Ovakva orijentisanost se stvara kao rezultat obrade metala deformisanjem u hladnom stanju, ali ne u potpunosti. U tom slučaju polikristalni metali imaju anizotropna svojstva.

3.3. STRUKTURA KERAMIČKIH MATERIJALA

Kristalna struktura i dijagrami stanja keramičkih materijala su veoma kompleksni, zato što se sastoje od najmanje dva elementa i to različitih poluprečnika jona. Kao primeri na slici 3.7 date su strukture Al_2O_3 (dva elementa) i BaTiO_3 (tri elementa). Kod Al_2O_3 rešetka je heksagonalna, pri čemu su joni O^{2-} na mestima koja odgovaraju HGP rešetki, a joni Al^{3+} u međuravnima, (sl. 3.7). Kod BaTiO_3 rešetka je kubna, pri čemu su joni Ba u rogljevima rešetke, a joni O na mestima koja odgovaraju kubnoj površinski centriranoj rešetki, a joni Ti na mestima koja odgovaraju kubnoj prostorno centriranoj rešetki.



Slika 3.7 Prikaz kristalne strukture keramičkih materijala: (a) BaTiO_3 , i (b) Al_2O_3

Veza između atoma kod keramičkih materijala može biti kovalentna (zajednički elektronski par) i jonska (elektrostatičko dejstvo suprotno naelektrisanih jona). Obe veze su veoma jake (jače od metalnih veza). Zbog toga su svojstva otpornosti keramičkih materijala po pravilu značajno bolja nego kod metala, sto se odnosi posebno na tvrdoću i pritisnu čvrstoću. Veza između atoma kod realnih keramičkih materijala je po pravilu mešovita, a udeo jonske veze može se odrediti na osnovu izraza:

$$\% \text{ udela jonske veze} = (1 - e^{-0,25\Delta}) \cdot 100$$

gde - Δ kvadrat razlika elektronegativnosti elemenata. Tako npr., udeo jonske veze kod SiC je 12%, a kod Al_2O_3 je 63%. Vrednosti elektronegativnosti nekih važnijih elemenata dati su u tabeli 3.3.

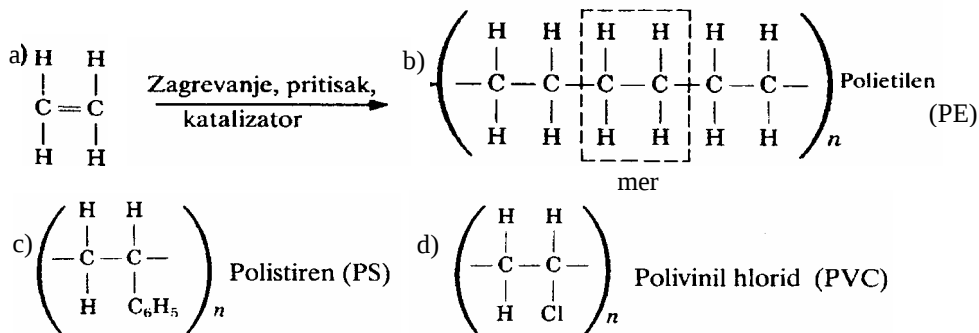
Tabela 3.3 Elektronegativnost nekih elemenata

Element	Si	C	Al	O	Zr	N	B
	1,8	2,5	1,5	3,5	1,4	3,0	2,0

Poznavanje udela jonske ili kovalentne veze između atoma u ovim jedinjenjima je značajno jer određuje vrstu kristalne strukture koja će se obrazovati u jedinjenju.

3.4. Struktura polimera

Polimeri se sastoje od dugačkih lanaca organskih molekula. Najjednostavniji molekuli koji grade polimere su ugljovodonici, npr. C_2H_4 (etilen), kod kojih su atomi ugljenika i vodonika povezani kovalentnom (primarnom) vezom. Osnovna jedinica polimernog lanca zove se *mer*¹ (ili monomer), pa može da se kaže da polimer predstavlja veliki broj mera koji se ponavljaju stotinama i hiljadama puta u lancu. Ponavljanje mera u lancu polimera može da se poredi sa ponavljanjem kristalne rešetke u prostoru kod metalnih materijala. Veze između različitih lanaca su sekundarne (Van der Valsove) i znatno su slabije od primarnih, kovalentnih veza. Neki primeri polimera su prikazani na sl. 3.8



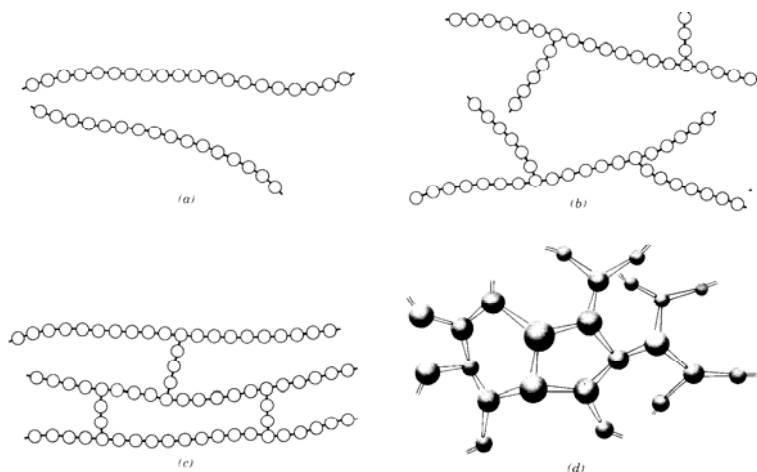
Slika 3.8. Osnovne strukture polimernih molekula: a) molekul etilena, b) polietilen, lanac sačinjen od velikog broja molekula etilena, c), polistiren, d) PVC

Molekulska struktura

Svojstva polimera ne zavise samo od monomera, već i od strukture, koja može da bude linearna, razgranata, poprečno povezana i umrežena, sl. 3.9

Linearni polimeri. Monomeri su povezani linijski u pojedinačne duge lance, kako je to šematski prikazano na sl. 3.9a, gde svaki krug predstavlja jedan monomer. Ovi dugi lanci su veoma plastični, nisu pravolinijski i međusobno su povezani sekundarnim, Van der Valsovim vezama.

¹ Reč mer dolazi od grčke reči *meros* i označava deo.



Slika 3.9. Šematski prikaz: a) linearni polimer; b) razgranati polimer; c) poprečno povezani polimer; d) umreženi polimer

Razgranati polimeri. Polimeri koji imaju bočne lance iste strukture kao i osnovni lanac nazivaju se razgranati polimeri, sl. 3.9b. Bočni lanci - grane sprečavaju međusobno pomeraње molekulskih lanaca, što povećava njihovu čvrstoću, a smanjuje plastičnost. Gustina razgranatih polimera je manja nego kod linearnih polimera.

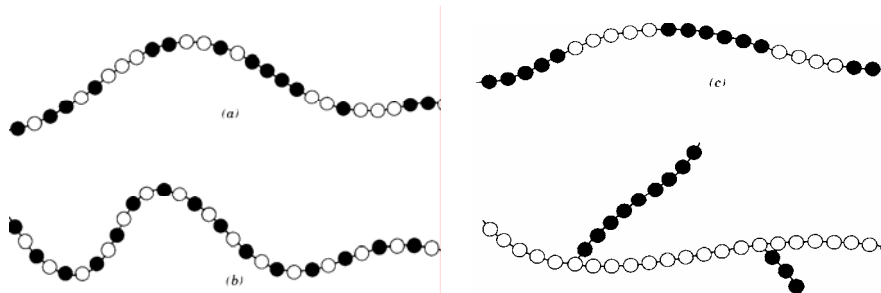
Poprečno povezani polimeri. Kod poprečno povezanih polimera susedni linearni lanci se povezuju jedan sa drugim kovalentnim vezama, sl. 3.9c. Poprečno povezivanje ima veliki uticaj na svojstva polimera tako što povećava tvrdoću, čvrstoću, krutost i dimenzionu stabilnost.

Umreženi polimeri. Osnovne jedinice polimernog lanca mogu da formiraju trodimenzionu mrežu umesto linearne, sl. 3.9d. Polimeri, poprečno povezani u velikoj meri, takođe mogu da se smatraju umreženim polimerima.

Posebno treba istaći da struktura polimera obično nije jednoznačna. Tako npr. pretežno linearni polimeri po pravilu imaju sposobnost ograničenog grananja i poprečnog povezivanja.

Kopolimeri

Kada su svi monomeri u polimernom lancu istoga tipa, polimer se naziva *homopolimer*. Ako se sa **A** označi monomer, homopolimerni lanac će biti **AAAAAAAAA...** Međutim, bar dva različita tipa monomera mogu da budu kombinovani da bi se dobila određena, specifična svojstva polimera. Takvi polimeri se zovu *kopolimeri*. Zavisno od procesa polimerizacije i od uzajamnog odnosa osnovnih jedinica monomera, postoje četiri različita tipa kopolimera: proizvoljni, naizmenični, blok i kalemljeni, sl. 3.10.



Slika 3.10. Tipovi kopolimera: a) proizvoljni; b) naizmenični; c) blok; d) kalemljeni

Proizvoljni kopolimeri, sl. 3.10a. Različiti monomeri su proizvoljno raspoređeni unutar polimernog lanca. Ako se sa A (beli krugovi) i B (crni krugovi) obeleže različiti monomere, onda bi raspored mogao da bude:



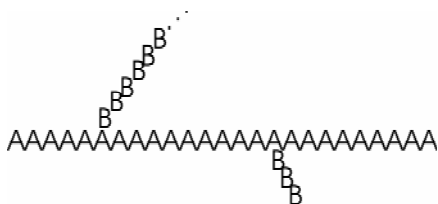
Naizmenični kopolimeri, sl. 3.10b. Različiti monomeri imaju određeni naizmenični raspored:



Blok kopolimeri, sl. 3.10c. Različiti monomeri skupljeni u blokove koji su naizmenično raspoređeni duž lanca:



Kalemljeni kopolimeri, sl. 3.10d. Jedan homopolimer se kalemi na dugi lanac drugog homopolimera:



4. PONAŠANJE MATERIJALA U USLOVIMA DELOVANJA MEHANIČKOG OPTEREĆENJA

Pri projektovanju mašinskih konstrukcija, delova i elemenata, ključni parametar je čvrstoća materijala, a od velikog značaja su i ostale mehaničke osobine. Ispitivanja koja se odnose na određivanje čvrstoće materijala, odnosno njegovih mehaničkih osobina, se zovu *mehanička ispitivanja*. Cilj ovih ispitivanja je da se pod dejstvom opterećenja koje je slično radnom opterećenju, odrede granične karakteristike, kao što su opterećenje pri lomu, najveće opterećenja pri kome se javlja samo elastična deformacija, najveća ukupna deformacija.

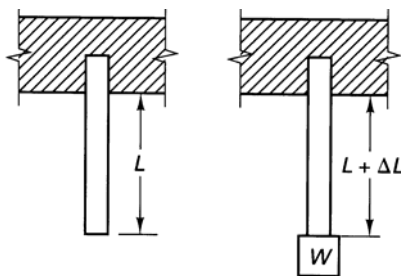
Mehanička svojstva materijala određuju se laboratorijskim ispitivanjima, pri kojima je potrebno, koliko je to moguće, ostvariti i održavati stvarne uslove eksploatacije. Faktori o kojima se mora voditi računa su:

- vrsta opterećenja (zatezanje, pritisak, savijanje, smicanje, uvijanje uz mogućnost njihovog kombinovanja),
- način dejstva sile (statičko ili dinamičko),
- temperatura ispitivanja (najčešća je $20 \pm 5^\circ\text{C}$, a može se ispitivati i na niskim i povišenim temperaturama).

Nezavisno od grupe ispitivanja koja se primenjuje (sa razaranjem ili bez njega), cilj ispitivanja materijala je iskazivanje osobina materijala pomoću određenih brojčanih vrednosti ili pokazatelja, koji se porede sa standardizovanim veličinama. U odnosu na stepen odstupanja od standardom predviđenih vrednosti donosi se ocena o osobinama, kvalitetu i upotrebljivosti materijala. Sve vrste ispitivanja mašinskih materijala se obavljaju prema standardima ili normama. Standard je zakonom utvrđeni propis, naziv ili mera koji mora da se poštuje. Standardom se propisuju mere i oblici proizvoda, označavanje i kvalitet materijala, kao i postupci ispitivanja. Jugoslovenski standardi (JUS) koji se odnose na materijale su uglavnom usaglašeni sa standardima drugih zemalja (DIN - nemački, BS - britanski, GOST - ruski, ASTM - američki), što je inače uobičajena praksa, jer je time obezbeđena jednoobraznost i lakša međusobna komunikacija. Međutim, poslednjih godina se u Evropi standardi unificiraju (oznaka EN), tako da će uskoro da se primenjuju jedinstveni evropski standardi.

4.1. Napon i deformacija

Kada na materijala određenog oblika i dimenzija, koja je učvršćen na jednoj strani, deluje spoljašnje opterećenje (sila), on se deformiše. Na primer, ako se na štap konstantnog poprečnog preseka S i dužine L okači teg težine W , sl. 4.1, dužina štapa se povećava za veličinu ΔL (izduženje), a poprečni presek smanjuje za veličinu ΔS (suženje). Za datu težinu tega, izduženje ΔL i suženje ΔS zavise od početne dužine L i početne površine poprečnog preseka štapa S . Količnik izduženja i početne dužine se zove *jedinično izduženje* i obeležava sa $\varepsilon = \Delta L/L$. Iako je $\Delta L/L$ bezdimenziona veličina, ona se često množi sa 100% i izražava procentima.

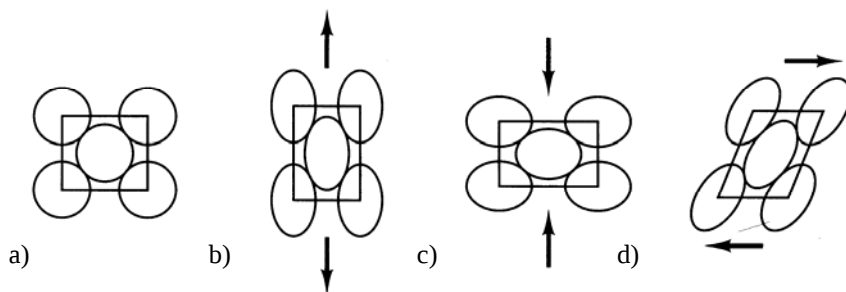


Slika 4.1. Zatezno opterećenje i rezultujuće izduženje

U zavisnosti od toga da li nastala deformacija izaziva trajnu promenu dimenzija materijala ili ne, razlikuju se elastična i plastična deformacija. Elastična deformacija nestaje po prestanku dejstva sile. Plastična deformacija ostaje u materijalu posle prestanka dejstva sile i dovodi do trajne promene oblika i dimenzija materijala.

Pored deformacije, kao odziv materijala na dejstvo sile javlja se i reaktivni napon unutar štapa kojim se opterećenje prenosi do oslonca. *Napon* se definiše kao količnik sile koja se prenosi kroz materijal i površine poprečnog preseka koja prenosi tu silu, i označava se sa σ . U slučaju zategnutog štapa, sl. 4.1, $\sigma = F/S$ je normalni zatezni napon (sila koja deluje na materijal je normalna na poprečni presek). Napon se, u SI sistemu jedinica, izražava u megapaskalima ($\text{MPa} = \text{N/mm}^2$).

Osim zateznog postoje i druge vrste opterećenja koja izazivaju druge vrste napona i deformacija, tabela 4.1. Pritisna sila teži da skрати epruvetu koja se ispituje, a karakteristične veličine koje se javljaju su *pritisni napon i deformacija* (skraćenje). Smicajni napon i deformacija nastaju u slučaju kada deluju dve sile duž dva paralelna pravca (znači leže u istoj ravni) a imaju suprotne smerove. Elastična deformacija kristalne rešetke metala pri dejstvu različitih vrsta sila je prikazana na sl. 4.2.



Slika 4.2. Deformacija kristalne rešetke pri dejstvu različitih vrsta sila;
a) neopterećena; b) zatezanje; c) pritisak; d) smicanje

Kada se sila koja deluje na materijal tokom vremena lagano povećava, odnosno kada je priraštaj sile u jedinici vremena stalan, kaže se da je njeno delovanje *statičkog* karaktera. Pošto je statičko opterećenje prisutno u mnogim inženjerskim konstrukcijama, veoma je važno poznavati ponašanje materijala u takvim uslovima. Stoga su razvijene i standardizovane brojne *statičke metode*, pomoću kojih je moguće odrediti mehaničke osobine u uslovima statičkog dejstva sile.

Tokom rada, mnogi mašinski delovi i konstrukcije, su izloženi delovanju različitih vrsta *dinamičkog opterećenja* koje može:

- (1) trenutno - udarom,
- (2) u ponovljenim ciklusima opterećenje - rasterećenje i
- (3) učestalim promenama opterećenja, npr. od zateznog do pritisknog.

Mehaničke osobine koje se određuju u uslovima dinamičkog dejstva sile se nazivaju *dinamičke osobine*, a metode pomoću kojih se određuju – *dinamičke metode*.

Tabela 4.1. Vrste sila, osobine koje se određuju i primena

Karakter dejstva sile	Vrsta sile	Osobine	Primena
 zatezanje	statička	zatezna čvrstoća, izduženje, suženje	svi materijali izuzev kamena
	statička dugotrajna	trajna čvrstoća, trajno izduženje, granica puzanja	metalni materijali na povišenim temperaturama
	udarna	specifičan rad udara pri lomu	retko
	dinamička	dinamička čvrstoća	svi materijali izuzev kamena
 pritisak	statička	pritisna čvrstoća, skraćenje, proširenje	građevinski materijali, metali za ležišta
	udarna	specifičan rad udara pri lomu	retko u primeni
	na izvijanje	čvrstoća na izvijanje	delovi konstrukcija
	dinamička	dinamička čvrstoća	sivi liv
 savijanje	statička	savojna čvrstoća, ugib pri lomu, krutost	građevinski materijal drvo, sivi liv
	udarna	specifičan rad savijanja pri lomu	veštački materijali drvo, Zn i legure, odlivci od sivog liva
	udarna pri zarezanoj epruveti	žilavost	drvo, plastični materijali, metali
	dinamička	dinamička savojna čvrstoća	metalni materijali
 uvijanje	statička	uvojna čvrstoća	retko
	udarna	specifičan rad uvijanja pri lomu	alatni čelici
	dinamička	dinamička uvojna čvrstoća	metalni materijali
 smicanje	statička	smicajna čvrstoća	sivi liv, drvo, čelik

Elastične deformacije

Deformacija čiji uticaj na strukturu, oblik i svojstva nestaje po prestanku dejstva spoljnih sila naziva se *elastična deformacija*. Elastične deformacije ne izazivaju neke znatnije promene u strukturi i svojstvima metala.

Ako kristal opteretimo zatežućom silom, doći će do neznatnog povećanja njegove dužine, a uklanjanjem opterećenja dužina se vraća na početnu vrednost. Ako ga opteretimo silom pritiska, kristal će neznatno smanjiti dužinu. Ove neznatne promene dužine su rezultat blagog izduženja ili skraćenja elementarne kristalne rešetke u pravcu dejstva zatežućih sila, odnosno sila pritiska (sl. 4.2).

Modul elastičnosti. U oblasti elastičnih deformacija, za veliki broj metala kada su opterećeni zatežućom silom, relativno male vrednosti, normalni napon (σ) proporcionalan je deformaciji (ε) i određen Hukovim (*Hooke*) zakonom:

$$\sigma = E\varepsilon$$

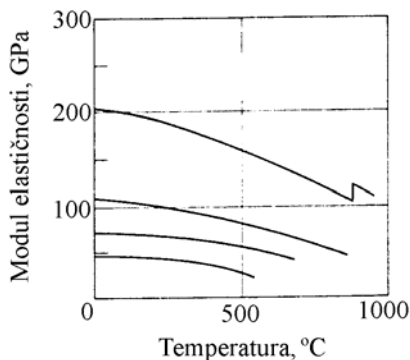
Koeficijent proporcionalnosti (E) naziva se *modul elastičnosti* (*Young-ov modul*).

Modul elastičnosti (E) u direktnoj je vezi sa međuatomskim silama veze. Metali sa većim vrednostima sila privlačenja među atomima, imaju veće vrednosti modula elastičnosti, tako npr. keramički materijali imaju veće vrednosti modula elastičnosti u odnosu na metale, dok plastični materijali imaju značajno niže vrednosti.

Modul elastičnosti je i mera krutosti materijala. Krut materijal, sa visokom vrednošću modula elastičnosti, održava svoje dimenzije i oblik i pod elastičnim opterećenjem.

Moduli elastičnosti zavise od temperature. Porastom temperature opada vrednost modula elastičnosti, kako je to pokazano na dijagramu modul elastičnosti E - temperatura t , na slici 4.3. za neke metale. Pojava diskontinuiteta na krivoj za gvožđe Fe , javlja se zbog svojstava polimorfije gvožđa (na $912^{\circ}C$ gvožđe menja rešetku KZC i prelazi u KPC). Takođe se može zapaziti na dijagramu, da metali sa višom temperaturom topljenja imaju veće vrednosti modula elastičnosti.

Kod kristala metala elastična svojstva su anizotropna, i zavise od kristalografskih pravaca. Kako su inženjerski materijali polikristalni, sa velikim brojem različito orijentisanih kristala, možemo ih smatrati kvaziizotropnim, pa svojstva elastičnosti imaju neku srednju vrednost.

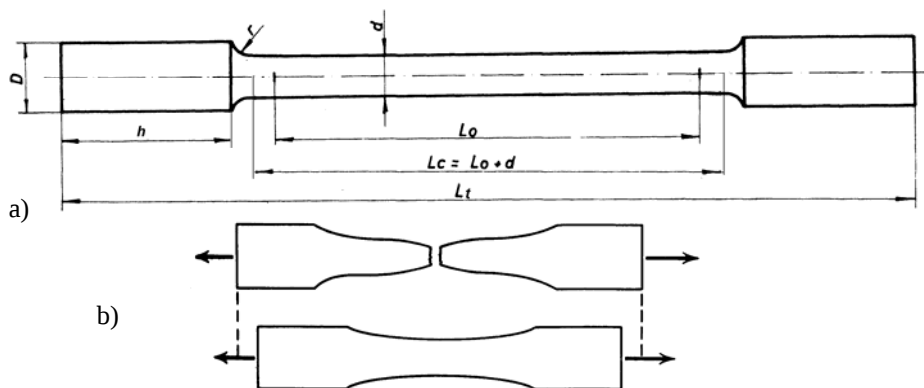


Slika 4.3. Krive zavisnosti modula elastičnosti E - temperature T , za neke metale

Pošto metali nemaju tako velike vrednosti čvrstoće, to znači da postoje drugi mehanizmi klizanja atoma u velikom realnom kristalu, koji sadrži veliku gustinu grešaka kristalne rešetke tj. veliku gustinu ivičnih dislokacija.

4.1.1. Statičke metode

Ispitivanje zatezanjem. Ispitivanje zatezanjem se izvodi na epruvetama određenog oblika i dimenzija koje su tokom ispitivanja izložene delovanju jednoosnog zateznog opterećenja u mašini za ispitivanje. Epruvete za ispitivanje zatezanjem mogu da budu proporcionalne i neproporcionalne (tehničke epruvete). Proporcionalne epruvete, kružnog (sl. 4.5 a), kvadratnog ili pravougaonog poprečnog preseka, imaju tačno definisani odnos merne dužine i poprečnog preseka. U zavisnosti od tog odnosa, epruvete su podeljene na duge i kratke, tab. 4.2.



Slika 4.5. Proporcionalna epruveta za ispitivanje zatezanjem a); Lokalizovanje deformacije na mestu loma b)

Kod proporcionalnih epruveta razlikuje se radna (početna merna) dužina - L_0 , dužina sa prelaznim radijusima $L_s = L_0 + 2d$ i ukupna dužina L_t , koja obuhvata i proširene delove epruvete, koji se nazivaju glave epruvete. Radni deo epruvete mora da bude veoma kvalitetno obrađen i najmanjeg je poprečnog preseka da bi se obezbedilo da do loma (prekida) epruvete dođe upravo u toj oblasti. Pre početka ispitivanja neophodno je izmeriti prečnik ili stranice epruvete kao i radnu dužinu, koju treba označiti i podeliti na 10 ili 20 jednakih podeoka da bi se merenje izduženja nakon ispitivanja obavilo što tačnije.

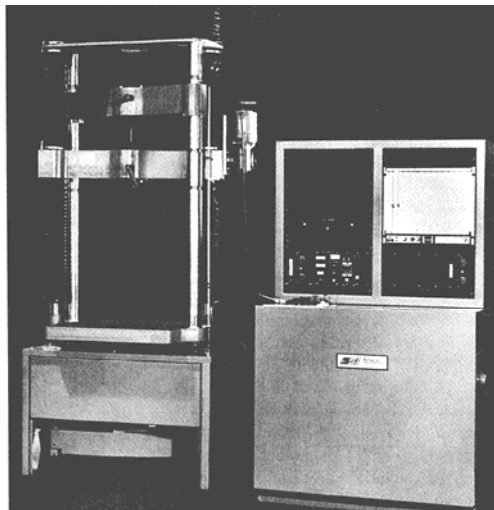
Tabela 4.2. Podela i opšte dimenzione karakteristike epruveta za ispitivanje zatezanjem

Vrsta epruvete	oblik poprečnog preseka	površina poprečnog preseka, S_0	koeficijent proporcionalnosti L_0 prema S_0	merna dužina, L_0
proporcionalna duga epruveta	kružni d	$(d)^2 \pi / 4$	10	$10d$
proporcionalna kratka epruveta	kružni d	$(d)^2 \pi / 4$	5	$5d$
proporcionalna duga epruveta	kvadratni, pravougaoni	a^2 $a b$	11,3	$11,3\sqrt{S_0}$
proporcionalna kratka epruveta	kvadratni, pravougaoni	a^2 $a b$	5,65	$5,65\sqrt{S_0}$
tehničke epruvete	bez posebne pripreme, nema definisanih odnosa površine i dužine epruvete, ispitivanje gotovih elemenata: žica, cevi, lanaca			

Ispitivanje zatezanjem se izvodi na univerzalnim mašinama za ispitivanje ili kidalica-ma sa hidrauličnim ili mehaničkim pogonom, slika 4.6. Osnovni delovi univerzalnih mašina su: uređaji za stvaranje, prenošenje i registrovanje sile, uređaj za merenje deformacija i uređaj za crtanje dijagrama sila – deformacija.

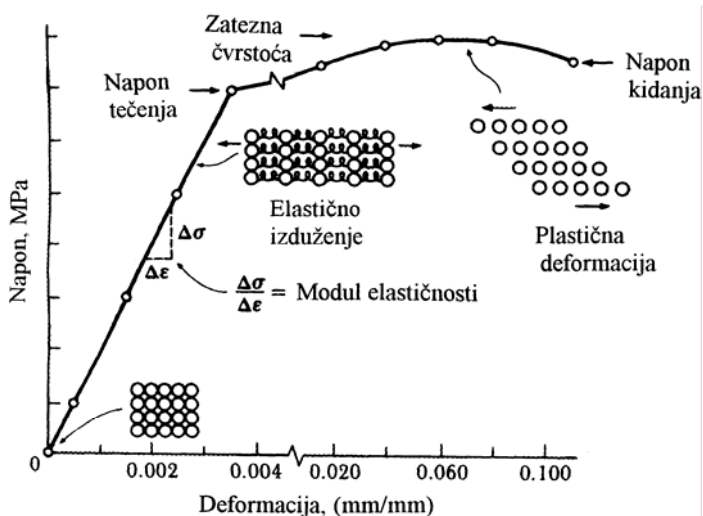
Glave epruvete se postavljaju u čeljusti mašine, s tim što je jedna čeljust, obično gornja, nepokretna, dok je donja čeljust pokretna. Kretanjem donje čeljusti na dole epruveta se zateže i opterećuje silom koja lagano raste sve dok ne dođe do loma. Sa porastom opterećenja epruveta se izdužuje, u početku proporcionalno (za isti priraštaj sile javlja se isti priraštaj u izduženju), dok je deformacija elastična. Nakon toga, posle daljeg, ne tako velikog, porasta opterećenja, deformacija materijala je još uvek elastična, ali više nije proporcionalna sili (naponu). Dalji porast opterećenja, pored elastičnih, proizvodi i plas-

tične deformacije. Pojava lokalizovane velike plastične deformacije prethodi lomu. Kada se površina poprečnog preseka na mestu velike plastične deformacije (suženja) toliko smanji da materijal više ne može da pruža otpor rastućem opterećenju, dolazi do loma epruvete, sl. 4.5b.

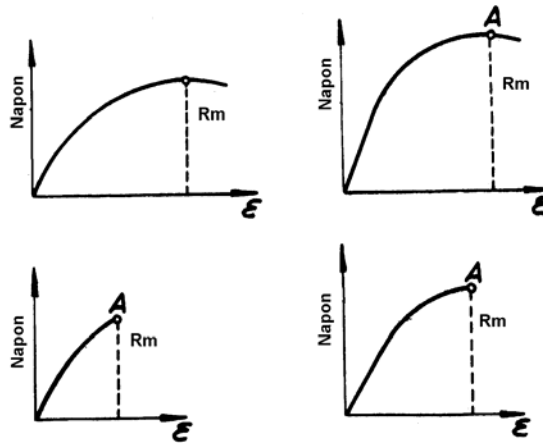


Slika 4.6. Kidalica sa hidrauličnim pogonom

Pomoću uređaja za crtanje dijagrama, koji istovremeno može da prati promenu sile i njom izazvane deformacije materijala, dobija se dijagram sila – izduženje (dijagram kidanja). Da bi se eliminisao uticaj dimenzija epruvete, pošto se mehaničke osobine menjaju sa njihovom promenom, uobičajeno je u praksi da se koristi dijagram napon – deformacija, koji za dati materijal izgleda isto kao i dijagram kidanja. Na sl. 4.7. je prikazan dijagram napon – deformacija za meki čelik, a na sl. 4.8. opšti izgled ovog dijagrama za većinu ostalih metalnih materijala. Na osnovu podataka očitanih sa dijagrama kidanja, podataka o polaznim dimenzijama epruvete i podataka o dimenzijama epruvete posle ispitivanja zatezanjem do loma, mogu da se izračunaju potrebna mehanička svojstva.



Slika 4.7. Dijagram napon – deformacija za meki čelik



Slika 4.8. Opšti tipovi dijagrama napon-deformacija

Cilj ispitivanja zatezanjem je određivanje svojstava otpornosti i svojstava deformacije materijala. U svojstva otpornosti materijala ubrajaju se granica tečenja, R_{eH} , zatezna čvrstoća, R_m i modul elastičnosti, E .

- zatezna čvrstoća, definisana kao $R_m = F_m/S_0$, gde je F_m najveća sila pri zatezanju epruvete, a S_0 prvobitni poprečni presek epruvete.
- granica (napon) tečenja, definisana kao $R_{eH} = F_{eH}/S_0$, gde je F_{eH} sila pri kojoj dolazi do primetne plastične deformacije.

Kod metalnih materijala kod kojih nije jasno izražena granica tečenja, određuje se tzv. uslovna granica tečenja, koja se označava kao $R_{0,2}$, a definiše kao $R_{0,2} = F_{0,2}/S_0$, gde je $F_{0,2}$ sila pri kojoj deformacija epruvete iznosi 0,2%. Sila $F_{0,2}$ se određuje na osnovu dijagrama sila-izduženje ili pomoću specijalnih uređaja za merenje malih deformacija—ekstenzometara.

Određivanje granice tečenja (stvarne ili uslovne) je izuzetno značajno zato što, jer s jedne strane, tokom eksploatacije mašinski deo/konstrukcija ne sme da bude izložen dejstvu napona koji je veći od granice tečenja (ne sme da dođe do plastičnog deformisanja materijala), a s druge strane pri proizvodnji plastičnim deformisanjem neophodno je da primenjeni napon bude veći od granice tečenja.

Pored navedenih svojstava otpornosti pri ispitivanju zatezanjem mogu da se odrede i:

- Granica elastičnosti, odnosno najveći napon pri kome su deformacije još uvek elastične;
- Granica proporcionalnosti, odnosno najveći napon pri kome još uvek postoji proporcionalnost između napona i jediničnog izduženja. U ovom području važi Hukov zakon linearno elastičnog ponašanja materijala.
- Modul elastičnosti, ili Jungov modul, koji predstavlja koeficijent pravca (nagib) u linearno elastičnom području dijagrama napon – deformacija, $E = \sigma/\epsilon$ (MPa), sl. 4.7. Modul elastičnosti je mera krutosti materijala - veći modul elastičnosti odgovara materijalu koji ima veću krutost.
- Trenutno izduženje, definisano kao $\Delta L = L_t - L_0$ (mm), gde je L_t trenutna dužina mernog dela epruvete;
- Jedinično izduženje, definisano kao $\epsilon = \Delta L/L_0$

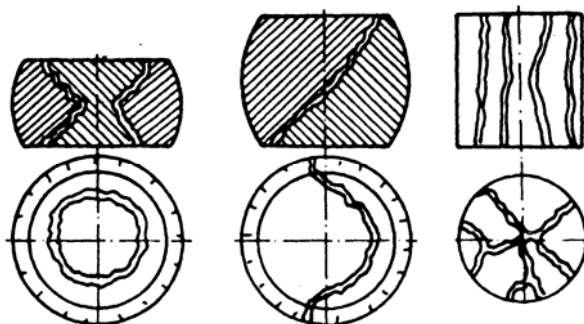
U svojstva deformacije se ubrajaju procentualno izduženje i suženje:

- Procentualno izduženje, definisano kao $A = [(L_u - L_o)/L_u] \cdot 100$, izraženo (%), gde je L_u dužina mernog dela epruvete posle kidanja, koja se meri na različite načine u zavisnosti od mesta gde je došlo do prekida. Ako je prekid nastao na sredini merne dužine, dužina epruvete posle prekida se određuje tako što se delovi prekinute epruvete sastave pa se zatim meri rastojanje između krajnjih, repernih oznaka. U slučaju da je do prekida epruvete došlo u jednoj od krajnjih trećina merne dužine primenjuje se postupak propisan standardom, a ako je prekid nastao pri samom kraju merne dužine epruvete ili izvan nje ispitivanje mora da se ponovi.
- procentualno suženje, definisano kao $Z = [(S_u - S_o)/S_o] \cdot 100$, izraženo u (%), gde je S_u površina poprečnog preseka epruvete na mestu prekida.

Ispitivanje na pritisak. Ovoj vrsti ispitivanja uglavnom podležu kruti materijali kao što su livena gvožđa, legure za izradu kliznih i kotrljajnih ležajeva, mesing, beton, kamen. Pod dejstvom sile pritiska dolazi do loma epruveta izrađenih od ovih materijala, što nije slučaj kod plastičnih materijala, koji se samo u većem ili manjem stepenu deformišu. Za ispitivanje na pritisak koriste se epruvete u obliku valjka ili paralelopipeda kvadratnog poprečnog preseka površine S_o . Epruveta se podvrgava dejstvu rastućeg pritisknog opterećenja na presama ili univerzalnim mašinama za ispitivanje. Sila pritiska se direktno očitava pri ispitivanju, a pomoću uređaja za crtanje dijagrama je moguće dobiti dijagram sila - skraćenje koji ima isti oblik kao i dijagram sila – izduženje. Karakteristične veličine koje se određuju pri ovom ispitivanju su:

- Granica gnječenja, R_{ceH} , definisana kao $R_{ceH} = F_{ceH}/S_o$, gde je F_{ceH} pritiska sila koja izaziva приметnu plastičnu deformaciju materijala. Pošto se ovako izražena granica gnječenja javlja kod malog broja materijala, obično se određuje tehnička granica gnječenja, $R_{c0,2} = F_{c0,2}/S_o$ gde je $F_{c0,2}$ pritiska sila koja izaziva trajnu deformaciju od 0,2%.
- Pritisna čvrstoća, R_{cm} , definisana kao $R_{cm} = F_{cm}/S_o$, gde je F_{cm} najveća pritiska sila. Kod žilavih materijala, kod kojih pri ispitivanju ne dolazi do loma, pritiska čvrstoća ne može da se odredi.
- Skraćenje, ΔL_u , predstavlja razliku između početne dužine epruvete (L_o) i dužine epruvete na kraju ispitivanja (L_u): $\Delta L_u = L_o - L_u$ (mm);
- Jedinično skraćenje, ε_c , se dobija kada se skraćenje podeli sa početnom dužinom epruvete, $\varepsilon_c = \Delta L_u/L_o$;
- Raširenje, Z_c , definisano kao $Z_c = [(S_u - S_o)/S_o] \cdot 100$ (%), gde je S_u površina poprečnog preseka epruvete posle završenog ispitivanja.

Izgled epruveta posle ispitivanja na pritisak krutih materijala kod kojih se javlja lom je šematski prikazan na sl. 4.9.



Slika 4.9. Šematski prikaz loma epruveta pri ispitivanju na pritisak

Ispitivanje tvrdoće. Tvrdoća je mehaničko svojstvo materijala za koje još uvek ne postoji jedinstvena definicija. Uobičajeno se definiše kao otpor koji materijal pruža pri prodiranju tvrdog tela (utiskivača) kroz njegovu površinu, ali postoje i druge definicije. Najčešće se određivanje tvrdoće materijala zasniva na:

- Merenju otpora prodiranju tvrdog tela u površinu ispitivanog metala (Brinelova, Vikersova, Rokvelova i Knupova metoda).
- Merenju elastičnih osobina površine metala posredno preko elastičnog sudara tvrdog tela sa površinom metala (Šorova - skleroskopska metoda, i Kirnerova - duroskopska metoda).

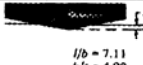
Metoda po Brinelu

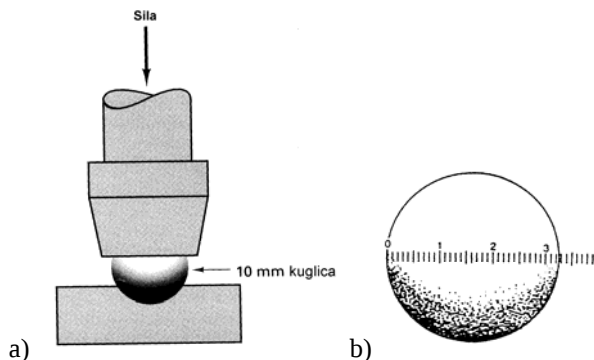
Postupak ispitivanja po Brinelovoj metodi se sastoji u utiskivanju čelične kuglice prečnika $D = 10$ mm u prethodno pripremljenu površinu uzorka silom F (N). Utiskivanje čelične kuglice se odvija u tri faze - u prvoj fazi se sila lagano, statički, povećava do maksimalne vrednosti, da bi u drugoj fazi materijal bio izložen dejstvu maksimalne sile u toku određenog vremena. U trećoj fazi ispitivanja uzorak se rasterećenje. Posle rasterećenja, u površinskim slojevima ispitivanog materijala ostaje otisak oblika kalote, a na površini se vidi krug, tab. 4.3.

Šematski prikaz faze utiskivanja i površinski izgled otiska je prikazana na sl. 4.10.

Pokazatelj tvrdoće pri ovom ispitivanju, koji se označava sa HB, je broj koji se dobija kada se vrednost sile utiskivanja, izražene u daN, podeli sa površinom otiska (mm^2). Sve veličine bitne za određivanje tvrdoće po Brinelovoj metodi su standardizovane, što znači da su svi parametri kao što su veličina kuglice, sila utiskivanja, vreme utiskivanja, pripremljenost površine i način merenja otiska definisani po standardu.

Tabela 4.3. Osnovne karakteristike metoda ispitivanje tvrdoće

Naziv metode	Utiskivač	Oblik utiskivača		Opterećenje	Obrazac za izračunavanje vrednosti tvrdoće
		Pogled sa strane	Pogled odozgo		
Brinelova	Kuglica od čelika ili tvrdog metala prečnika 1, 2, 2,5, 5 i 10 mm			P	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vikersova	Dijamantska piramida			P	$HV = 1.72 \frac{P}{d_1^2}$
Mikrotvrdoća po Knupu	Dijamantska piramida			P	$HK = 14.2 \frac{P}{l^2}$
Rokvelova					
A	Dijamantska kupa			60 kg	HRA= } HRC= } 100 – 500t HRD= }
C				150 kg	
D				100 kg	
B	Čelična kuglica prečnika 1/16in			100 kg	HRB= } HRF= } 130 – 500t HRG= }
F				60 kg	
G				150 kg	
E	Čelična kuglica prečnika 1/8in			100 kg	HRE= }



Slika 4.10. Šematski prikaz utiskivanja (a) i površinski izgled otiska (b)

Kuglica od čelika ili tvrdog metala treba da bude prečnika $D = 10$ mm, ali pored ove veličine dozvoljena su i kuglice prečnika 5 i 2,5 mm, a ređe i od 2 i 1 mm. Izbor veličine kuglice zavisi od debljine materijala koja se ispituje, jer po pravilu debljina materijala treba da bude dovoljna da se ne pojavi, posle utiskivanja, deformacija sa druge strane uzorka.

Izbor sile takođe zavisi od vrste materijala koji se ispituje (po pravilu, mekši materijali se ispituju manjom silom, odnosno tvrdi materijali većom silom) i od prethodno izabrane veličine kuglice, tab. 4.4.

Tabela 4.4: Izbor veličina sile za Brinelovu metodu

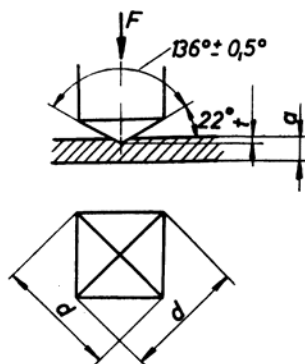
Vrsta materijala	Veličina sile
Sivi liv i čelik	$30 D^2$
Sivi liv i tvrde legure bakra	$10 D^2$
Meke legure Cu, Al i legura za ležišta	$5 D^2$
Beli metali i meke legure	$2,5 D^2$
Olovo i meke legure	D^2

Vreme delovanja sile takođe zavisi od tvrdoće materijala - za tvrde materijale iznosi 10-15 s, a za meke 30 s pa do 3 min. Radi tačnog očitavanja otiska i otklanjanja uticaja površinskih slojeva, površina materijala koji se ispituje treba da bude pripremljena finim brušenjem. Određivanje površine otiska oblika kalote je svedeno na određivanje površine kruga koji se vidi na površini ispitivanog materijala, odnosno merenja prečnika kruga, d , pomoću uređaja na aparatu za određivanje tvrdoće, sl. 4.10b. Merenje se izvodi u dva međusobno normalna položaja, tako da se vrednost prečnika kruga koja se koristi za izračunavanje tvrdoće dobija kao srednja vrednost dva merenja, $d = (d_1 + d_2)/2$ sa tačnošću očitavanja od $\pm 0,25\%$. Tvrdoća po Brinelu se izračunava primenom obrasca koji je dat u tab. 4.3.

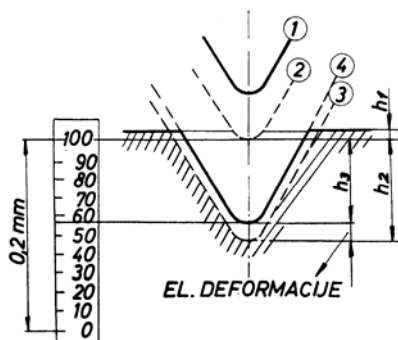
Metoda po Vickersu

Pokazatelj tvrdoće pri ovom ispitivanju, koji se označava sa HV, je broj koji se dobija kada se vrednost sile utiskivanja (daN) podeli sa površinom nastalog otiska (mm^2). Vickersova metoda se primenjuje na isti način kao Brinelova, u 3 opisane faze. Metoda po Vickersu se koristi za merenje tvrdoće svih vrsta materijala i svih debljina, uključujući i veoma tanke limove, kao i za merenje mikrotvrdoće (tvrdoća pojedinih strukturnih faza

ili pojedinačnih kristalnih zrna). Kao utiskivač se koristi dijamantska piramida kvadratne osnove, sa uglom naspramnih strana od 136° (sl. 4.11. i tab. 4.3.) i opsegom sila od 5–100 daN. Izbor veličine sile zavisi od tvrdoće i debljine ispitivanog materijala. Faze utiskivanja utiskivača su iste kao i kod Brinelove metode. Na površini ispitivanog materijala, posle rasterećenja, ostaje otisak oblika kvadrata. Da bi se izračunala površina otiska dovoljno je izmeriti dijagonale kvadrata, d_1 i d_2 i naći njihovu srednju vrednost. Primenom odgovarajućeg obrasca, Tabela 4.3, izračunava se tvrdoća materijala po Vickersovoj metodi.



Slika 4.11. Utiskivač i otisak po Vickersovoj metodi



Slika 4.12. Faze utiskivanja kod Rokvel C metode

Metoda po Rokvelu

Kod metode merenja tvrdoće po Rokvelu, kao utiskivač se najčešće koristi mala čelična kuglica prečnika 1/16 inča (inč $\approx 25,4$ mm), odnosno 1/8-in za meke materijale (HRB metoda), ili dijamantski konus sa uglom pri vrhu od 120° za veoma tvrde materijale (HRC metoda). Mera tvrdoće po ovoj metodi je trajna dubina otiska (samo veličina plastične deformacije), a veličina tvrdoće se direktno očitava na skali aparata za merenje tvrdoće. Metoda merenja tvrdoće po Rokvelu ima više varijanti u zavisnosti od oblika utiskivača i sile utiskivanja, Tabela 4.3. Utiskivanje, nezavisno od varijante metode, se izvodi u tri faze, sl. 4.12.

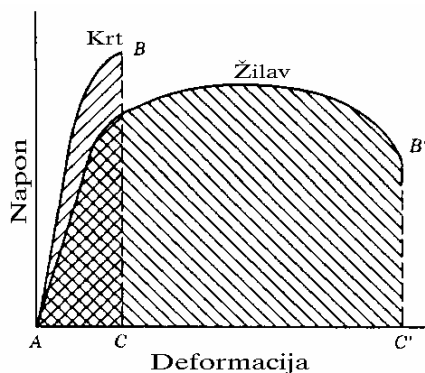
U prvoj fazi deluje se na materijal silom od 10 daN, pri čemu utiskivač prodire do neke dubine h_0 . Ova faza merenja se izvodi da bi se eliminisao uticaj površinskih slojeva materijala, jer po ovoj metodi nije neophodna priprema površine dela koji se ispituje. U drugoj fazi se na materijal deluje glavnom silom koja u slučaju HRB varijante iznosi 90 daN, odnosno 140 daN za HRC varijantu. Utiskivač pri tome prodire u materijal do neke dubine h_1 koja zavisi od elastičnih i plastičnih karakteristika materijala. U trećoj fazi ispitivanja se vrši rasterećenje, pri čemu se utiskivač pomera do neke dubine h_2 koja je manja od dubine h_1 za veličinu elastičnih deformacija materijala koje po prestanku dejstva sile nestaju. Meru tvrdoće predstavlja trajna dubina otiska h_2-h_0 , koja se izražava u HRB ili HRC jedinicama.

4.1.2. Dinamička ispitivanja

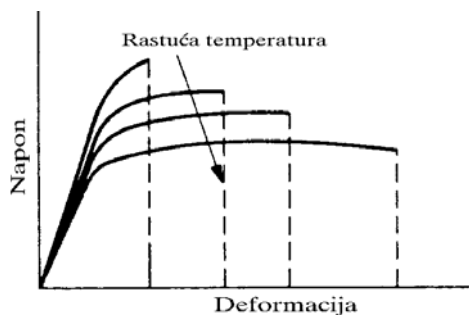
Žilavost

Žilavost materijala, pri statičkom opterećenju je važno svojstvo metala i legura, koje često određuje njihovu pogodnost za mnoge primene. To je u stvari mera sposobnosti materijala da apsorbuje energiju do tačke loma. Pri ispitivanju zatežućom silom žilavost može biti određena površinom ispod krive *napon - izduženje* i predstavlja količinu apsorbirane energije po jedinici zapremine materijala (J/m^3). Što je ta površina veća, veća je i žilavost. Žilav materijal mora pokazivati dobru čvrstoću i plastičnost. Metali i legure koji imaju dobru plastičnost pokazuju veću žilavost u odnosu na krte. Krte materijali i pored visoke vrednosti zatezne čvrstoće, ali zbog male plastičnosti, imaju manju žilavost. Ovo se može zaključiti upoređivanjem površina ispod krivih *napon - izduženje*, jednog krtog i jednog plastičnog materijala, slika 4.13.

Sa porastom temperature kod metala i legura dolazi do značajnih promena na krivoj *napon - izduženje* (sl. 4.14.): plastičnost i žilavost rastu, dok napon tečenja, zatezna čvrstoća i modul elastičnosti opadaju. Temperatura ima uticaja i na eksponent ojačanja n , koji za mnoge metale sa porastom temperature opada. Ove promene svojstava metala nastale sa promenom temperature naročito se koriste pri obradi metala plastičnom deformacijom (plastična deformacija u toplom stanju) kako bi se iskoristio efekat veće plastičnosti i nižeg potrebnog napona za deformaciju.

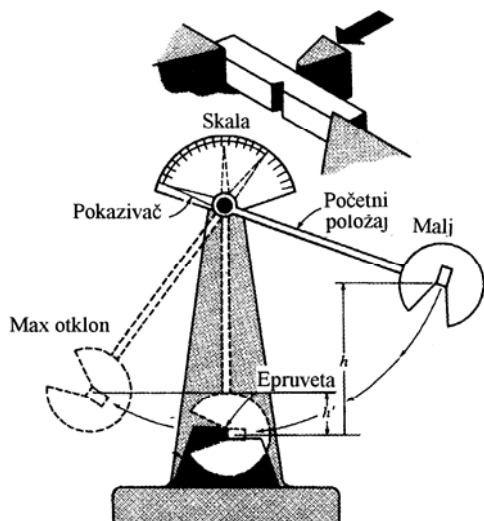


Slika 4.13. Šematski prikaz krivih *napon - izduženje* za krte i plastičan materijal

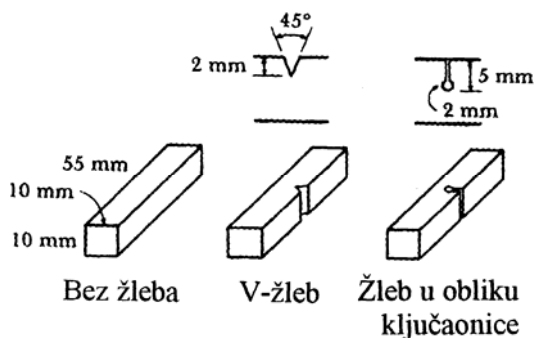


Slika 4.14. Uticaj temperature na krive *napon - izduženje*

Ispitivanje udarne žilavosti. Kada je potrebno da se izabere materijal koji može da izdrži iznenadne udare, neophodno je da se odredi njegova otpornost prema lomu postupkom koji je poznat kao ispitivanje udarne žilavosti. Najpoznatija metoda kojom se određuje udarna žilavost je metoda po Šarpiju, sl. 4.15. Epruveta za ispitivanje je prizmatičnog oblika, dužine 55 mm, kvadratnog poprečnog preseka 10x10 mm. Najčešće se koriste epruvete sa zarezom koji može da bude različitog oblika, U, V ili oblika ključaonice, sl. 4.16.



Slika 4.15. Šarpijevo klatno

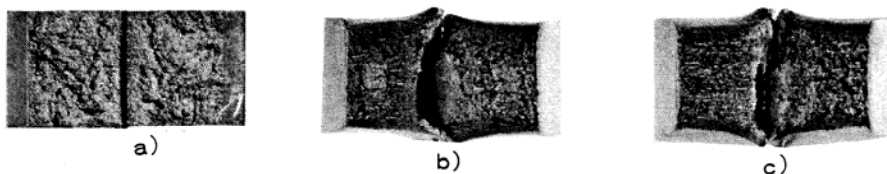


Slika 4.16. Epruvete za ispitivanje žilavosti

Ispitivanje se izvodi na uređaju koje je poznato kao Šarpijevo klatno, koje se sastoji od klatna sa maljem koje je oslonjeno na jednom kraju i postolja sa osloncima na koje se stavlja epruveta. Klatno se izvodi iz ravnotežnog položaja za određeni otklon (do neke visine h_1) a zatim pušta da slobodno pada. Šarpijevo klatno prolazi kroz ravnotežni položaj i nastavlja da se kreće na drugu stranu sa otklonom koji odgovara visini, h_1 . Potencijalna energija klatna u krajnjim položajima je ista, $E_1 = mgh_1$. Kada se na put klatna u ravnotežnom položaju postavi prepreka - epruveta, klatno će da udari u nju, polomi je i nastavi da se kreće na drugu stranu, ali sa manjim otklonom, h_2 . Pri postavljanju epruvete treba voditi računa da zarez bude okrenut na suprotnu stranu od one u koju udara klatno.

Potencijalna energija klatna u krajnjim položajima pre i posle udara više nije ista, zato što se deo energije klatna utrošio na lom epruvete. Ako su poznate visine otklona pre i posle udara, h_1 i h_2 , može da se izračuna razlika potencijalnih energija, $\Delta E = E_1 - E_2 = mg(h_1 - h_2)$. Ova razlika predstavlja energiju udara koju je apsorbovala epruveta tokom loma i meru žilavosti materijala. Stoga je jedinica žilavosti Džul (J), a označava se sa KU ili KV u zavisnosti od oblika zareza.

Ispitivanja su pokazala da se apsorbovana energija udara za jedan isti materijal razlikuje u zavisnosti od temperature na kojoj je ispitivanje izvedeno - na povišenim temperaturama apsorbovana energija je velika, na niskim temperaturama apsorbovana energija je mala. Kada je apsorbovana energija udara velika, onda to znači da je materijal pružio veliki otpor lomu, kome je prethodila značajna plastična deformacija, pa se kaže da je *lom žilav*, sl. 4.17c. Mala apsorbovana energija udara znači da je otpor materijala ka lomu mali, plastične deformacije pre loma nema, a *lom je krt*, sl. 4.17a. Kombinacija žilavog i krtog loma je mešoviti lom sl. 4.17b.

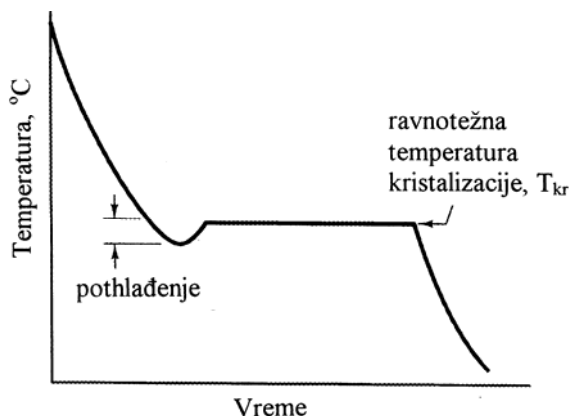


Slika 4.17. Izgled prelomne površine Šarpijeve epruvete a) krti lom; b) mešoviti lom; c) žilav lom

4.2. KRISTALIZACIJA METALA

Prelaz metala iz tečnog u čvrsto (kristalno) stanje se naziva **kristalizacija** ili očvršćavanje. Tokom kristalizacije raspored atoma se menja i iz približno sredenog stanja prelazi u potpuno sredeno stanje karakteristično za kristalnu strukturu.

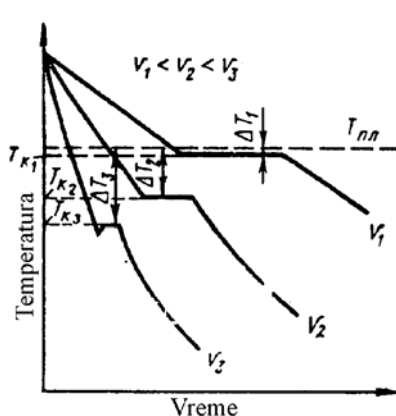
Do kristalizacije dolazi usled težnje materijala da zbog sniženja temperature pređe u energetski povoljnije stanje. Proces kristalizacije može da se prikaže krivom u koordinatnom sistemu temperatura vreme, sl. 4.3, koja je poznata kao **kriva hlađenja**. Temperatura do koje treba da se ohladi tečna faza da bi došlo do kristalizacije se naziva *temperaturom kristalizacije*, T_k (kada je u pitanju obrnut proces, prelazak čvrstog stanja u tečno, temperatura je označena kao temperatura topljenja, T_l). Na temperaturi kristalizacije, odnosno temperaturi topljenja, koje su u idealnom slučaju jednake ($T_k = T_l$), tečna i čvrsta faza su okarakterisane istom slobodnom energijom.



Slika 4.3. Kriva hlađenja čistog metala

U stvarnosti, proces kristalizacije se odvija samo onda kada postoji razlika u slobodnoj energiji čvrste i tečne faze na takav način da slobodna energija čvrste faze postane niža od slobodne energije tečne faze. To može da se postigne onda kada je tečnost ohlađena ispod temperature t_{kr} . Temperaturska razlika između idealne temperature kristalizacije t_{kr} i temperature na kojoj se obrazuju prve klice čvrste faze koje dalje mogu da rastu se naziva **stepen pothlađenja**.

Na krivoj hlađenja prikazanoj na slici 2.3.7 na temperaturi kristalizacije primećuje se jedan zastoj u promeni temperature i pored toga što proces hlađenja traje. Ovo se objašnjava uticajem latentne toplote kristalizacije.

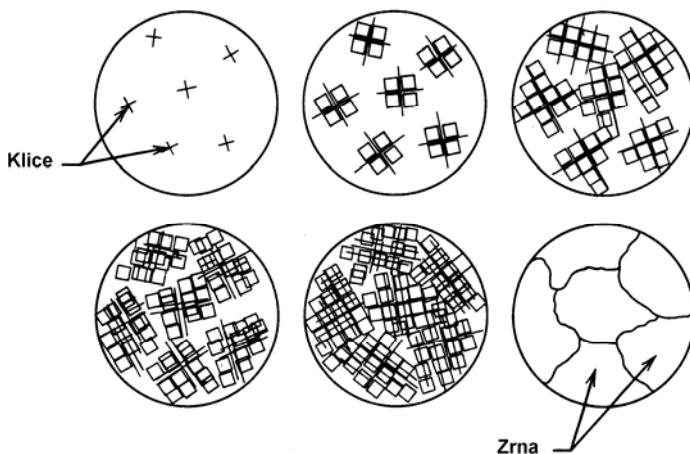


Slika 2.3.7 Kriva hlađenja pri kristalizaciji čvrstog tela

Sa povećanjem brzine hlađenja v povećava se stepen pothlađivanja ΔT . Pri vrlo velikim brzinama hlađenja moguće je dobiti *amorfnu strukturu metala*.

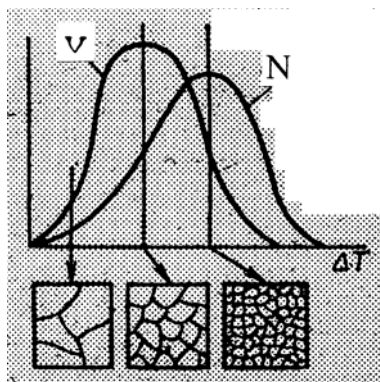
Proces kristalizacije u kome se obrazuju kristalna zrna (kristaliti) se odvija u dva koraka: u prvom koraku dolazi do nukleacije, odnosno obrazovanja stabilnih klica čvrste faze koje u drugom koraku rastu na račun "taloženja" atoma iz tečne faze, s tim što se proces odvija sve dok ne nestane tečna faza, sl. 4.4. Obrazovanje klica može da se javi kao spontani proces pri većim stepenima pothlađenja ili na česticama primesa koje se nalaze u tečnoj fazi, u kom slučaju se kristalizacija odvija pri neznatnom pothlađenju.

Rast kristalnih zrna se odvija tako da se za klicu vezuju stalno novi atomi tečnog metala. U početku, kristaliti rastu slobodno zadržavajući pravilan geometrijski oblik i to se dešava sve do momenta dok se kristali ne susretnu. Na mestu kontakta dva kristalita koja rastu, dolazi do poremećaja u pravilnom raspoređivanju atoma. Oblast sa poremećenim rasporedom atoma, zajednička za dva ili tri kristalna zrna koja su srasla, se naziva **granicom zrna**. Za metal koji se sastoji od velikog broja kristalita koji su međusobno povezani granicama zrna i koji su smešteni pod međusobno različitim uglovima se kaže da ima **polikristalnu** strukturu.



Slika 4.4. Šematski prikaz procesa kristalizacije

Veličina zrna zavisi od broja centara za kristalizaciju (N) i brzine rasta kristala (V), sl. 4.5. Što se veći broj centara za kristalizaciju obrazuje, utoliko će u posmatranoj zapremini da se nađe veći broj sitnih kristalnih zrna i obrnuto. Ako se inicijalno stvori mali broj centara za kristalizaciju, broj zrna po završetku kristalizacije će da bude mali ali će zrna da budu krupna. Na broj centara za kristalizaciju koji će da se obrazuje utiče i stepen pothlađenja. Što je stepen pothlađenja veći, to će da se stvori i veći broj centara za kristalizaciju, odnosno dobiće se sitnije kristalno zrno.



Slika 4.5. Zavisnost veličine zrna od broja centara kristalizacije (N) i brzine rasta kristala (V)

Veličina zrna utiče na mehaničke osobine metalnih materijala - čvrstoća, plastičnost i žilavost materijala su povećavaju sa smanjenjem veličine zrnima. Da bi se dobilo sitno zrno pri kristalizaciji se koriste tzv. modifikatori, veoma sitne čestice teško topljivih materijala koje služe kao dopunski centri za kristalizaciju.

Stepen pothlađenja ne utiče samo na broj centara za kristalizaciju i veličinu nastalih zrna, već i na njihov oblik. U slučaju veoma malih stepena pothlađenja obrazuju se kristali pravilnih geometrijskih oblika – poligonalna zrna, sl. 4.6a. Međutim, kada je stepen pothlađenja veliki, obrazuju se kristali drugačijih oblika, među njima i tzv. dendritni oblik, sl. 4.6b. Za nastanak dendritnog oblika kristalnog zrna je karakteristično da se rast klica za kristalizaciju odvija neravnomernom brzinom.



Slika 4.6. Izgled kristalnih zrna: a) poligonalna zrna; b) dendrit

GREŠKE

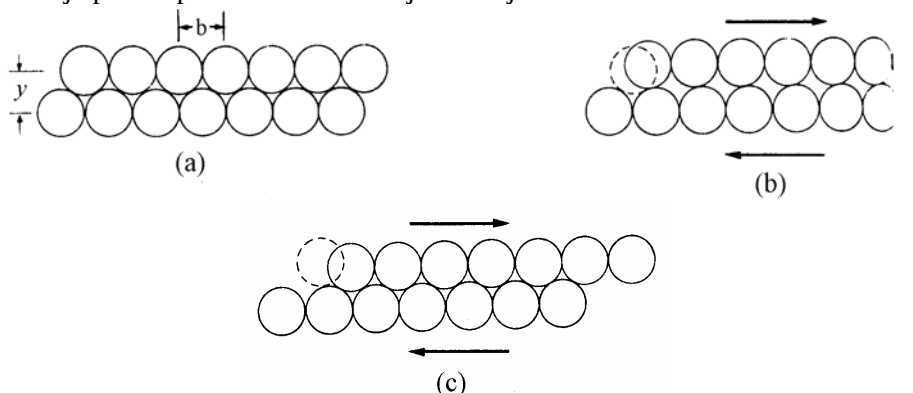
Plastične deformacije kristala

Ako sila kojom smo opteretili kristalnu strukturu dovoljno poraste, kristal će se plastično - trajno deformisati, a to znači da se neće vratiti na početni oblik i dimenzije po prestanku dejstva sile. Plastično deformisana kristalna struktura metala je nepovratno promenjena, a samim tim i njegova svojstva.

Postoje dva mehanizma po kojima se odvija plastična deformacija kristalne strukture:

- klizanjem i
- dvojnikanjem.

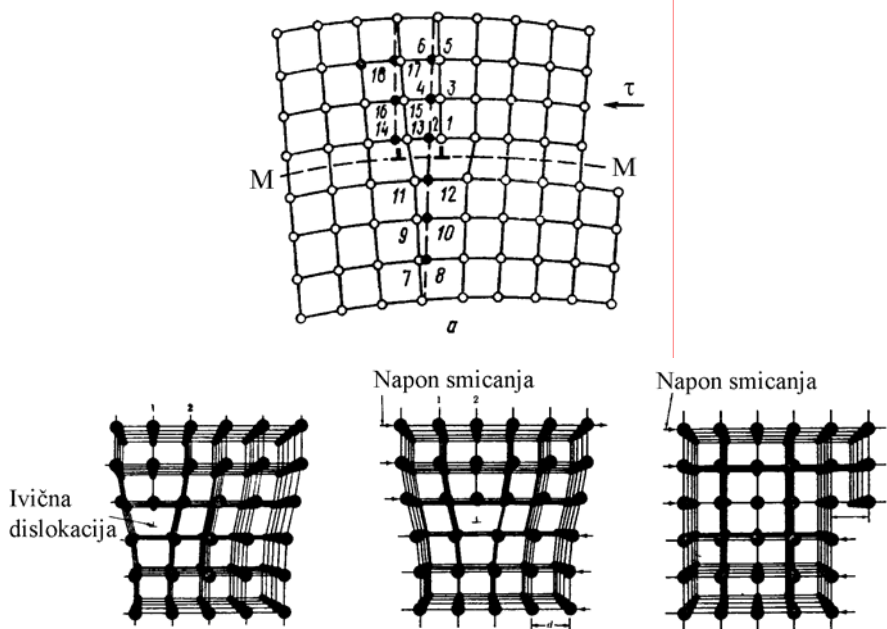
Plastična deformacija kristala klizanjem. Pretpostavljeni uprošćeni model plastične deformacije jednog idealnog kristala klizanjem, prikazan je na sl. 2.3.14; jedna ravan atoma klizi po drugoj susednoj ravni. Međutim, za ovakav model plastične deformacije klizanjem idealnog kristala, bilo bi potrebno ostvariti napone smicanja koji su za stotinu, ili čak i nekoliko hiljada puta veći, od napona smicanja pri kojima se kod realnih kristala metala odvija proces plastične deformacije klizanjem.



Slika 2.3.14. Pretpostavljeni model plastične deformacije kristala klizanjem

Ako bismo na bazi ovako pojednostavljenog modela plastične deformacije klizanjem pokušali da izračunamo čvrstoću metala, dobili bismo da čvrstoća metala iznosi približno oko $0,15G$ (teorijski izračunato), gde je G modul klizanja. Pošto metali nemaju tako velike vrednosti čvrstoće, to znači da postoje drugi mehanizmi klizanja atoma u velikom realnom kristalu, koji sadrži veliku gustinu grešaka kristalne rešetke tj. veliku gustinu ivičnih dislokacija.

Eksperimenti su pokazali da se mehanizam po kojem se obavlja klizanje, ostvaruje kao *rezultat kretanja ivičnih dislokacija u kristalu pod dejstvom sila smicanja duž ravni klizanja*. Atomi u blizini dislokacije premeštaju se s desna u levo i to za dužine (1-2; 3-4; 5-6; 7-8; 9-10; 11-12; 13-14; 15-16; 17-18), koje su znatno manje od jednog međuatomskog rastojanja, kako je to pokazano na sl. 2.3.15a. Za ovakav mehanizam klizanja za jednu manju grupu atoma potrebna je znatno manja vrednost napona smicanja koji iznosi približno (10^{-4} do 10^{-5}) G .



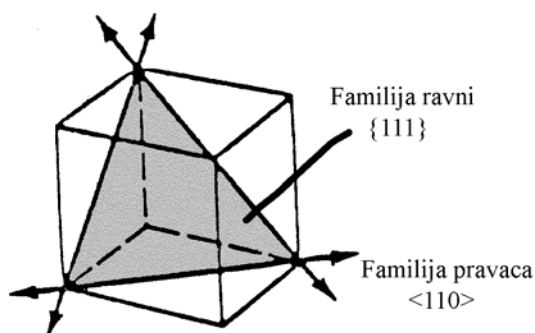
Slika 2.3.15. Kretanje ivične dislokacije: (a) šematski prikaz kretanja dislokacije, (b) faze kretanja dislokacija i njihov izlaz na površinu.

Kretanje dislokacija u ravni klizanja kroz ceo kristal dovodi do pomeranja jednog dela kristala na desno, iznad ravni klizanja, za jedno međuatomsko rastojanje, pri čemu će se na površini kristala obrazovati stepenica (sl. 2.3.15b). Kretanje dislokacija, obrazovanih u procesu kristalizacije (približno 10^6 cm^{-2}), uzrokuje ograničeni stepen deformacije. Međutim, veći stepen deformacije kristala je moguć, jer se kretanjem postojećih dislokacija utiče na pojavu velikog broja novih dislokacija u procesu obrade plastičnom deformacijom (približno 10^{12} cm^{-2}).

Sistemi klizanja. Dislokacije se neće kretati sa istom lakoćom po svim kristalografskim ravnima ni u svim kristalografskim pravcima. Klizanje u kristalnoj rešetki, odnosno kretanje dislokacija odvija se po određenim ravnima klizanja i pravcima klizanja. Ravni klizanja su obično ravni sa najvećom gustinom pakovanja atoma, jer je potreban najmanji napon smicanja za pomeranje atoma. One imaju i najveće rastojanje od susedne ravni, a tada su međuatomske sile veze najmanje. Pravci klizanja su pravci sa najvećom gustinom pakovanja, jer tada su atomi bliski jedan drugom, pa je potrebna najmanja energija za njihovo kretanje.

Ravni klizanja i pravci klizanja koji leže u tim ravnima obrazuju *sisteme klizanja*. Klizanje kod kristalnih rešetki kristala može se dešavati u više sistema koji su karakteristični za svaku kristalnu rešetku.

Kod metala sa KPC rešetkom (γ -Fe, Cu, Al, Ni, Pb, Ag, Au) klizanje se odvija po gusto pakovanim ravnima oktaedra $\{111\}$ i po gusto pakovanim pravcima dijagonalama strane kuba $\langle 110 \rangle$. Kako KPC rešetka ima samo četiri različite ravni (111) i svaka ravan sadrži tri pravca $[110]$, to postoje: $4 \text{ ravni} \times 3 \text{ pravca} = 12 \text{ sistema klizanja}$ (sl. 2.3.16).



Slika 2.3.16. Sistemi klizanja kod KPC rešetke

Kod metala sa KZC rešetkom (α -Fe, Mo, W) najveća gustina pakovanja atoma je u ravni $\{110\}$, dok su pravci klizanja uvek u pravcu dijagonale kuba $\langle 111 \rangle$. Kako KZC rešetka nije gusto pakovana atomima po ravnima kao kod KPC, to će za klizanje biti potrebno mnogo veći naponi smicanja. Kod metala (Zn, Cd) sa HGP rešetkom čiji je odnos c/a veći, ravni gusto pakovane atomima su osnove $\{0001\}$, a pravci $\langle 1120 \rangle$.

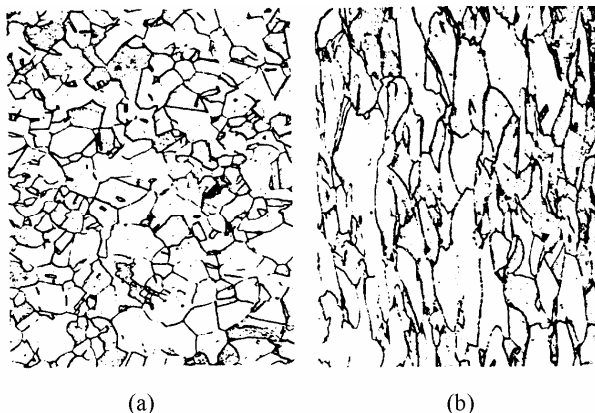
Što je kod kristala metala veći broj sistema klizanja, to je i njihova sposobnost plastične deformacije veća. Metali sa KPC rešetkom imaju 12 sistema klizanja i potrebni su mali naponi smicanja da bi se ostvarilo klizanje. Metali koji kristališu po ovom tipu rešetke imaju dobru sposobnost obrade plastičnom deformacijom, ali i ograničenu čvrstoću.

Metali sa KZC rešetkom imaju 48 mogućih sistema klizanja, pa i veliku verovatnoću da će primenjeni naponi smicanja prouzrokovati klizanje bar po jednom sistemu klizanja. Kako je za ostvarivanje klizanja kod ovog tipa rešetke potreban veći napon smicanja, to metali sa ovim tipom rešetke i pored velikog broja sistema klizanja imaju ograničenu sposobnost obrade plastičnom deformacijom, ali zato poseduju dobru čvrstoću.

Metali sa HGP rešetkom imaju 12 mogućih sistema klizanja i malu verovatnoću da će doći do klizanja. Međutim, na povišenim temperaturama veći broj sistema klizanja, kod ovog tipa rešetke, postaje aktivan. Metali sa ovim tipom rešetke teže se obrađuju plastičnom deformacijom na sobnoj temperaturi i uglavnom su krti.

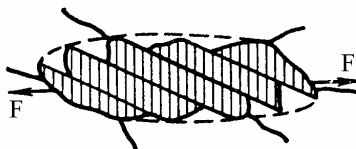
Plastična deformacija polikristalnih materijala

Plastična deformacija polikristalnih materijala protiče analogno deformaciji kristala klizanjem, ali je proces znatno složeniji. Razlog ovome je što se polikristalni materijal sastoji od velikog broja kristala – metalnih zrna različito orijentisanih. Plastična deformacija polikristalnih metala izvodi se klizanjem svakog posebnog metalnog zrna, a kako su metalna zrna različito orijentisana, plastična deformacija se ne izvodi istovremeno i jednako po celoj zapremini. Deformisana metalna zrna kao rezultat ukupne plastične deformacije polikristalnog materijala prikazana su na sl. 2.3.18.



Slika 2.3.18 Upoređenje izgleda metalnog zrna polikristalnog materijala, pre i posle plastične deformacije

Pre plastične deformacije metalna zrna su imala poligonalni oblik, približno iste dimenzije u svim pravcima. Posle pojedinačne deformacije svakog metalnog zrna ona menjaju oblik i postaju izdužena u pravcu dejstva sile obrazujući orijentisanu ili vlaknastu strukturu. Jednovremeno sa izmenom oblika zrna, unutar metalnog zrna formiraju se subzrna, sa većim uglom razorijentisanosti među njima (sl. 2.3.19).



Slika 2.3.19. Izmena oblika metalnog zrna, kao rezultat klizanja