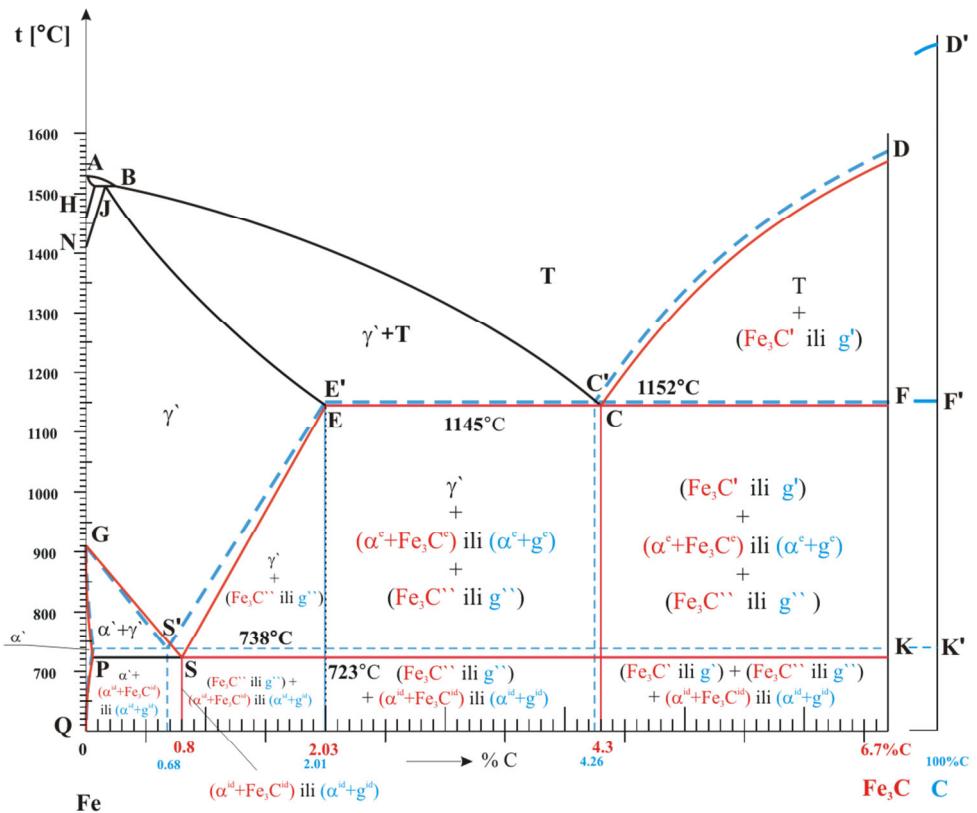


# MATERIJALI I



Igor Gabrić

Slaven Šitić



# SADRŽAJ

<b>1 GRADA MATERIJALA</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Atom</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Vezivanje atoma</b>	<b>18</b>
1.2.1 Atomska veza	19
1.2.2 Ionska veza	19
1.2.3 Metalna veza	19
1.2.4 Vodikova veza	20
1.2.5 Van der Waals-ova veza	20
<b>1.3 Strukture tvari</b>	<b>21</b>
1.3.1 Amorfne strukture	21
1.3.2 Kristalna struktura	22
1.3.3 Geometrijske karakteristike kristalne rešetke	23
1.3.4 Usmjerenost svojstava kristalnih rešetki	26
<b>2 NEPRAVILNOSTI KRISTALNIH REŠETKI</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Lokalne (točkaste nepravilnosti)</b>	<b>27</b>
<b>2.2 Linearne nepravilnosti-dislokacije</b>	<b>29</b>
<b>2.3 Plošne nepravilnosti</b>	<b>30</b>
<b>3 DEFORMACIJA I LOM METALA</b>	<b>1</b>
<b>3.1 Deformacija metala</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Lom materijala</b>	<b>36</b>
<b>4 SKRUĆIVANJE METALA</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Pojave pri skrućivanju čistih metala</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Promjene u krutnini</b>	<b>39</b>
<b>5 LEGURE</b>	<b>41</b>
<b>5.1 Faze u legurama</b>	<b>41</b>
5.1.1 Krute otopine-mješanci	41
5.1.2 Zamjenski mješanci	41
5.1.3 Uključinski mješanci	42
<b>5.2 Kristali intermetalnih i kemijskih spojeva</b>	<b>42</b>
<b>5.3 Mehaničke smjese kristala</b>	<b>42</b>

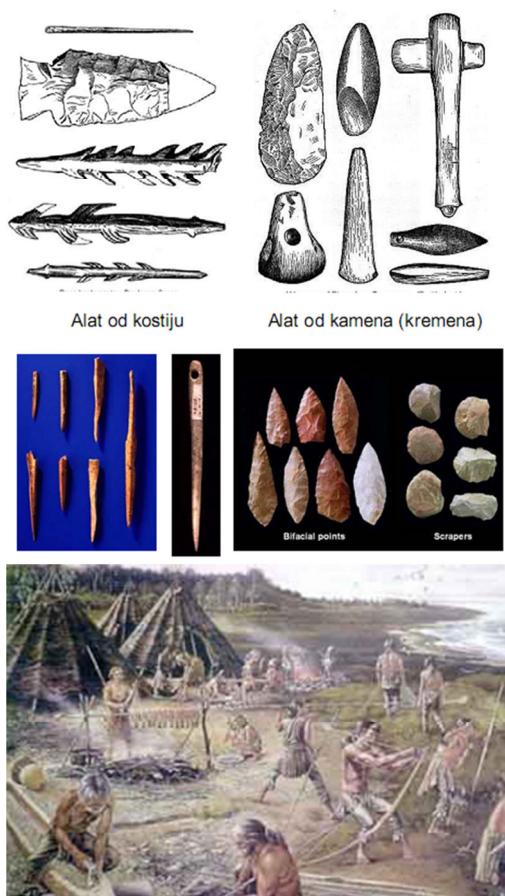
<b>5.4 Skrućivanje legura</b>	<b>43</b>
5.4.1 Dijagrami slijevanja dvokomponentnih legura	44
<b>5.5 Difuzija</b>	<b>46</b>
<b>5.6 Razlučivanje</b>	<b>47</b>
5.6.1 Makrorazlučivanje ili makrosegregacija	47
5.6.2 Strukturno razlučivanje	48
<b>5.7 Binarni dijagrami slijevanja tehničkih legura</b>	<b>49</b>
5.7.1 Eutektički sustav slijevanja s djelomičnom rastvorivosti u krutnini	49
5.7.2 Peritektički sustav s djelomičnom rastvorivošću u krutnini	52
<b>5.8 Sustav slijevanja s komponentama potpuno nerastvorivim u krutnini</b>	<b>54</b>
<b>5.9 Slijevanje s komponentama koje u krutnini stvaraju spojeve</b>	<b>55</b>
<b>5.10 Sustav slijevanja s djelomičnom rastvorivošću u talini</b>	<b>55</b>
<b>5.11 Trokomponentni sustavi slijevanja</b>	<b>56</b>
<b>6 TEHNIČKI METALI I NJIHOVE LEGURE</b>	<b>57</b>
<b>6.1 Sirovo željezo</b>	<b>57</b>
6.1.1 Dobivanje sirovog željeza	58
<b>6.2 Stabilni slučaj slijevanja željeza i ugljika, Fe-C dijagram</b>	<b>62</b>
6.2.1 Pojave pri skrućivanju	62
6.2.2 Faze u krutnini	65
<b>6.3 Metastabilni dijagram slijevanja Fe-C</b>	<b>67</b>
6.3.1 Pojave pri skrućivanju	67
6.3.2 Faze u krutnini kod nelegiranih željeza	71
<b>6.4 Zaključne napomene o dijagramu Fe-C</b>	<b>46</b>
<b>6.5 Nelegirana željeza</b>	<b>73</b>
6.5.1 Čelik	73
<b>6.6 Legirani čelici</b>	<b>77</b>
6.6.1 Mikrolegitirani ili sitnozrnnati čelici	77
6.6.2 Niskolegitirani čelici	77
6.6.3 Legirani čelici	77
6.6.4 Visokolegitirani čelici	77
<b>6.7 Ljevovi</b>	<b>79</b>
6.7.1 Čelični lijev	79
6.7.2 Bijeli lijev	80
6.7.3 Tvrdi lijev	80
6.7.4 Sivi lijev	80
6.7.5 Cijepjeni lijev	82
6.7.6 Žilavi lijev	83

6.7.7 Kovkasti lijev	84
<b>6.8 Neželjezni metali i njihove legure (obojeni metali)</b>	<b>46</b>
6.8.1 Bakar	87
6.8.2 Krom	91
6.8.3 Nikal i legure	91
6.8.4 Kobalt	92
6.8.5 Titan i legure	92
6.8.6 Olovo	92
6.8.7 Cink i legure	93
6.8.8 Kositar i legure	93
6.8.9 Ostali teški metali	93
6.8.10 Aluminij i legure	95
6.8.11 Magnezij i legure	97
6.8.12 Berilij	97
6.8.13 Kalcij i litij	98
<b>7 SRASLINE</b>	<b>98</b>
<b>8 METALNE PJENE</b>	<b>100</b>
<b>9 KOMPOZITNI MATERIJALI</b>	<b>101</b>
<b>10 LEMOVI</b>	<b>103</b>
<b>11 POLIMERI</b>	<b>105</b>
<b>11.1 Građa polimera</b>	<b>105</b>
<b>11.2 Veze u molekularnom lancu</b>	<b>106</b>
<b>11.3 Vrste polimera</b>	<b>107</b>
11.3.1 TERMOPLASTI (PLASTOMERI)	107
11.3.2 DUROPLASTI (DUROMERI, TERMOSTABILI)	109
11.3.3 ELASTOMERI (GUME)	109
11.3.4 POSTUPCI IZRADE PROIZVODA OD POLIMERA	111
<b>12 KERAMIKE</b>	<b>113</b>
<b>13 DRVO</b>	<b>87</b>
<b>13.1 Uvod</b>	<b>116</b>
<b>13.2 Drvo kao sirovina</b>	<b>117</b>
13.2.1 Obilježja drvne materije	117
<b>13.3 Struktura drvne materije</b>	<b>118</b>
13.3.1 Makrostruktura	118
13.3.2 Mikrostruktura	119

<b>13.4 Kemizam drveta</b>	<b>122</b>
<b>13.5 Mehanička svojstva drva</b>	<b>124</b>
<b>14 ANALIZA STRUKTURE MATERIJALA</b>	<b>126</b>
<b>14.1 Kemijski sastav</b>	<b>126</b>
14.1.1 Određivanje sastava kemijskom reakcijom	126
14.1.2 Spektralna analiza	126
14.1.3 Približno određivanje kemijskog sastava	126
<b>14.2 Analiza makro i mikro strukture materijala</b>	<b>127</b>
14.2.1 Optički mikroskop	128
14.2.2 Elektronski mikroskop	130
<b>14.3 Ispitivanje ponašanja materijala pod opterećenjem i utjecajem okoliša</b>	<b>131</b>
14.3.1 Čvrstoća materijala	131
14.3.2 Tvrdoća materijala	134
14.3.3 Žilavost materijala	141
14.3.4 Probe plastičnog deformiranja	142
14.3.5 Ispitivanje dinamičke izdržljivosti materijala	143
14.3.6 Ispitivanje puzanja materijala	146
14.3.7 Utjecaj okoliša na mehanička svojstva materijala	147
<b>15 PREPORUČENA LITERATURA</b>	<b>149</b>

## UVOD

Razvoj materijala povezan je s razvojem ljudskog roda. U razvojnem stablu čovjeka može se pratiti korištenje materijala usporedno s razvojem civilizacije. Čovjekolika bića koristila su se neobrađenim materijalom iz prirode - kamen, drvo, kosti. Primjena je bila slična današnjoj - za pribavljanje i spremanje hrane, zabavu, igru i međusobno uništavanje.



Od tog vremena sve do pred nekoliko stotina godina vještina dobivanja, prerade i proizvodnje objekata predstavlja tajnu koja se prenosila s koljena na koljena, vrlo često s brojnim mističnim radnjama koje su vjerojatno trebale zbunjivati neupućene i ohrabrvati same eksperimentatore. Pojedini materijali bili su poznati kao roba svojstvena nekoj regiji: damaski čelik, venecijansko staklo, kineska svila i porculan, švedski čelik, englesko sukno, libanonski cedar...



U prehistorijskom razdoblju čovjek počinje obradivati materijal iz prirode – to pokazuju nalazi kamenih sjekira, koštanih udica to potvrđuju. Istodobno se počinju i prerađivati sirovi materijali iz prirode. Pečenjem sušenih glinenih lonaca dobivaju se trajne keramičke posude pogodne za kuhanje hrane i spremanje tekućina. Prženjem različitih stijena - rudača s drvenim ugljenom u pećima za keramiku dobivaju se prvi metali, u Europi i Aziji bronце, u Africi željezo. Samorodni metali (zlato, srebro) koriste se svuda za nakit ili fino posuđe.

Povjesno razdoblje u kojem nastaju velike kulture u dolinama Eufrata i Tigrisa, Nila, Gangesa i Yangtse-a ne donosi toliko novih materijala koliko se razvija tehnologija prerade: rezanje, bušenje, lijevanje, poliranje, lijepljenje, tkanje, bojanje. U pismenim dokumentima toga doba nema gotovo ništa o tehnologiji i materijalima. Sva saznanja se danas svode na materijalne nalaze iz arheoloških iskopina ili analize rijetkih prikaza tehnoloških operacija na slikama i reljefima. Neki se podaci se mogu naći u starim epovima („Ilijada“), u Herodotovoj „Historiji“ i sličnim djelima.



Rijetka su djela koja daju prikaze tadašnjih tehnoloških znanja. Theofilus u XI. vijeku opisuje vučenje žice, lijevanje zvona i zlatarske radove, Agricola objavljuje 1566. opširno djelo o metalurgiji i mineralogiji. Stotinjak godina kasnije Galilei, profesor Sveučilišta u Pisi opisuje tehnologiju lijevanja topova i analizira uzrok lomova, zajedno s proračunom čvrstoće pravokutnih greda na savijanje. Veliki umjetnik, kipar i zlatar Benvenuto Cellini u svojoj autobiografiji opisuje lijevanje zlatarskih proizvoda kao i golemog brončanog konjaničkog spomenika tehnikom lijevanja s voštanim modelom, uz precizne podatke o sastojcima kojima je pripravljena bronca za lijevanje konja, gradnjom peći, lonaca i intenzitetom loženja i zagrijavanja taline. Michelangelo je sam oštrio, kalio i popuštao dlijeta za klesanje svojih kipova. Poznati fizičar R. Hooke oko 1660. proučava mehanička svojstva metala i utvrđuje vezu između naprezanja i deformacije u elastičnom području.



Razvoj materijala, a naročito metala, u XVIII. i XIX. stoljeću potaknut je velikim eropskim ratovima s upotrebom artiljerije u velikoj mjeri, a omogućen otkrićem parnog stroja. Rudarenje u većim dubinama omogućava iskop velikih količina ugljena i rudača, čime metalurgija postaje neovisna o vodnoj snazi, a velike industrije se razvijaju u ravnicama Engleske i Njemačke. Do tada je metalurška djelatnost bila gotovo isključivo smještena uz prirodne izvore u brdovitim krajevima - potoci s velikim padovima, šume za drveni ugljen koji je odlično reduktivno sredstvo, i blizina ruda čiji slojevi u gorskim krajevima često izlaze na površinu.



Devetnaesto stoljeće odlikuje se naglim razvojem tehnike i znanosti. Otkriva se većina prirodnih elemenata. Mendeljejev ih svrstava u periodički niz oko 1870. u kojem ostaju prazna mjesta očekivanih, iako još neotkrivenih elemenata. Razlučuju se mehanička svojstva: čvrstoća, tvrdoća, rastezljivost, žilavost, te uvode mjerne jedinice i standardizirana ispitivanja svojstava. Uviđa se različitost utjecaja statičkih i dinamičkih opterećenja. Optičkim mikroskopom se upoznaju strukture mnogih materijala. Utvrđeno je da se metali sastoje od velikog broja kristalnih zrna, da legure imaju različite faze, koje ovise o udjelima pojedinih elemenata i načinu toplinske i mehaničke obrade.

Većina metalurških postupaka koji se i danas koriste razvijeni su koncem XIX. stoljeća. Stariji način redukcije željezne rudače i dobivanja čelika u malim pećima iskivanjem usijane mase iz koje se tiještila troska zamjenjuje se produktivnijim postupcima. Sirovo željezo dobiva se u visokim pećima redukcijom s koksom i dodacima. Čelik se dobiva pročišćavanjem sirovog željeza u pećima kruškastog ili tiganjskog oblika s upuhivanjem zraka u talinu, a kasnije i čistog kisika. Kisik izgara višak ugljika iz sirovog željeza, a razni dodaci stvaraju trosku koja isplivava na površinu taline i ujedno je pročišćava i legira. Proizvodnja željeza raste iz godine u godinu i iznosi nekoliko desetaka milijuna tona godišnje (oko 1880). Svi ostali metali dobivaju se i koriste u daleko manjoj mjeri od čelika i lijevanog željeza.

Najveći utjecaj jeftinog i čvrstog materijala kao što je čelik je bio na području prometa. Najprije su u ratnoj brodogradnji građeni brodovi s čeličnim trupom, a zatim i u trgovačkoj mornarici. Drvo se od tada koristi samo za male brodove. Čvrstoča čeličnih elemenata, limova i profila, daleko nadvladava čvrstoču drvene građe pa su moguće i bitno veće dimenzije trupa. U kopnenom prometu razvija se željeznička mreža, velike količine željeza koriste se za tračnice. U građevinarstvu se izrađuju mostovi velikih raspona s elementima iz lijevanog željeza i čelika, kao i visoke građevine (Eiffelov toranj).

Razvijeni pomorski i kopneni promet omogućili su jeftini i brzi transport sirovina i gotovih proizvoda po cijelom svijetu i dali ekonomsku podlogu razvoju znanosti. U tom je razdoblju još uvijek mala pozornost poklonjena proučavanju tehničkih materijala, temeljne znanosti se znatno brže razvijaju. Ovo ne treba čuditi jer su tadašnji strojevi, uređaji i konstrukcije bili masivni, pa se nepoznavanje svojstava i ponašanja materijala moglo pokrivati povećanjem debljine stijenki, odnosno smanjenjem naprezanja.

U XX. stoljeću razvijena su još dva značajna prometna sredstva - automobil i avion, a ostvaren je i promet u svemirskim prostorima. Poznavanje svojstava i ponašanja materijala u različitim uvjetima postaje neophodno kako bi se izradile ekonomične i sigurne konstrukcije.

Ova predavanja posvećena su u najvećoj mjeri metalima, a posebno legurama željeza. Razlog je očit. U strojarskoj praksi metali su pretežni materijal u konstrukcijama i u preradi. Godišnja proizvodnja željeza iznosi oko 500 milijuna tona, daleko više od svih ostalih materijala zajedno. Svojedobno najavljinana "doba" aluminija i kasnije plastičnih masa nisu potisnula željezo s pozicije najviše korištenog tehničkog materijala. Za dobivanje željeza troši se relativno malo energije u usporedbi s drugim materijalima. Proces je jednostavan, moguće je recikliranje otpadnog materijala pretaljivanjem, a stare konstrukcije ne zagađuju okoliš jer korozivnim procesom prelaze u prvobitno stanje-hrdju.

Poznavanje materijala je u osnovi jednako za sve strojarske inženjere. Kasnije projektanti uzimaju materijale prema njihovim mehaničkim, antikorozivnim i drugim svojstvima, držeći ta svojstva nečim što se normalno postiže pravilnim tehnološkim postupcima. Tehnolozi analiziraju strukturu materijala i utjecaja različitih obrada na promjenu strukture, a time i mehaničkih i drugih svojstava. Obradom se mogu mijenjati svojstva materijala u širokom rasponu. Poznavanje tih promjena je preduvjet pravilnog provođenja obrade i postizanja željenih svojstava.

Kod standardnih konstrukcija i materijala tolerancije obrade su dosta široke, a da ne dolazi do odstupanja od predviđenih svojstava. Materijali izuzetnih karakteristika zahtijevaju i vrlo uske tolerancije obrade za postizanje tih svojstva. U pravilu skuplji materijal zahtijeva skupljnu i pažljiviju obradu, što podrazumijeva i viši nivo znanja inženjera.

Zbog čega je potreban ovakav povjesni uvod? Zato što se materijali i tehnologija nisu razvijali kako se sistematizira u udžbenicima, niti su razni dijagrami rađeni zbog njih samih, nego da lakše razumijemo materijale koje koristimo. Upravo dobro poznavanje materijala omogućava njihovu racionalnu primjenu. Pojam „racionalnosti primjene“ nije uvijek tehničke naravi, nego i ekonomski i politički. Ponuda i potražnja metala, cijene energije, politička previranja također bitno utječu na izbor "najboljeg" materijala, koji treba izabrati između dostupnih.

## ZNANOST O MATERIJALIMA

Znanost o materijalima uključuje istraživanje korelacije između strukture i svojstva materijala. Nasuprot tome, inženjerstvo materijala je u osnovi projektiranje strukture materijala za postizanje unaprijed određenih svojstava (temeljem poznate korelacije struktura - svojstva).

Pojam "**struktura**", zaslužuje preciznije objašnjenje. Ukratko, struktura materijala se obično odnosi na raspored unutarnjih komponenti.

Subatomska struktura uključuje raspored elektrona unutar pojedinih atoma te njihovu interakciju s jezgrama. Na atomskoj razini, struktura obuhvaća relativni raspored atoma i molekula. Sljedeće veće strukturno područje je "mikroskopsko" i sadrži velike grupe međusobno povezanih atoma (možemo ga izravno promatrati uz pomoć nekog tipa mikroskopa). Konačno, strukturni elementi koji su vidljivi golim okom nazivaju se "makroskopski".

Pojam "**svojstvo**", također, zaslužuje objašnjenje. Svi su materijali upotrebom u upotrebi su izloženi vanjskim utjecajima (podražajima) koji izazivaju neku vrstu odziva. Npr., materijal podvrgnut djelovanju sile doživjet će deformaciju; polirane površine metala reflektiraju svjetlo. Svojstvo je, dakle, osobina materijala u smislu vrste i veličine odziva na određeni narinuti podražaj. Općenito, definicija svojstva je neovisna o obliku i dimenziji materijala.

Gotovo sva važna svojstva čvrstih materijala mogu se grupirati u šest različitih kategorija: mehanička, električna, toplinska, magnetska, optička, i svojstva propadanja. Za svaku grupu svojstava postoji karakteristična vrsta poticaja koja izaziva različitu reakciju. Mehanička svojstva (npr. modul elastičnosti i čvrstoća materijala) odnose se na deformacije uzrokovane opterećenjem. Kod električnih svojstava (npr. električna vodljivost i dielektrična konstanta) poticaj daje električno polje. Toplinsko ponašanje tijela može biti formulirano toplinskim kapacitetom i toplinskom vodljivošću. Za magnetska svojstva poticaj je magnetsko polje. Optička svojstva materijala (npr. indeks loma svjetla i refleksija) opisuju njihovo ponašanje pod utjecajem elektromagnetskog ili svjetlosnog zračenja. Na kraju, svojstva propadanja ukazuju na kemijsku reaktivnost materijala.

Osim strukture i svojstava, još su dvije važne komponente uključene u znanost i inženjerstvo materijala. To su "**obrada**" i "**učinkovitost**". S obzirom na međusobni odnos ove četiri komponente, struktura materijala ovisiti će o načinu obrade. Nadalje, učinkovitost će materijala biti u funkciji njegova svojstva. Tako je međusobni odnos između obrade, strukture, svojstava i performansi linearan:

*Obrada* → *Struktura* → *Svojstva* → *Učinkovitost*

Potrebno je skrenuti pozornost na odnose između ove četiri komponente u pogledu dizajna, proizvodnje i upotrebe materijala.

Promotrimo primjer s tri tanka diska postavljena preko lista knjige na slici desno. Očito je da su optička svojstva (tj. propusnost svjetla) svakog diska različita. Jedan je transparentan (gotovo sva odbijena svjetlost prolazi kroz njega), dok je drugi proziran, a treći neproziran. Svi ovi uzorci načinjeni su od istog materijala, aluminijevog oksida. Transparentni disk je u biti monokristal, disk u središtu slike se sastoji od velikog broja, međusobno povezanih, malih kristala (polikristalni materijal) čije granice raspršuju dio svjetlosti. Treći uzorak na desnoj strani se sastoji, ne samo od velikog broja sitnih kristalića već i od velikog broja malih pora ili šupljina. Ove pore raspršuju reflektirano svjetlo i čine ovaj materijal neprozirnim. Dakle, struktura tih triju uzoraka je različita u pogledu granica kristala i pora, koji utječu na optička svojstva propuštanja reflektiranog svjetla. Nadalje, svaki disk je proizведен iz istog materijala, ali koristeći se različitim tehnikama obrade. Ako je optičko propuštanje svjetla važan parametar u odnosu na krajnju upotrebu, učinkovitost svakog diska će biti drukčija.

$\gamma$	= lattice parameter: unit cell x
$\gamma$	= shear strain (6.2)
$\Delta$	= finite change in a parameter
$\epsilon$	= engineering strain (6.2)
$\epsilon$	= dielectric permittivity 18.16
$\epsilon_r$	= dielectric constant relative
$\epsilon_T$	= true strain (6.6)
$\eta$	= viscosity (12.7)

## ZAŠTO PROUČAVATI MATERIJALE?

Zašto proučavamo materijale? Mnogi znanstvenici ili inženjeri, bez obzira na svoju specijalnost, jednom će biti suočeni s problemom projektiranja koji uključuju materijale. (npr. prijenosnici snage i broja okretaja, superstrukture za građevinarstvo, komponente za rafinerije nafte, ili mikroprocesori računala).

Pravi je problem odabir pravog materijala između tisuće dostupnih. Postoji nekoliko kriterija za donošenje konačne odluke.

Prije svega, moraju biti određeni *uvjeti korištenja* (funkcija) na temelju kojih će biti utvrđena potrebna svojstva materijala. Samo u rijetkim slučajevima materijal posjeduje idealnu kombinaciju svojstava. Stoga je potrebno pronaći kompromis kombinacije svojstava. Npr. materijal visoke čvrstoće ima samo ograničenu rastezljivost, dok materijali velike rastezljivosti imaju malu čvrstoću. U takvim slučajevima potrebno je odrediti razuman kompromis između ova dva svojstva.

Sljedeće razmatranje kod izbora materijala jest *mogućnost pogoršanja* (promjene) svojstava materijala u eksploataciji. Npr. povišena temperatura ili korozivno okruženje mogu rezultirati značajnim smanjenjem čvrstoće.

Konačno, vjerojatno je najvažnije *ekonomsko razmatranje*: Koliko gotov proizvod košta? Neki materijal može imati idealnu kombinaciju svojstva, ali se ne koristi zbog svoje visoke cijene. To znači da je kompromisno rješenje nezaobilazno. Trošak gotovih proizvoda uključuje troškove materijala i troškove nastale tijekom obrade za proizvodnju željenog oblika. Iz ovog proizlazi da ponekad odabir relativno jeftinog materijala može rezultirati skupim proizvodom, ako je proces obrade skup.

Iskusni inženjer će, posebno razvijenim tehnikama izbora materijala, suziti broj mogućih materijala za izbor na relativno mali broj najpodesnijih. Potom će detaljnim razmatranjem njihovih prednosti i mana, kao i odgovarajućih postupaka obrade, odabrati onaj sa najvišom učinkovitosti (u pogledu svojstava, geometrije i ekonomskih čimbenika).

## KLASIFIKACIJA MATERIJALA

Čvrsti materijali (krutine) uobičajeno se dijele u tri osnovne grupe:

- metale
- keramike
- polimere.

Ova podjela temelji se prije svega na kemijskom sastavu i atomskoj strukturi. Većina materijala pripada jednoj od navedenih grupa iako postoje i materijali koji su kombinacija više grupe (hibridi).

Postoje još tri važne skupine inženjerskih materijala:

- kompoziti
- poluvodiči
- biomaterijali.

Kompoziti se sastoje od kombinacije dva ili više različitih materijala. Poluvodiči se koriste zbog svojih karakterističnih električnih obilježja. Biomaterijali se ugrađuju u ljudsko tijelo.

## METALI

Metali su obično kombinacija metalnih kemijskih elemenata. Oni imaju veliki broj slobodnih elektrona, tj. elektrona koji nisu vezani za određene atome. Mnoga svojstava metala mogu se izravno pripisati njima. Metali su vrlo dobri vodiči električne i toplinske energije, neprozirni su, polirane metalne površine imaju sjajan izgled. Vrlo su čvrsti, ali i deformabilni, što je razlog njihove široke primjene u konstrukcijske svrhe.

## KERAMIKE

Keramike su spojevi između metalnih i nemetalnih elemenata: najčešće su to oksidi, nitridi ili karbidi. Širok raspon materijala koji upada unutar ove grupe uključuje keramike koje se sastoje od gline, cementa i stakla. Ovi materijali su obično izolatori te su otporniji na visoke temperature i agresivne medije od metala i polimera. S obzirom na mehanička svojstva, keramike su tvrde i čvrste, ali vrlo krhke.

## POLIMERI

Skupina polimera uključuje plastike i gume. Većina polimera organski su kemijski spojevi temeljeni na ugljiku, vodiku, i drugim nemetalima. Sačinjeni su od dugih međusobno povezanih molekularnih lanaca. Obično imaju nisku gustoću te mogu biti izuzetno fleksibilni.

## KOMPOZITI

Kompozitni se materijali sastoje od dva ili više materijala. Dizajnirani su kako bi se postigla kombinacija najboljih svojstava pojedinih konstituenata. U širokoj primjeni je stakloplastika u kojoj se staklena vlakna nalaze u matrici iz polimernog materijala. Stakloplastike dobivaju čvrstoću od staklenih vlakana, a fleksibilnost od polimerne matrice. Mnogi novi materijali su upravo iz skupine kompozita.

## POLUVODIČI

Poluvodiči imaju električna svojstva koja se nalaze između električnih vodiča i izolatora. Električna svojstva ovih materijala vrlo su osjetljiva i na najmanju prisutnost stranih atoma (nečistoća) u strukturi. Poluvodiči su omogućili razvoj integriranih sklopova koji su doveli do revolucionarnog razvoja elektronike i računalne industrije.

## BIOMATERIJALI

Od biomaterijala se izrađuju komponente koje se ugrađuju u ljudsko tijelo kao zamjena oboljelih ili oštećenih dijelova tijela. Ovi materijali ne smiju proizvoditi otrovne tvari i moraju biti kompatibilni s tkivom (ne smiju uzrokovati štetne biološke reakcije). Svi gore navedeni materijali: metali, keramike, polimeri, kompoziti, i poluvodiči mogu se koristiti kao biomaterijali.

## NAPREDNI MATERIJALI

Materijali koji se koriste za aplikacije visoke tehnologije (*high-tech materijali*) ponekad se nazivaju napredni materijali. Pod visokom tehnologijom podrazumijevamo uređaje ili

proizvode koji funkcioniraju pomoću relativno komplikiranih i sofisticiranih načela (npr. električka opreme, računala, optički sustavi, zrakoplovi i vojna raketna tehnika). Napredni materijali su obično ili tradicionalni materijali čija su svojstva poboljšana ili novorazvijeni materijali visoke učinkovitosti. Mogu biti iz bilo koje grupe materijala (metali, keramike, polimeri) i obično imaju visoku cijenu.

### **POTREBA ZA MODERNIM MATERIJALIMA**

Unatoč golemom napretku, postignutom u posljednje vrijeme u znanosti o materijalima, još uvijek ostaju tehnološki izazovi. Ovi izazovi uključuju razvoj još više sofisticiranih i specijaliziranih materijala, kao i razmatranje utjecaja na okoliš prilikom proizvodnje ovih materijala.

Proizvodnja nuklearne energije je važan segment svjetske energetike. Rješenja brojnih problema, koji su povezani s ovom proizvodnjom, uključuju upravo razvoj novih materijala, od spremnika nuklearnog goriva do objekata za zbrinjavanje radioaktivnog otpada.

Potrošnja značajne količine energije povezana je s transportom. Smanjenje težine prijevoznih sredstava (automobili, zrakoplovi, vlakovi, itd.), kao i porasta radne temperature motora, povećat će iskoristivost goriva. Razvoj ćeći u pravcu novih visokočvrstih, konstrukcijskih materijala niske gustoće, kao i materijala za rad na povišenim temperaturama.

Nadalje, postoji potreba za pronalaženjem novih, ekonomičnijih izvora energije, te za učinkovitijim korištenjem postojećih. Materijali će ovdje nesumnjivo igrati značajnu ulogu.

Npr. izravna transformacija solarne u električnu energiju. Solarne ćelije uključuju neke prilično složene i skupe materijale. Postoji potreba razvoja novih ekonomičnijih materijala visoke učinkovitosti za ovaj proces pretvorbe energije kako bi se osigurala održiva tehnologija.

Nadalje, kvaliteta okoliša ovisi o našoj sposobnosti za kontrolu kvalitete zraka i onečišćenja vode. Tehnika kontrole zagađenja koristi različite materijale. Osim toga, treba unaprijediti metode za obradu i doradu materijala kako bi se umanjilo zagađenje okoliša prilikom proizvodnje. U procesu proizvodnje nekih materijala, dolazi do nastajanja otrovnih tvari koje se ispuštaju u prirodu, te je potrebno razmotriti utjecaj ovih otrovnih tvari na ekologiju.

Mnogi materijali koje koristimo proizvedeni su iz neobnovljivih izvora. Ovi uključuju polimere (za koje je glavna sirovina ulje) i neke metale. Ovi neobnovljivi resursi postupno se iscrpljuju, što zahtijeva otkrivanje dodatnih rezervi, razvoj novih materijala koji imaju usporediva svojstva i povećani napor u pravcu recikliranja.

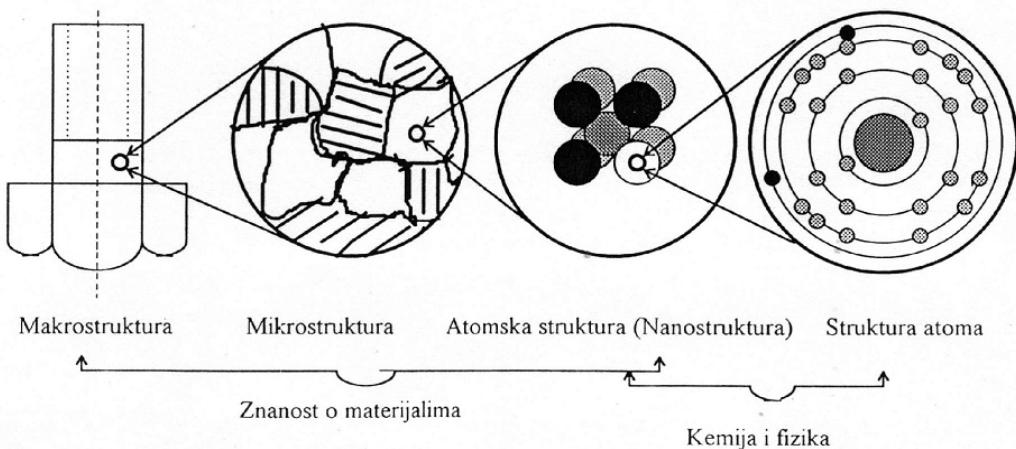
Kao posljedica ekonomije (proizvodnje i utjecaja na okoliš) postaje sve važnije uzimanje u obzir cijelog životnog ciklusa materijala.



# 1 GRAĐA MATERIJALA

## 1.1 Atom

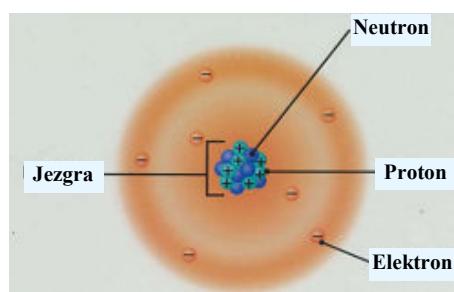
Materijali mogu biti u različitim agregatnim stanjima. Kao konstrukcijski materijali koriste se tvari u krutom stanju, a kao nositelji energije tekućine i plinovi. Električki vodljivi plinovi nazivaju se plazme. Sve tvari, osim manjeg broja izuzetaka, prolaze kroz sva četiri agregatna stanja ukoliko se dovodi ili odvodi energija izvana. Ovi procesi su povratljivi, tj. hlađenjem taline dobiva se krutnina koja se zagrijavanjem može opet rastaliti.



Tvari u prirodi razlikujemo po boji, izgledu površine, tvrdoći, specifičnoj masi i drugim svojstvima. Pristup proučavanju materijala je najlakši ako se pode od elementarnih čestica koje grade tvari, atoma.

Grada slobodnih atoma se opisuje u nastavku na pojednostavljeni način, koji se ne može koristiti u posebno znanstvene svrhe, ali će nam dobro poslužiti za naša daljnja razmatranja.

Prema tom modelu, atom se sastoje od jezgre u kojoj je sadržana skoro čitava masa atoma, a oko nje u određenom poretku kruže elektroni. Jezgra se sastoje od pozitivno nabijenih dijelova protona i neutralnih neutrona, a oko nje na određenoj udaljenosti nalazi se oblak elektrona. Kod neutralnog atoma broj protona i elektrona prema vani je jednak.



Redni broj elemenata ovisi o broju protona u jezgri. U jezgri je sadržana skoro cijela masa atoma, pa se prema tome određuje atomska težina. Elektroni imaju zanemarivo malu masu, međutim, zbog velike brzine gibanja oko jezgre imaju znatne kinetičke energije.

Pod određenim uvjetima pojedini atom može dobiti izvjestan broj elektrona ili ih se oslobođiti, te radi toga postati električki negativno nabijen, odnosno u drugom slučaju pozitivno nabijen. Takvi atomi zovu se ion!

Atomi pojedinih elemenata razlikuju se međusobno po broju protona u jezgri (odnosno elektrona kod neutralnog atoma), pa su tim redom uvršteni u Mendeljejev periodni sustav. U ovom sustavu složeni su elementi po rastućem rednom broju u horizontalnoj liniji i po stupcima prema rasporedu elektrona u vanjskim orbitama. Svojstva elemenata svrstanih u stupcima su slična, tako da se razlikuju nemetalni, prelazni metali, plemeniti plinovi. Element na prvom mjestu je vodik, a posljednji prirodni element je uran na 92 mjestu. Postoje i

umjetni elementi s višim rednim brojem, ali su svi kratkog vijeka trajanja jer odbojne sile u velikim jezgrama uzrokuju njihovu nestabilnost i spontani raspad na elemente nižeg rednog broja.

Atomi pojedinih elemenata mogu imati različit broj neutrona, a da pri tome ne mijenjaju ni redni broj u periodnom sustavu ni kemijska svojstva. Ovakvi atomi s različitim brojem neutrona od normalnog zovu se izotopi. Neki izotopi su stabilni, dok ima izotopa koji se brže ili sporije mijenjaju u stabilnije izotope ili elemente radioaktivnim raspadom.

		Glavna grupa elemenata		Glavna grupa elemenata																																	
				Metali (glavna grupa)		Metali (prelazni)		Metali (unutrašnji prelazni)		Metaloidi		Nemetalii																									
		1A (1)		2A (2)																																	
		1	H 1.008	2A (2)																																	
1		3	Li 6.941	4	Be 9.012																																
2		11	Na 22.99	12	Mg 24.31	Prelazni elementi																															
3		19	K 39.10	20	Ca 40.08	21	Sc 44.96	22	Ti 47.88	23	V 50.94	24	Cr 52.00	25	Mn 54.94	26	Fe 55.85	27	Co 58.93	28	Ni 58.69	29	Cu 63.55	30	Zn 65.39												
4		37	Rb 85.47	38	Sr 87.62	39	Y 88.91	40	Zr 91.22	41	Nb 92.91	42	Mo 95.94	43	Tc (98)	44	Ru 101.1	45	Rh 102.9	46	Pd 106.4	47	Ag 107.9	48	Cd 112.4	31	Ga 69.72	32	Ge 72.61	33	As 74.92	34	Se 78.96	35	Br 79.90	36	Kr 83.80
5		55	Cs 132.9	56	Ba 137.3	57	La 138.9	72	Hf 178.5	73	Ta 180.9	74	W 183.9	75	Re 186.2	76	Os 190.2	77	Ir 192.2	78	Pt 195.1	79	Au 197.0	80	Hg 200.6	81	Tl 204.4	82	Pb 207.2	83	Bi (209)	84	Po (209)	85	At (210)	86	Rn (222)
6		87	Fr (223)	88	Ra (226)	89	Ac (227)	104	Rf (261)	105	Db (262)	106	Sg (266)	107	Bh (265)	108	Hs (266)	109	Mt (269)	110	111	112		114						(285)							
7																																					
		Unutrašnji prelazni elementi																																			
6	Lantanidi	58	Ce 140.1	59	Pr 140.9	60	Nd 144.2	61	Pm (145)	62	Sm 150.4	63	Eu 152.0	64	Gd 157.3	65	Tb 158.9	66	Dy 162.5	67	Ho 164.9	68	Er 167.3	69	Tm 168.9	70	Yb 173.0	71	Lu 175.0								
7	Aktinidi	90	Th 232.0	91	Pa (231)	92	U 238.0	93	Np (237)	94	Pu (242)	95	Am (243)	96	Cm (247)	97	Bk (247)	98	Cf (251)	99	Es (252)	100	Fm (257)	101	Md (258)	102	No (259)	103	Lr (260)								

Mendeljejev periodni sustav elemenata

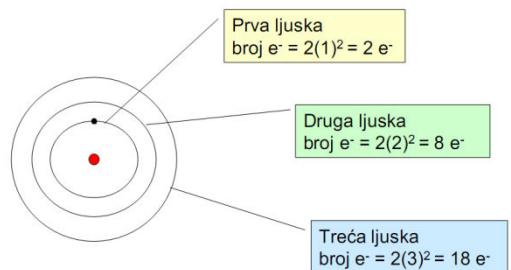
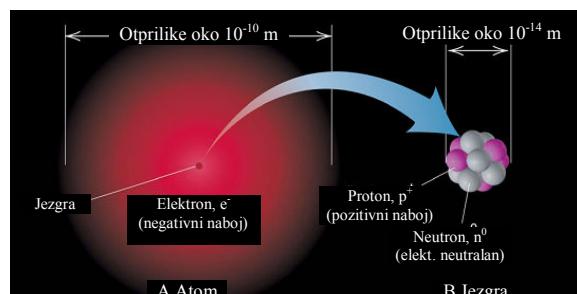
Radi boljeg razumijevanja i proučavanja metala, potrebno je kazati par riječi o rasporedu samih elektrona oko jezgre. Elektroni se gibaju oko jezgre po određenim putanjama koje mogu biti od skoro kružnih do izrazito eliptičnih. Dimenzija najveće putanje određuje promjer atoma. Ovaj je, zavisno o elementu, reda veličine  $10^{-10}$  [m], dok je promjer atomske jezgre reda veličine  $10^{-14}$  [m]. Udaljenost elektrona od jezgre, odnosno dimenzija putanje po kojoj se giba, određuje njegovu energiju i vezu s jezgrom. Čim je on udaljeniji tim je energija elektrona veća, a veza s atomom slabija.

Elektroni se oko jezgre gibaju u slojevima ili **ljuskama**, koje se razlikuju prema pripadnim energijama. Svaka ljsuska sadrži odgovarajući broj elektrona koji se može odrediti izrazom:

$$N=2n^2$$

gdje je:

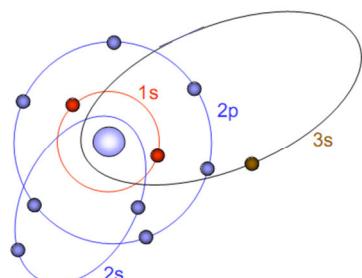
N - maksimalni mogući broj elektrona u ljsuski  
n - redni broj ljsuske



Vidljivo je da se prvoj ljesci može nalaziti najviše 2 elektrona, u drugoj 8, trećoj 18, itd. Umjesto rednim brojem ljeske se označavaju slovima: K, L, M,... Ljeske će se naravno napuniti do maksimalnog broja elektrona, ako ih ima dovoljno, a to zavisi o položaju elementa u periodičkom sustavu.

Tako će, na primjer, atom vodika (*slika 1.1*), koji je prvi u sustavu, imati samo 1 elektron u prvoj ljesci, a tek će helij imati tu ljesku ispunjenu. Natrij (*slika 1.2*), s rednim brojem 11 ima ispunjenu prvu i drugu ljesku, dok u trećoj ima samo 1 elektron.

Međutim, ne nalaze se niti svi elektroni unutar jedne ljeske na istom energetskom nivou, nego se dijele na podgrupe, odnosno podljeske. Ako s " $\ell$ "



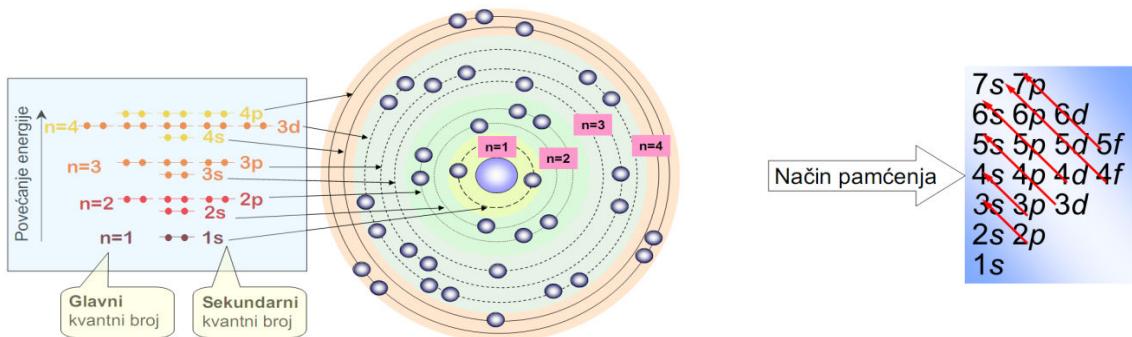
*Slika 1.2. Model atoma natrija*

označimo broj podljeski u određenoj ljeski, a " $\ell$ " može poprimiti vrijednost 0, 1, 2, ..., onda se maksimalni broj elektrona u jednoj podljesci "k" može odrediti prema formuli:

$$k = 2 \cdot (2 \cdot \ell + 1)$$

**Podljeske** se još mogu označavati malim slovima: s(0), p(1), d(2),... Rasporед elektrona u ljeske i podljeske može se napisati i tako da se redni broj ljeske označi arapskim brojem, podljeske malim slovom, a broj elektrona u odgovarajućoj podljesci kao eksponent:

Primjer: Željezo, Fe, redni broj 26 (dakle 26 elektrona u jednom atomu), elektronska konfiguracija je -  $1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^6 4s^2$ .



*Slika 1.3. Model atoma kriptona Kr*

*Redoslijed popunjavanja ljeski i podljeski*

Elektroni se dakle razlikuju po energiji. Elektroni u nižim ljkusama su jače vezani uz jezgru, dok elektroni iz vanjskih ljkuski mogu izaći s malim utroškom energije. Jedinica kojom se mjeri energija elektrona je elektron-volt.

Elektronske ljkuske i podljkuske popunjavaju se od najnižeg energetskog nivoa prema višem (*slika 1.4*).

Dovođenjem energije izvana, moguće su različite pojave, ovisno o količini predane energije elektronima na pojedinim ljkuskama.

Kod male količine predane energije, elektroni iz vanjske ljkuske se pobude (ekscitacija), penju na višu orbitu koja je za njih nestabilna. Nakon kratkog vremena elektroni se vraćaju na prvobitnu orbitu i pritom ispuštaju kvant energije određene frekvencije:

$$E = h \cdot f [J]$$

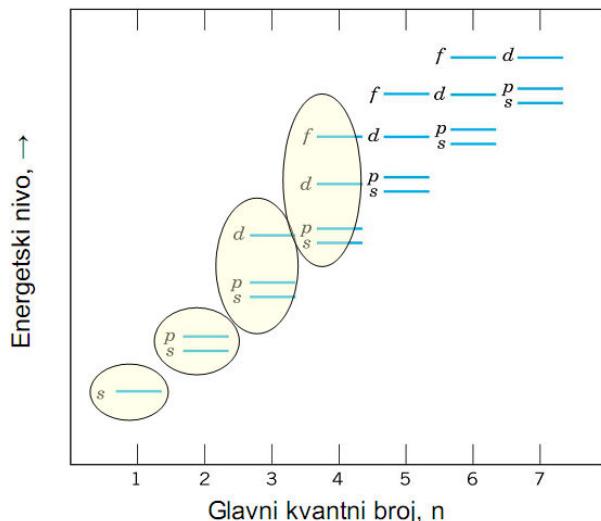
gdje je:

E - ispušteni kvant energije  
 h - Planck-ova konstanta,  $6.63 \times 10^{-34}$  [Js]  
 f = frekvencija zračenja, [1/s].

Ova se pojava uočava kao svjetlost različite boje. Više energije odgovaraju ultraljubičastom dijelu spektra, a niže infracrvenom.

Dovođenjem veće količine energije može se izbiti elektron iz vanjske ljkuske ili se može ubaciti u ljkusu. Ova pojava naziva se ionizacija atoma, čime atom prestaje biti električki neutralan prema vani. Gubitkom elektrona atom postaje električki pozitivan - **kation**, a primanjem elektrona postaje negativan - **anion**. Ionizacija atoma omogućava električku vodljivost jer se dobivaju slobodni naboji.

Dovodenjem energije elektronima iz nižih ljkuski i njihovim izbacivanjem u više orbite dobiva se znatno intenzivnije zračenje vrlo visoke frekvencije - rendgensko ili X-zračenje.



**Slika 1.4. Energetski nivo podljkuski**

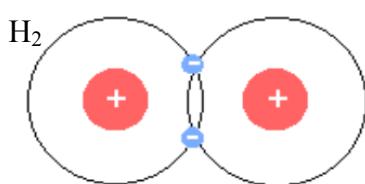
## 1.2 Vezivanje atoma

Tvari u prirodi nalaze se u agregatnim stanjima koja odgovaraju temperaturi i tlaku okoliša. Pojedinačni atomi postoje samo kod inertnih plinova koji imaju popunjenu vanjsku ljkusku s 8 elektrona (helij, argon, itd.). Atomi svih ostalih elemenata na normalnim uvjetima vezuju se na razne načine. Zagrijavanjem tvari na vrlo visoke temperature mogu se razdvojiti i molekule ostalih tvari (**disocijacija**).

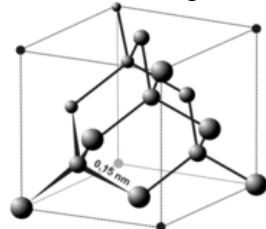
Postoji nekoliko vidova vezivanja atoma, i svaki od njih bitno utječe na fizikalna svojstva tvari. Čvrstoća veze među atomima je također različita za razne načine vezivanja. Prikaz koji slijedi dan je u poretku od čvršćih veza prema slabijima.

### 1.2.1 Atomska veza

Atomska ili kovalentna veza nastaje između istovrsnih atoma (elektronegativni IV do VII grupe iz periodnog sustava elemenata) koji nemaju popunjenu vanjsku ljuštu elektronima, tako da atomi međusobno "posuđuju" elektrone i time ostvaruju popunjenošću vanjske ljuške. Na *slici 1.5* prikazana je veza molekule vodika i dijamantna kristalna rešetka ugljika. Odlika veze je da se udaljavanjem atoma veza raskida, za što su potrebne visoke temperature.



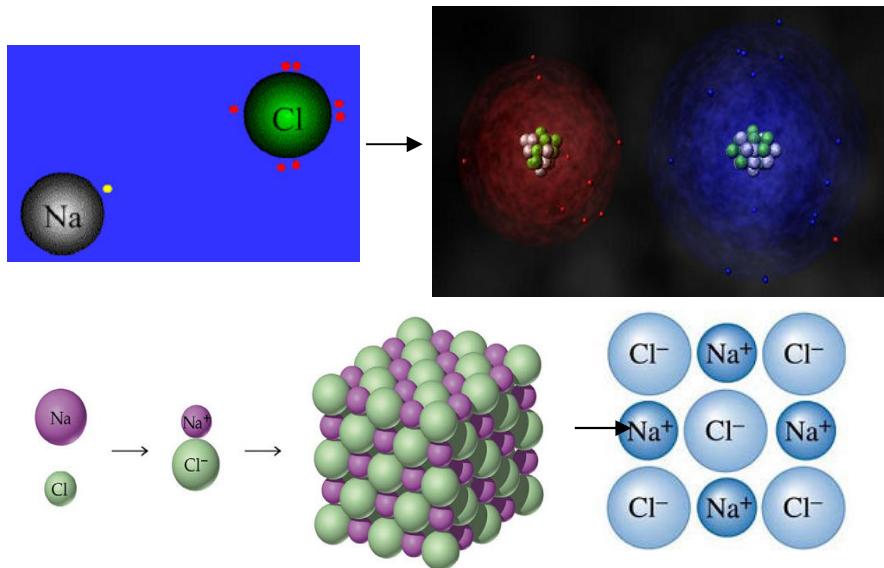
Slika 1.5. Atomska veza kod molekule vodika



Kristalna rešetka dijamanta

### 1.2.2 Ionska veza

Ionska veza je nešto slabija od atomske, a nastaje između elektronegativnih i elektropozitivnih elemenata, koji udruživanjem zajednički dijele elektrone i tako postižu popunjenošću vanjskih ljuški. Elektronegativni elementi su nemetalnog, a elektropozitivni metalnog karaktera. Tipičan primjer ionske veze daju kristali morske soli, ( $NaCl$ ). Zbog ovakvog vezivanja čvrsti je kristal prema vani električki neutralan. Rastvaranjem soli u vodi ili taljenjem soli dolazi do disocijacije na pozitivne i negativne ione natrija i klora, koji se u električnom polju privlače na elektrode suprotnog polariteta. Ovim se ostvaruje ionski električki tok, koji je praćen rastvaranjem materije (elektroliza). Na *slici 1.6*. prikazana je veza  $NaCl$ .

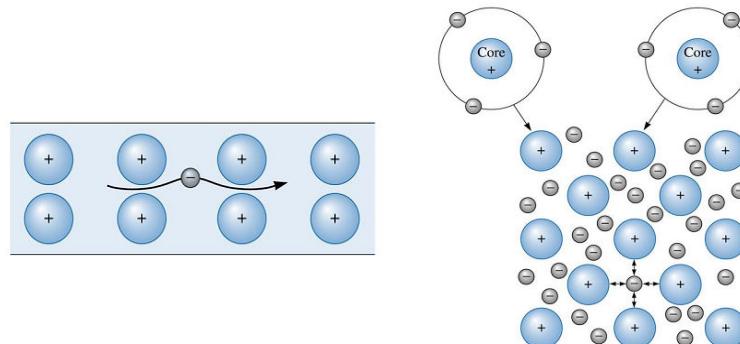


Slika 1.6. Ionsko vezivanje molekula  $NaCl$

### 1.2.3 Metalna veza

Budući da su metali elektropozitivni elementi s lakoćom ispuštaju valentne elektrone iz vanjske ljuške. U čvrstom metalu pozitivni ioni se razmještaju na pravilan način na odgovarajućim udaljenostima. Slobodni elektroni se premještaju od iona do iona i tvore elektronsku maglicu, koja se naziva i elektronski plin (neke pojave se mogu opisati analogno s

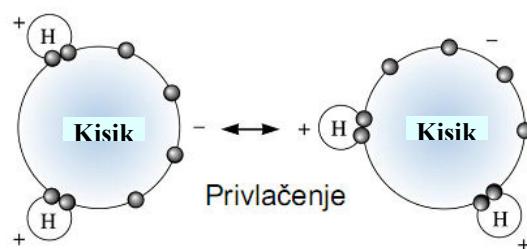
ponašanjem plina). Ovi slobodni elektroni omogućavaju električni tok u metalu pod djelovanjem električnih i toplinskih polja. Razmak između atoma u metalu je rezultat ravnoteže privlačnih i odbojnih sila koje izazivaju slobodni elektroni i pozitivni ioni. Ove sile prikazane su na *slici 1.7*. Međusobni pomak atoma klizanjem ne narušava metalnu vezu jer elektroni ne razlikuju "svoje" atome od ostalih, pa se veza stalno održava. Ovakvo vezivanje omogućava znatnu elastičnu i plastičnu deformaciju metala.



*Slika 1.7. Primjer metalne veze*

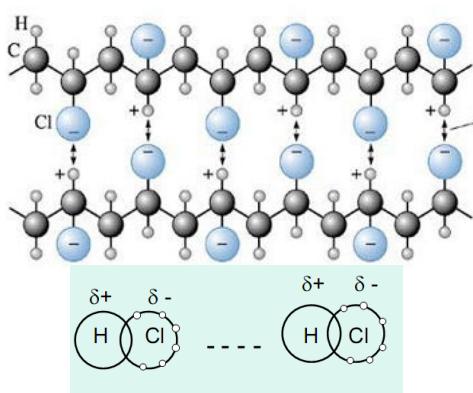
#### 1.2.4 Vodikova veza

Vodikova veza je slabija od metalne. Javlja se između molekula u kojima su atomi vodika H povezani s najjačim elektronegativnim atomima fluora F, kisika O i dušika N. Nalazimo je kod vode i polimernih materijala. Vodikov atom u polimerima izmjenično se udružuje s elektronegativnim atomima i tako ostvaruje popunjenošću vanjske ljuske. Zagrijavanje i zračenje (ultraljubičasto, a naročito ionizirajuće) razaraju vodikovu vezu. Ovim se može protumačiti velika osjetljivost polimera prema povišenim temperaturama i zračenju, koje degradira svojstva materijala.



*Slika 1.8a. Primjer vodikove veze kod molekule vode*

#### 1.2.5 Van der Waalsova veza



Ovo je veza koja nastaje zbog dipolnih privlačnih sila. Vrlo je slaba i razbijaju je male toplinske vibracije atoma.

Ukapljeni inertni plinovi pokazuju ovakav oblik vezivanja, kao i molekularni plinovi. Neutralni atom postaje dipol s obzirom na slučajnu fluktuaciju položaja elektrona ostalih atoma, pa dolazi do povremene veze između dipola.

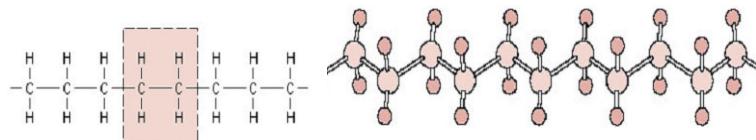
*Slika 1.8b. Primjer Van der Waalsove veze*

## 1.3 Strukture tvari

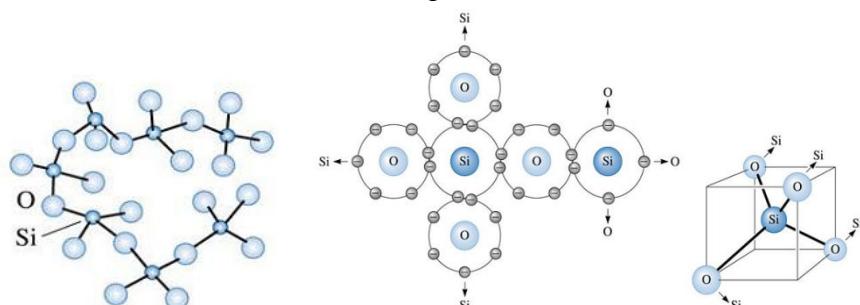
### 1.3.1 Amorfne strukture

Ukoliko se hlađenjem taline nakon skrućivanja ne dobije pravilan raspored atoma, nego je on slučajan kao i u talini, dobiva se amorfna (bezoblična) struktura. Kod nekih materijala je to stabilan oblik, dok neki zagrijavanjem mogu preći u kristalnu strukturu. Amorfni materijali u pravilu nemaju gotovo nikakvu plastičnost.

Osim amorfnih materijala mnogi materijali su građeni tako da su atomi pravilno poredani u jednom smjeru ili u dijelu volumena materijala. Tipičan primjer su polimeri i stakla, koji imaju lančaste strukture. Kod polimera kičmu lanca čine ugljikovi atomi koji na slobodne valencije vezuju ostale atome i spojeve. Nastaju dugi lanci nepravilnog oblika koji se mogu jako rastezati, a da ne dode do prekida veze (*slika 1.9.*). Kod stakala kičmu lanca tvori spoj  $\text{SiO}_4$  tetragonskog oblika (slično dijamantu). Niz ovakvih tetragona čini lance koji na povišenim temperaturama lako rotiraju u zglobovima kao na *slici 1.10.* (ovim se tumači plastičnost stakla na povišenim temperaturama). Ovi materijali pokazuju karakterističnu temperaturu omekšavanja (za razliku od kristalnih koji imaju karakterističnu temperaturu taljenja).



Slika 1.9. Lančasta polimerna struktura



Slika 1.10. Anorganski lanac - staklo

kemijski spoj  $\text{SiO}_4$

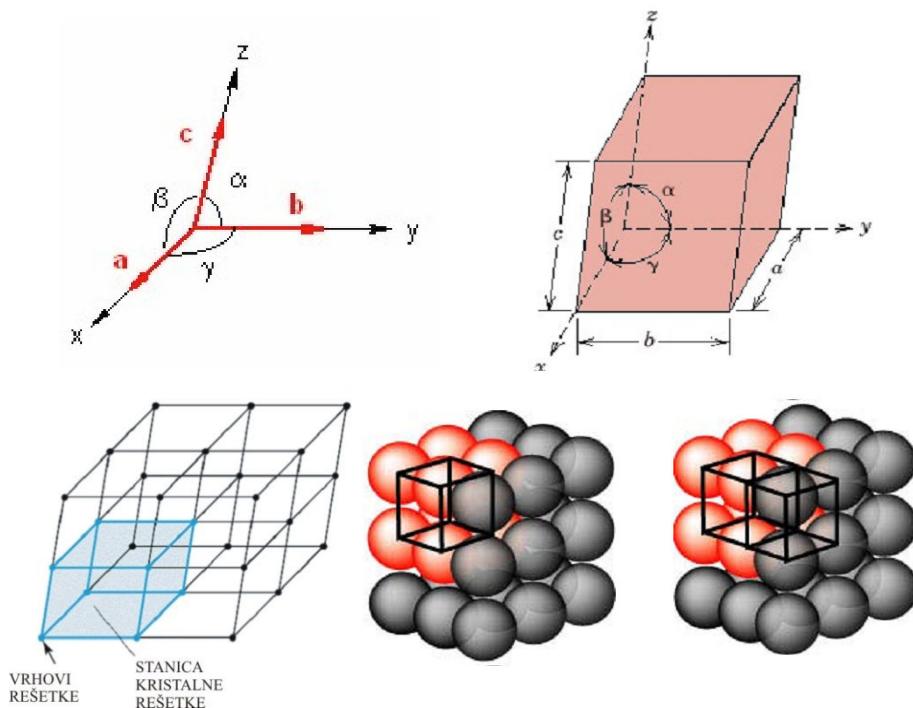
### 1.3.2 Kristalna struktura

Mnoge tvari u prirodi imaju kristalnu strukturu, vidljivu po vanjskim pravilnim ploham i na prijelomima. Kod većine metala se ne može golim okom zapaziti postojanje kristala, jer su metali sastavljeni od velikog broja sitnih kristala. Naziv kristal dolazi od grčkog *kristallos*-led, kremen prozirac.

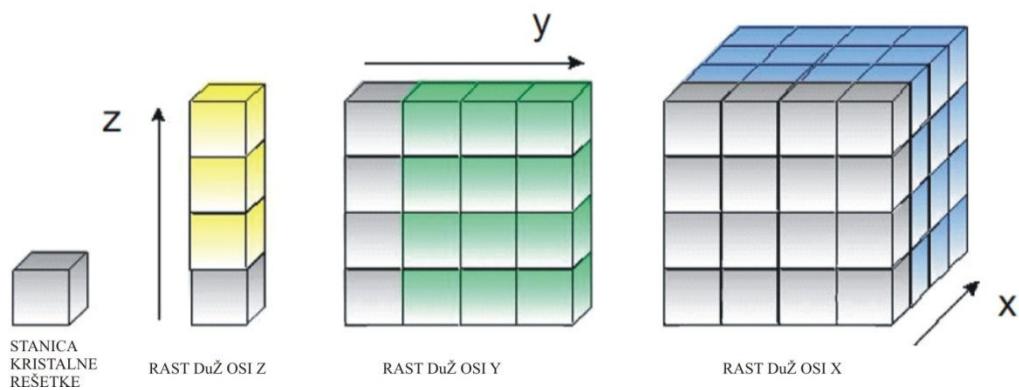
Brojne su vrste i podvrste kristalnih rešetki. Metali najčešće imaju dva tipa, i to kubni i heksagonski.

Kristal se može predočiti tako da u njegovoј unutrašnjosti zamislimo koordinatni sustav, a duž svake osi nanizane ione. Ove osi nazivamo kristalografske osi. Međusobna udaljenost iona naziva se parametrom. Red veličine je  $10^{-10}$  [m], a radi praktične primjene koristi se i jedinica 1 angstrom [A], prema fizičaru Angstromu). Parametri su nepromjenjivi duž pojedine osi zamišljenog koordinatnog sustava, ali ne moraju biti jednakvi za pojedine osi.

Spajajući linijama sva središta iona unutar kristala, dolazimo do prostornih mreža. Radi preglednosti prikazivanja ne crta se cijela mreža rešetke nego samo jedan element koji dobivamo tako što spojimo međusobno najbliže ione (*slika 1.11.*). Takav se element rešetke zove stanica kristalne rešetke.



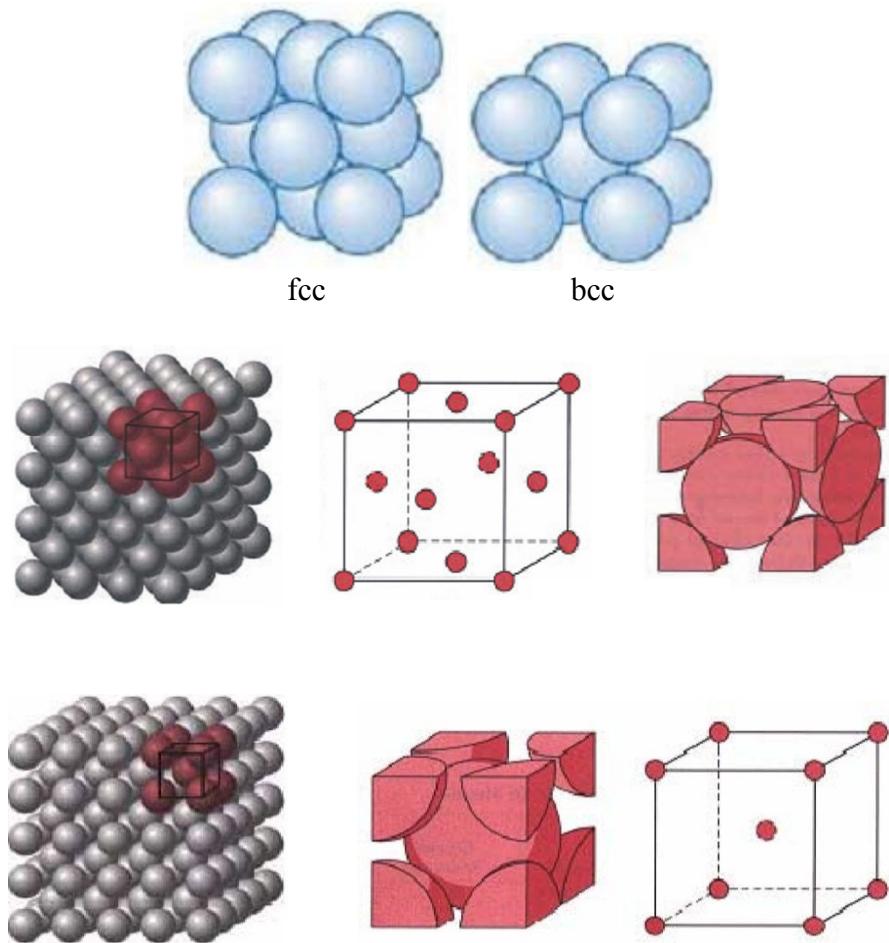
**Slika 1.11.** Definiranje kristalne rešetke



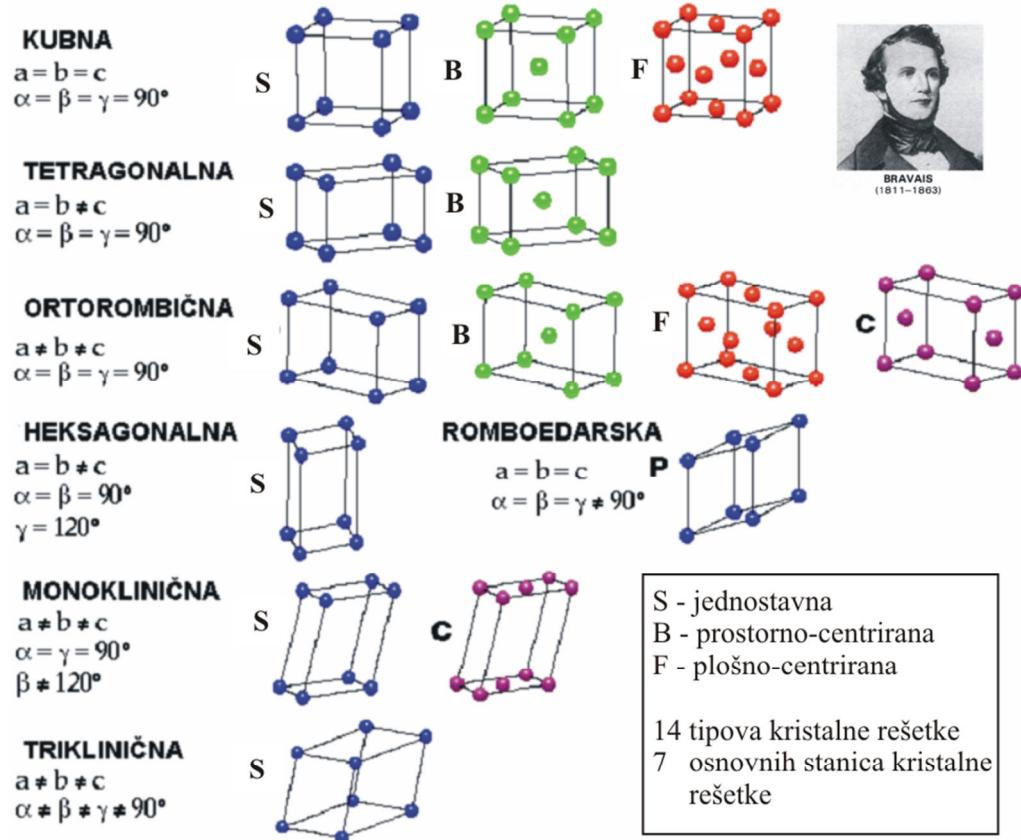
*Slika 1.12. Nastajanje kristalne rešetke*

### 1.3.3 Geometrijske karakteristike kristalne rešetke

Kubna rešetka se najčešće sreće kod metala. Ona ima tri kristalografske osi pod pravim kutom među njima i s jednakim parametrima uzduž svake osi. To je jednostavna kubna rešetka.



*Slika 1.13. Plošno i prostorno centrirana kubna rešetka*



*Slika 1.14. Podjela kristalnih rešetki po Bravais-u*

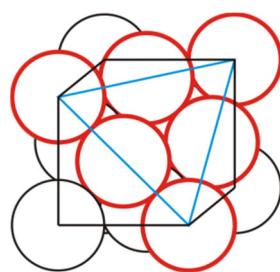
U stvarnosti postoje složeniji oblici kubne rešetke, i to s ubačenim atomima u središta ploha, te s ubačenim atomom u središtu kuba, *slika 1.13*.

Kubna rešetka s atomima u središta ploha naziva se plošno centrirana kubna rešetka, a često se označava kraticom "fcc" (od engl. face centered cube).

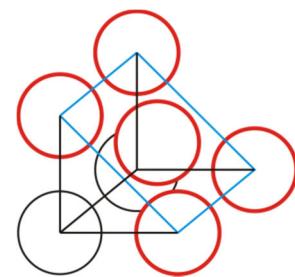
Kubna rešetka s atomom u središtu kuba naziva se prostorno centrirani kub i označava se kraticom "bcc" (od engl. body centered cube).

Broj atoma koji pripadaju kristalnoj rešetki određuje se zbrajanjem pripadnih dijelova pojedinoj rešetki, jer pojedini atom dijele nekoliko rešetki. Kod kubne rešetke svaki atom na vrhu kuba pripada za 1/8 jednoj rešetki, što za svih osam atoma u vrhovima rešetke daje 1 atom po rešetki. Plošno centrirani kub ima još na svakoj plohi po 1/2 atoma koji pripada rešetki, što za 6 ploha daje ukupno (1+3) atoma po rešetki fcc kuba. Kod prostorno centriranog kuba dolazi po 1 atom u sredini svake rešetke, pa je ukupan broj atoma u bcc rešetki (1+1).

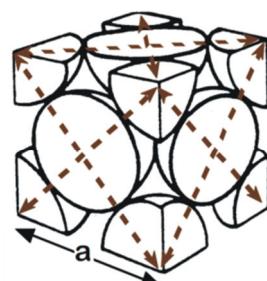
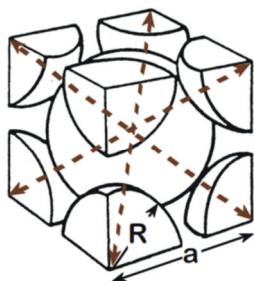
Ravnine najgušće zaposjednutosti atomima u rešetki predstavljaju plohe u kojima su atomi gušće smješteni. Na *slikama 1.15 i 1.16* prikazani su slučajevi plošno i prostorno centriranog kuba. Osim ravnina najgušće zaposjednutosti postoje i pravci najgušće zaposjednutosti, na kojima su bliže smješteni atomi (*slika 1.17*).



**Slika 1.15.** Ravnine i pravci najgušće zaposjednutosti kubne fcc

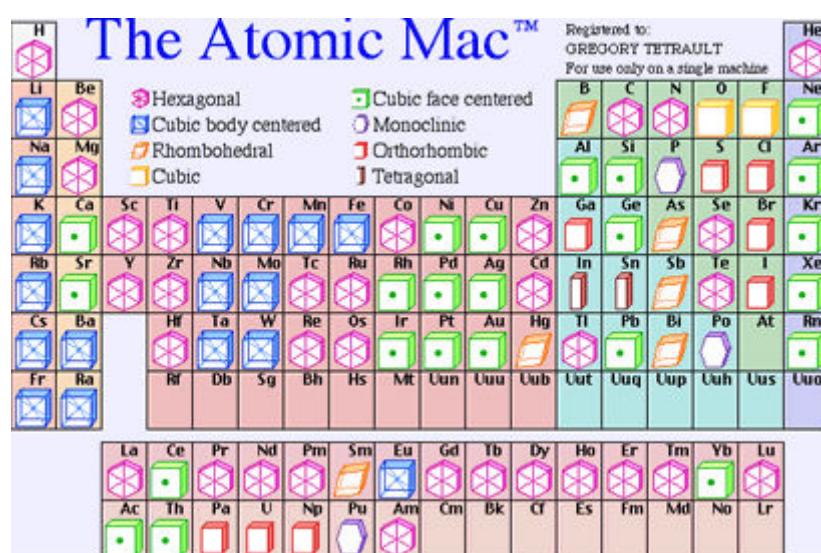


**Slika 1.16.** Ravnine i pravci najgušće zaposjednutosti kubne bcc rešetke



**Slika 1.17.** Pravci najgušće zaposjednutosti kod plošno i prostorno centrirane kubne rešetke

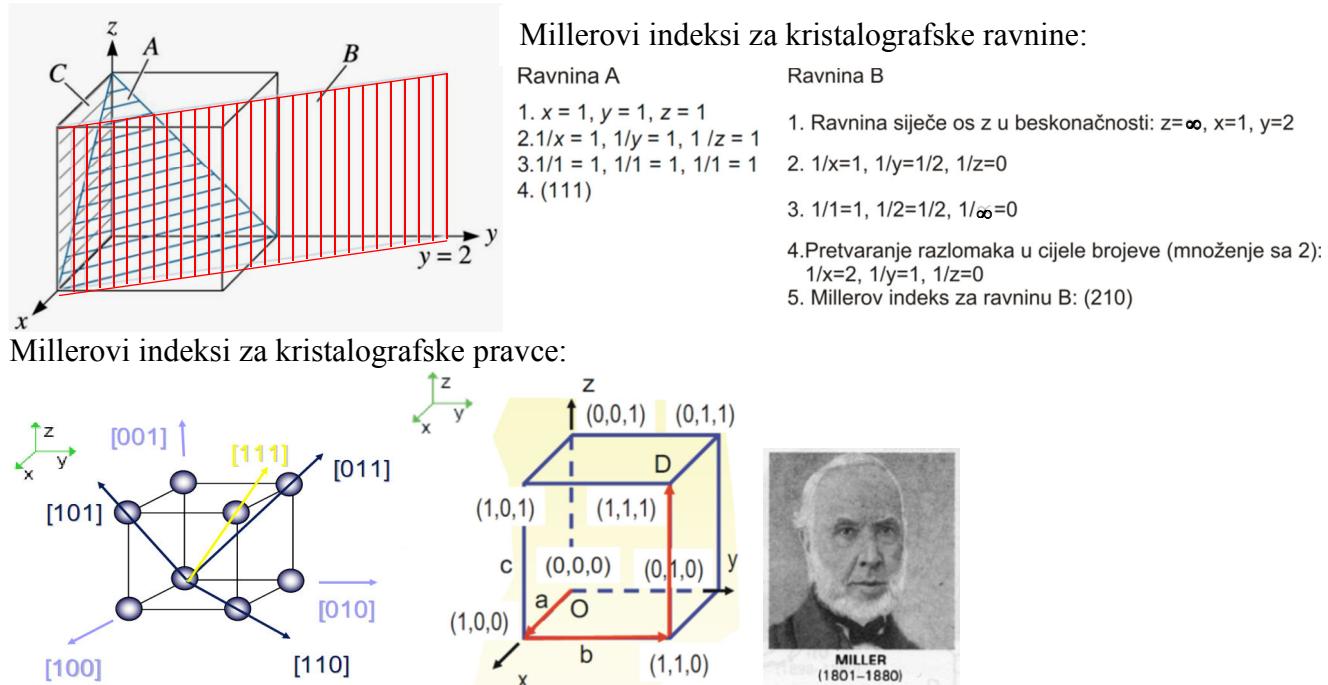
U svakoj rešetki postoji i određeni prazni prostor, ovisno o pakiranju atoma u rešetku. Za rešetku se može ocijeniti udio pravnog prostora preko pokazatelja gustoće, "g", koji predstavlja omjer volumena atoma koji pripadaju rešetki i volumena rešetke, pri čemu se atomi promatraju kao kugle koje se međusobno dodiruju. Poznavanje pojave različite popunjenoštvi kristalne rešetke olakšava poimanje skokovitih promjena volumena prilikom promjene kristalne rešetke. Plošno centrirani kub je gušće popunjen od prostorno centriranog kuba, dok je kompaktni heksagon jednako popunjen kao i plošno centrirana kubna rešetka. Broj pravaca i ravnina najgušće zaposjednutosti u kristalnoj rešetki bitno utječe na mehanička svojstva kristala. Rešetke s većim brojem tih ravnina i pravaca lakše se plastično deformiraju.



**Slika 1.18.** Rešetke elemenata pri sobnim temperaturama

Plošno centrirana kubna rešetka ima četiri ravnine i šest pravaca, prostorno centrirani kub ima 4 pravca, a heksagonska rešetka ima gusto zaposjednute baze.

U kristalografiji se označavanje kristalnih ravnina izvodi Millerovim indeksom. Mjerilo je parametar rešetke, a Millerov indeks predstavlja recipročnu vrijednost odsječka kristalografske ravnine na koordinatnom sustavu rešetke. Na *slici 1.19.* pokazano je označavanje indeksima ravnina i pravaca za kubnu rešetku. Ravnina A označena je (111), a ravnina B Millerovim indeksom (210). Osim označavanja ravnina, ovim indeksima označavaju se i kristalografski pravci. Oni nose iste indekse kao i ravnine na koje su okomiti.

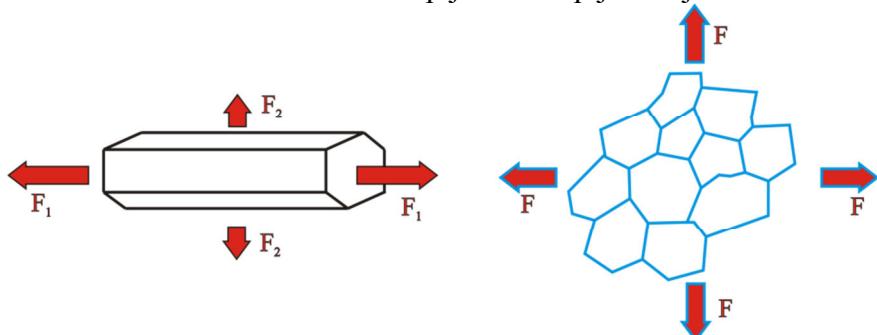


*Slika 1.19. Označavanje kristalografskih ravnina i pravaca Millerovim indeksima*

### 1.3.4 Usmjerenošć svojstava kristalnih rešetki

Postojanje ravnina i pravaca najgušće zaposjednutosti ukazuje da kristalna rešetka ima barem neka svojstva ovisna o ravnini i pravcu na kojima se mijere. Ovo vrijedi naročito za mehanička svojstva. Kristali pokazuju velike razlike u elastičnim i plastičnim svojstvima ovisno o smjeru djelovanja sile. Ova različitost svojstava zove se anizotropija i posebno je izražena kod monokristala. U praksi se najviše koriste tvari sastavljene od velikog broja kristalnih zrna (polikristalni materijal) koje pokazuju kvazi izotropna svojstva. Zbog velikog broja zrna dobiva se svuda prosječna vrijednost svojstava u bilo kojem smjeru.

Polikristalni materijali mogu postati anizotropni kod pojedinih načina skrućivanja iz taline, toplinske i mehaničke obrade. Prikaz anizotropije i izotropije dan je na *slici 1.20.*



*Slika 1.20. Anizotropija monokristala i kvazi izotropija polikristala*

## 2 Nepravilnosti kristalnih rešetki

U prethodnom poglavlju iznesene su idealizirane kristalografske predodžbe. Za čiste se metale pretpostavlja kao da je građa rešetke potpuno pravilna. U praksi se daleko češće koriste legure metala u kojima se javljaju atomi različitih promjera, što onemogućava idealne kristalografske strukture.

Neke pojave u metalima ukazuju da postoji nekoliko vrsta nepravilnosti kristalnih rešetki, koje bitno utječu na svojstva metala:

- Usporedbom kohezivnih sila iz proračuna i mjerjenih vrijednosti sila za raskidanje materijala opaža se da su naprezanja za postizanje loma kod realnih materijala skoro 100 puta niža od teorijski moguće vrijednosti. Ovdje nije greška u teoriji, nego u nepravilnostima rešetke koje smanjuju čvrstoću.
- Neka svojstva metala mijenjaju se pod djelovanjem neutronskog zračenja, što znači da dolazi do oštećenja strukture.
- Mehanička svojstva metala mogu se bitno mijenjati djelovanjem topline i mehaničke deformacije.

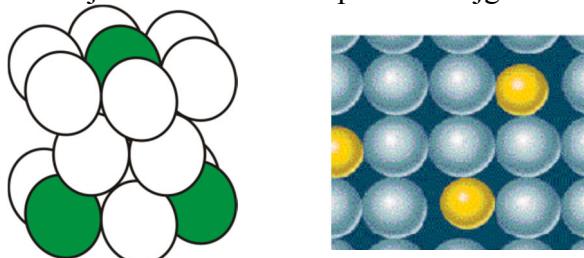
Ova, a i druga zapažanja, doveli su do zaključka da u kristalnoj strukturi metala postoje nepravilnosti, koje utječu na spomenute pojave. To su:

- lokalne ili točkaste nepravilnosti
- linearne nepravilnosti (u određenoj liniji)
- plošne nepravilnosti.

### 2.1 Lokalne (točkaste nepravilnosti)

U praksi nije moguće dobiti potpuno čisti metal jednog elementa. Strani atomi utječu na izobličenje ili distorziju kristalne rešetke matičnog elementa.

Ako su strani atomi slične veličine, dolazi do razmicanja susjednih atoma u rešetki kad je strani atom veći, odnosno do skupljanja, kad je strani atom manji, (*slika 2.1.*). Ovakva deformacija rešetke narušava cjelovitost ravnina i pravaca najgušće zaposjednutosti.

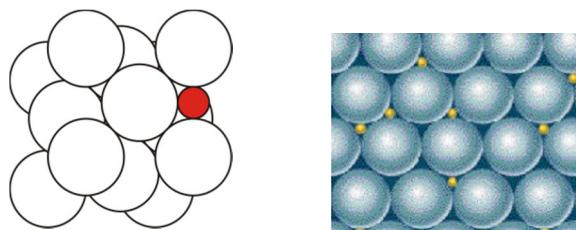


*Slika 2.1. Zamjenski kristal mješanac (primjer: zamjensko legiranje Cu u Ni)*

Kristali kod kojih dolazi do zamjenjivanja atoma u vrhovima rešetki nazivaju se zamjenski ili supstitucijski kristali mješanci.

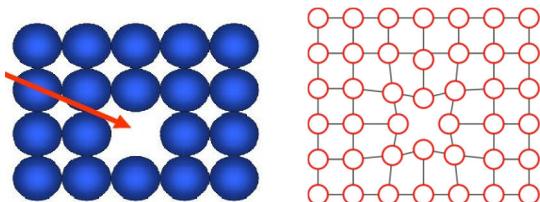
Kada su atomi primjesa bitno različitog elementa po svojstvima od matičnih atoma, a ujedno manjih dimenzija, dolazi do uključivanja atoma u slobodne međuprostore kristalne rešetke, pa ovakve kristale mješance nazivamo uključinskim ili intersticijskim kristalima mješancima (*slika 2.2.*).

Nepravilnosti rešetke kod zamjenskih i uključinskih mješanaca nalazimo kod točkaste nepravilnosti, što ima utjecaja na otežavanje deformacije kristala.

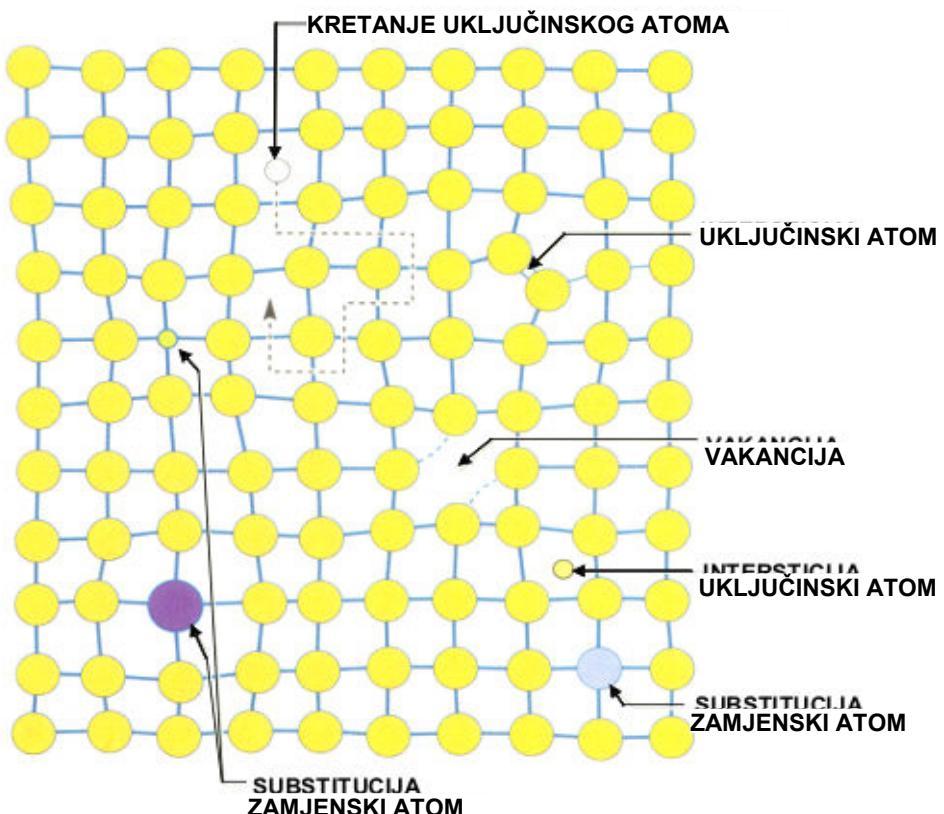


*Slika 2.2. Uključinski mješanac (primjer: uključinsko legiranje C u Fe)*

Na pojedinim mjestima kristala mogu nedostajati atomi zbog nepotpunjavanja prostora prilikom skrućivanja. Ovakva prazna mjesta nazivaju se **vakancije**. Seljenje atoma u krutnini tj. difuzija, u najvećoj mjeri se odvijaju preko vakancija. Zagrijavanjem metala raste broj vakancija. Ovi točasti defekti povećavaju i električni otpor u metalu jer narušavaju homogenost elektronskog oblaka. Oko vakancije dolazi do distorzije rešetke zbog skupljanja susjednih atoma, kao na slici 2.3.



*Slika 2.3. Vakancije u rešetki i distorzija rešetke oko vakancije*

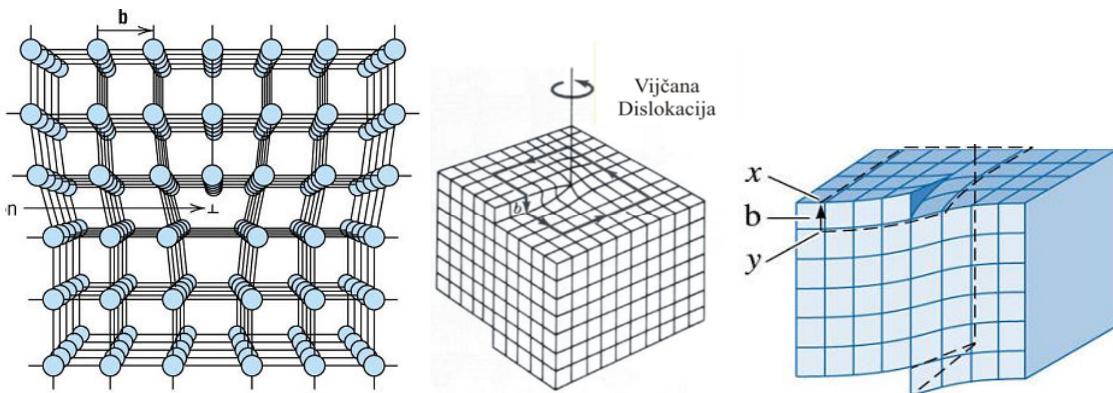


*Slika 2.4. Kombinacija nepravilnosti u kristalnoj strukturi*

## 2.2 Linearne nepravilnosti-dislokacije

Linearne nepravilnosti su područja u kojima u nizu nedostaju atomi. Naziv dolazi od latinskog *dislocare* (premjestiti). Duljina dislokacija iznosi do nekoliko stotina parametara rešetke, a može biti u pravcu (kutna) ili se spiralno penjati (vijčana). Utjecaj dislokacija je izuzetno velik na mehanička svojstva materijala, naročito na plastičnu deformaciju.

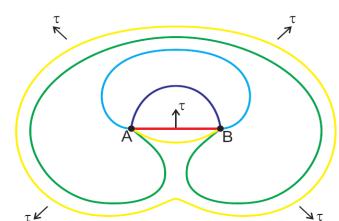
Dislokacije nastaju prilikom skrućivanja kada se susretnu kristalne ravnine od kojih je s jedne strane jedna manje, kako je pokazano na *slici 2.5* lijevo.



*Slika 2.5. Nastanak kutne i vijčane dislokacije*

Vijčana dislokacija nastaje spiralnim rastom kristala – *slika 2.5* desno. Od teorijskog modela dislokacija kojim je objašnjen nerazmjer između teorijske i stvarne čvrstoće metala, do eksperimentalnog utvrđivanja postojanja dislokacija pomoću elektronskog mikroskopa, proveden je ogroman istraživački rad o svojstvima i ponašanju dislokacija.

Gustoća dislokacija je broj dislokacija izmјeren na jediničnoj mjerenoj površini. Kod idealnog kristala gustoća dislokacija bila bi jednaka nuli, kod skrunutih i sporo hlađenih ili dugotrajno žarenih metala, gustoća iznosi oko  $10^6$  dislokacija/cm<sup>2</sup>. Hladnjim gnječenjem metala povećava se gustoća do  $10^{12}$  cm<sup>2</sup>. Žarenjem metala, kojem je gnječenjem povećana gustoća dislokacija, može se smanjiti broj dislokacija. Množenje dislokacija nastaje pod djelovanjem vanjskih mehaničkih sila. Postoje brojna tumačenja ove pojave, a najjednostavnije je preko prvotnog modela po Frank-Readu (*slika 2.6.*). Dislokacije se umnažaju na izvoru koji predstavlja dislokacije duljine " $\overline{AB}$ ". Pod djelovanjem sile linija dislokacije se izbočuje do formiranja prstena oko izvora. Dalnjim djelovanjem sile proces se ponavlja.



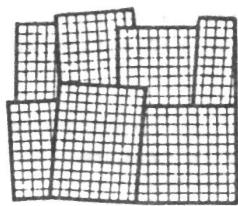
*Slika 2.6. Frank-Readov izvor dislokacije*

Ovo je jednostavno matematičko objašnjenje fizikalne pojave u kojoj se prazni prostor promatra kao nit. Pojave kod složenijih oblika dislokacija su znatno komplikiranije. Mobilnost dislokacija ovisi o njihovoj duljini i preprekama na koje nailaze. Ove prepreke mogu biti distorzije rešetke izazvane stranim atomima, vakancije i fine izlučene strukture. Dislokacije se mogu poništavati sudaranjem, ali i zaplitati. Izlaskom dislokacije na slobodnu površinu ili u granicu između kristalnih zrna dislokacija isčezava.

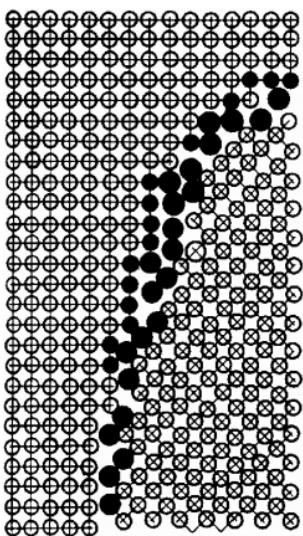
## 2.3 Plošne nepravilnosti

Plošne nepravilnosti nastaju u mikro volumenima koji imaju međusobno neznatnu razliku o orijentaciji blokova, do  $1/2$  lučne sekunde. Ovakva struktura naziva se mozaična, a prikazana je na *slici 2.7*. Na granicama između blokova nalaze se dislokacije koje nastaju zbog razlike u orijentaciji blokova.

Znatno veće plošne nepravilnosti predstavljaju granice između kristalnih zrna u polikristalnom materijalu. Orijentacija pojedinih kristala se razlikuje i desecima lučnih stupnjeva.



*Slika 2.7. Mozaična struktura*



*Slika 2.8. Granica zrna*

Na granicama zrna u sloju od nekoliko parametara kristalne rešetke nema pravilnog rasporeda atoma. Izgled je sličniji amorfnom stanju, a na tim granicama izlaze i brojne dislokacije kao na *slici 2.8*.

Do sada opisani defekti strukture odnose se na nepravilnosti dimenzija bliskih veličini atoma. Veće nepravilnosti, šupljine, pukotine, uključci drugih tvari spadaju u nehomogenosti metala, a mogu biti od mikroskopskih dimenzija do šupljina veličine lopte i pukotina dugačkih više metara.

### 3 Deformacija i lom metala

#### 3.1 Deformacija metala

Ako se komad metala optereti mogu se primijetiti deformacije. Povećanjem sile raste i deformacija. Nakon neke postignute veličine sile, deformacija raste brže od porasta sile i konačno dolazi do loma ako naprezanje u metalu pređe vrijednost čvrstoće materijala  $R_m$ . Neki materijali pokazuju sve ove faze ponašanja pod opterećenjem, dok neki pokazuju samo jednu od ovih faza. Prilikom rasterećenja metala može se zapaziti da se metal (eventualno) vraća u prvobitni oblik. Ukoliko je naprezanje bilo preveliko, nakon rasterećenja ostaje trajna deformacija.

Elastična deformacija nastaje ako se dimenzije nakon rasterećenja materijala vraćaju na prvobitne vrijednosti (prije djelovanja opterećenja). Ovu zakonitost je prvi obradio R. Hooke u 17. stoljeću i izrazio je formulom:

"Ut tensio sic vis", ili kako se danas piše:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \text{ [N/mm}^2\text{][MPa]}$$

gdje je:

$\sigma$  = elastično naprezanje, [N/mm<sup>2</sup>]

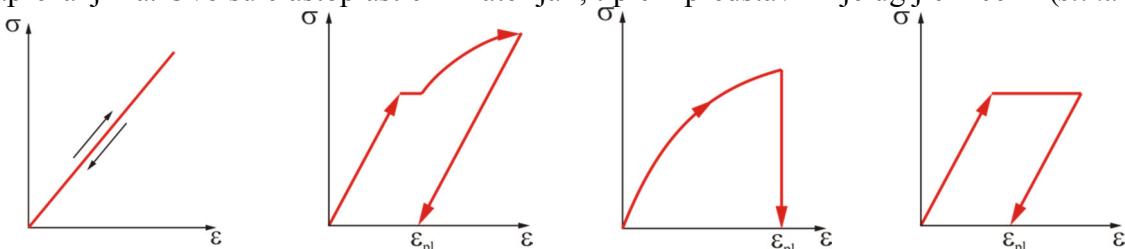
$E$  = modul elastičnosti, [N/mm<sup>2</sup>], nazvan Youngov modul (za rastezanje)

$\epsilon$  = deformacija [%].

Materijal opisan Hookeovim zakonom je idealno elastični materijal, prikazan je na *slici 3.1.* Ovakvo ponašanje pokazuju krhki materijali (zakaljeni čelik, sivi lijev).

Materijal koji bi nakon svakog opterećenja pokazivao trajnu deformaciju je idealno plastični materijal (*slika 3.2.*) Ovako se ponašaju neki čisti metali i legure (bakar, aluminij).

Većina materijala pokazuje najprije područje elastičnosti, a zatim plastičnosti pri višim naprezanjima. Ovo su elastoplastični materijali, tipični predstavnik je ugljični čelik (*slika 3.3.*)



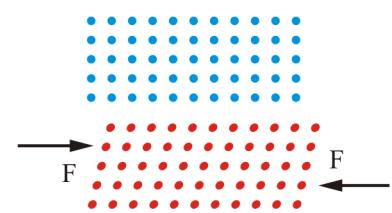
*Slika 3.1. Idealno elastični materijal*

*Slika 3.2. Idealno plastični materijal*

*Slika 3.3. Elasto-plastični materijal bez očvršćenja sa očvršćenjem*

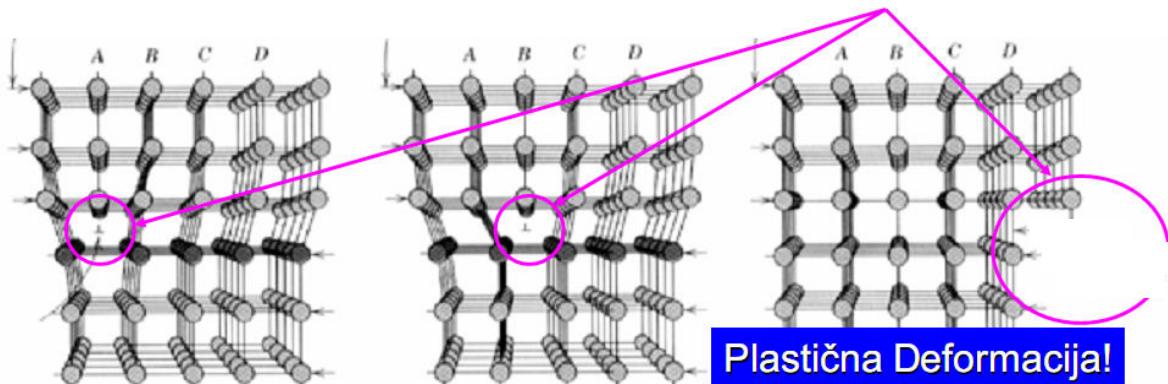
Ove vidljive pojave kod deformacije metala moguće je objasniti utjecajem nepravilnosti kristalne rešetke na ponašanje metala pod opterećenjem.

Djelovanje sile na metal može se promatrati na kristalnom bloku na *slici 3.4.* Privlačne sile između atoma možemo zamisliti kao elastične opruge koje drže atome na okupu. Neka na dvije suprotne ravnine djeluje sila F. Pod djelovanjem sile pomiču se ravnine što izaziva rastezanje opruga. Najveći otpor prema rastezanju nastaje kada se atomi



*Slika 3.4. Deformacija idealnog kristala*

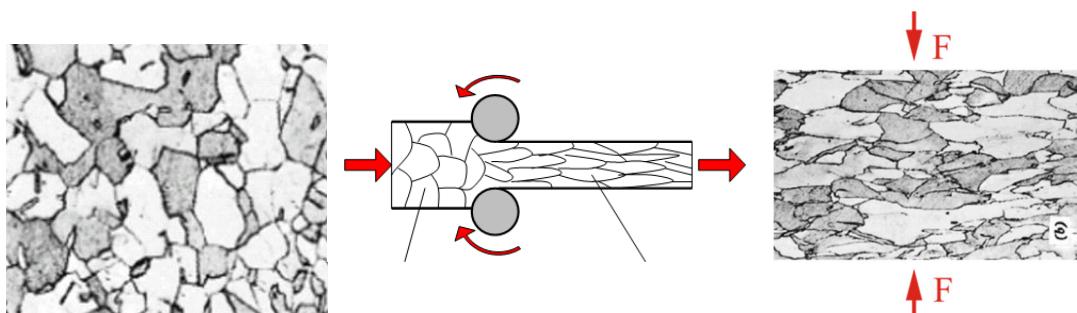
pomaknu za polovicu međusobnog razmaka, tada je rastegnutost opruge najveća. U ovom položaju postaje svejedno na koju će se stranu ostvariti veza, pa se red atoma sada pomiče za jedan korak, a veze se uspostavljaju s novim atomima (ove "opruge" su zamjena za sile kojima elektronski oblak držiione na okupu). Na ovaj način deformacija se do polovice razmaka odvija kao elastična, a nakon toga kao plastična. U deformiranju sudjeluju svi atomi, a potrebne sile bile bi vrlo velike za svladavanje veza svih atoma istodobno. U stvarnim kristalima, s obzirom na veliku gustoću dislokacija, deformiranje se odvija klizanjem dislokacije uzduž ravnine klizanja. Veza među atomima se na mjestu dislokacije lako prebacuje s atoma na atom dok dislokacija ne izade na suprotnu stranu bloka (slobodna površina ili granica zrna), kao na *slici 3.5.*



*Slika 3.5. Deformacija kristala s dislokacijom*

Vidljivo je da mobilnost dislokacija bitno utječe na mogućnost deformiranja tako da se mnogi tehnološki postupci očvršćivanja materijala svode na blokiranje dislokacija u metalu.

Plastična deformacija vidljivo mijenja vanjski oblik metalnog predmeta, a mijenja se i oblik kristalnih zrna. U pravilu zrna postaju usmjerena i usitnjena uslijed plastične deformacije (slika 3.6.) Postoji granična plastična deformacija nakon koje se zrno toliko usitni da dolazi do drobljenja ili loma metala.



*Slika 3.6. Promjena oblika zrna hladnom deformacijom*

Jedan primjer očvršćenja i loma zbog pretjerane plastične deformacije je previjanje žice. Većina metala izdrži jedva nešto više od deset previjanja do loma zbog velikih izmjeničnih plastičnih deformacija.

Deformiranje izobličuje kristalna zrna, umnaža dislokacije i stvara druge strukturne nepravilnosti. Osim toga, u metalu zaostaju elastično rastegnuta i stlačena područja. Suma naprezanja koju izazivaju ove elastične deformacije jednak je nuli i prema vani nema nikakvog djelovanja, pa se ova naprezanja zovu unutarnja naprezanja. Ova unutarnja naprezanja zbrajaju se s vanjskim naprezanjima i mogu izazvati lokalnu plastičnu deformaciju.

Elastična energija sadržana u metalu s unutarnjim naprezanjima predstavlja zbroj energija u elementarnim volumenima:

$$Q = \int \frac{1}{2} \sigma \cdot \varepsilon \cdot dV$$

gdje je:

$\sigma$  - naprezanje [MPa]

$\varepsilon$  - elastična deformacija.

Ova unutrašnja energija može u nekim slučajevima inicirati i širiti pukotine kroz materijal i pretvarati se uglavnom u energiju slobodnih površina raskinutih ploha i akustičke vibracije (prasak pri lomu).

Do sada je naglašavano da je mehanička deformacija provođena u hladnom stanju. U tom slučaju je difuzija vrlo slaba i nema promjene strukture nakon deformiranja. Ukoliko se deformirani metal naknadno zagrijava, utoliko dolazi na nižim temperaturama do oporavka strukture, tj. do smanjenja gustoće dislokacija, djelomične difuzije te do sređivanja mozaičnih blokova unutar kristalnih zrna. Ove promjene nisu vidljive optičkim mikroskopom, nego se odražavaju smanjenjem električnog otpora i neznatnim padom tvrdoće u većini slučajeva.

Ukoliko temperatura znatnije poraste, ali ne dođe do temperatura alotropskih modifikacija, utoliko se javlja rekristalizacija, tj. preoblikovanje kristalnih zrna (bez promjene kristalne rešetke).

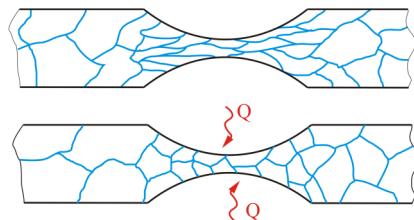
Za većinu metala temperatura rekristalizacije je  $T_r$  oko  $0.5 T_t$  ( $T_t$  = temperatura taljenja u stupnjevima Kelvina).

Zrna izduljena plastičnom deformacijom imaju veću površinu od zrna poliedarskog oblika, a time i veću površinsku energiju. Povišena temperatura omogućava mobilnost granica pa se izduljena zrna razdvajaju na više manjih kuglastih zrna, od kojih svako ima manju površinsku energiju. Ovako se rekristalizacijom dobiva materijal izotropnijih svojstava od anizotropnog deformiranog materijala.

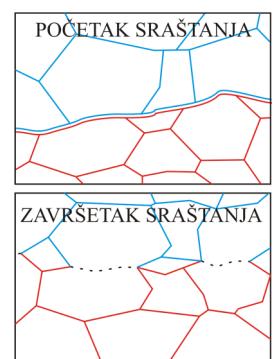
Zagrijavanjem na temperaturu veću od  $T_r$  dolazi do postepene koagulacije manjih zrna u velika zrna, pri čemu se apsorbiraju granice zrna, a atomi primjesa difundiraju prema novonastalim granicama. Gustoća dislokacija pada, ali broj vakancija raste. Kod jako visokih temperatura zrna mogu toliko narasti da plastičnost metala jako padne.

Pokrupnjenje zrna je posebno izraženo kod čistih metala, dok kod legura nije moguće pretjerano smanjiti broj zrna zbog toga što atomi primjesa migriraju prema granicama zrna i blokiraju koagulaciju.

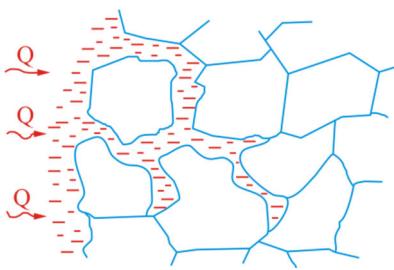
Na visokim temperaturama, uz dovoljan stisak ploha, dolazi do srastanja čistih metalnih površina. Zrna sa suprotnih ploha u dodiru će srasti i apsorbirati zajedničke granice (slika 3.8.). Zagrijavanjem metala blizu temperature taljenja  $T_t$  moguće je taljenje po granicama između zrna, gdje je inače metal nižeg tališta (skrućuje se posljednji). U nekim slučajevima ovo međugranično taljenje izaziva pukotine između zrna (slika 3.9.).



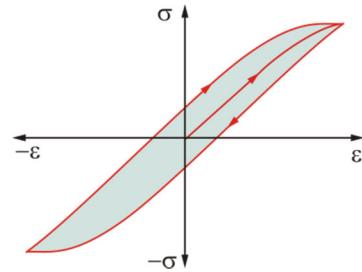
Slika 3.7. Utjecaj zagrijavanja na deformirani metal



Slika 3.8. Srastanje



*Slika 3.9. Taljenje između zrna*



*Slika 3.10. Mehanička histereza kod promjenljivih opterećenja*

Osim stalnog opterećenja, moguća su vremenski promjenljiva opterećenja. Pri tome se preciznim mjeranjem može utvrditi da deformacija kasni u fazi za djelovanjem sile, pa se javlja mehanička histereza (*slika 3.10.*). Za periodički promjenljiva opterećenja može se napisati:

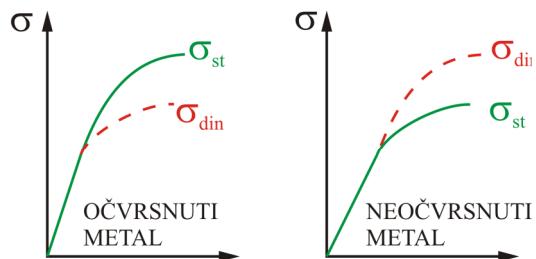
$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 e^{i\omega t} [\text{MPa}] && \text{ali vrijedi i} \\ \varepsilon &= \varepsilon_0 e^{(i\omega t + \varphi)} && \text{gdje je: } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f\end{aligned}$$

gdje su:

- $\sigma_0$  i  $\varepsilon_0$ , maksimalne amplitude naprezanja i deformacije u ciklusu opterećenja;
- $\sigma$  i  $\varepsilon$ , naprezanje i deformacije u trenutku  $t$ ;
- $\varphi$ , fazni pomak kašnjenja deformacije za naprezanjem;
- $t$ , vrijeme;
- $\omega$ , kružna frekvencija promjenjivog opterećenja;
- $f$ , vlastita frekvencija promjenjivog opterećenja.

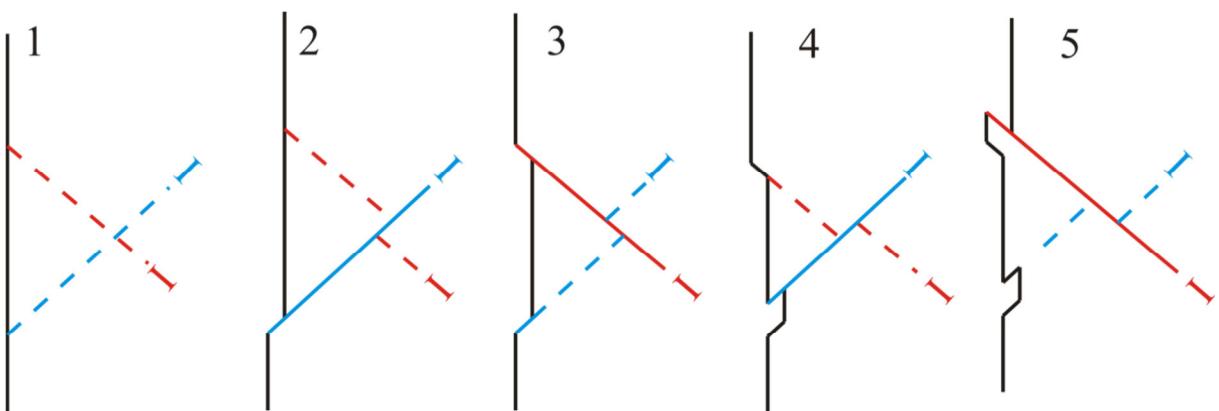
Prigušenje vibracija u metalu nastaje uglavnom pretvorbom mehaničke energije u toplinsku. Kod vrlo visokih frekvencija može doći do zagrijavanja materijala ako je odvođenje topline slabo. Ovaj slučaj je posebno izražen kod polimernih materijala koji slabo odvode toplinu.

Promjenljiva naprezanja izazivaju oscilacije dislokacijskih linija. Dislokacije se gomilaju u jednom smjeru, a zatim u drugom. Ovo izaziva kod očvrstnih metala sniženje granice elastičnog ponašanja, dok kod neočvrstih, svježih metala, to izaziva povišenje granice elastičnosti. Pojavu je prvi opisao Johann Bauschinger u 19. stoljeću, pa se po njemu i naziva (*slika 3.11.*)



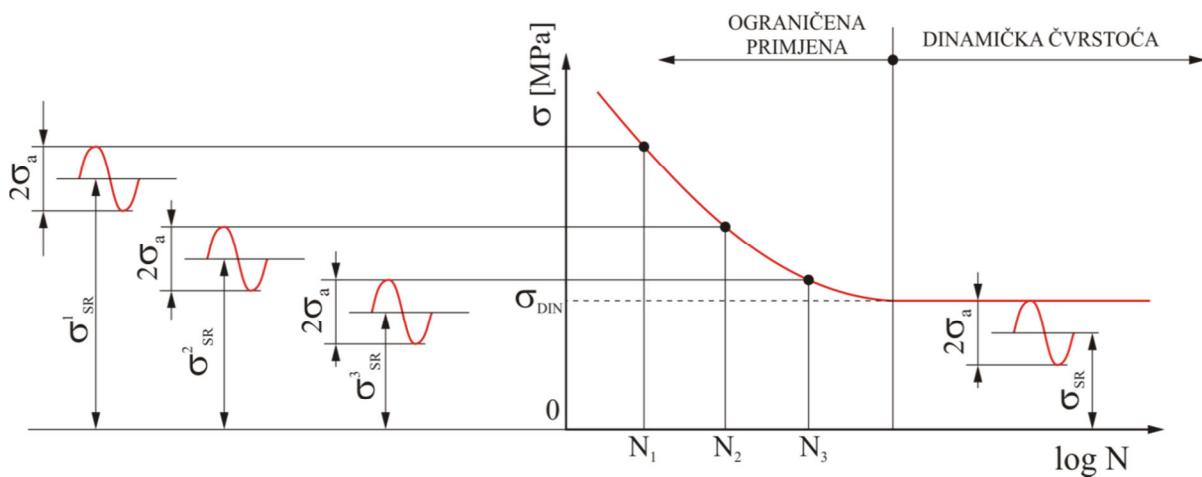
*Slika 3.11. Bauschingerov efekt*

Učestalom izmjenom opterećenja mogu se pojaviti mikropukotine koje se kasnije šire sa svakim ciklusom opterećenja. Ova pojava naziva se **zamor** materijala. Česta je kod konstrukcija s naglim promjenama presjeka, površinskim ogrebotinama, hrapavostima kao posljedicom obrade. Međutim i kod vrlo glatkih poliranih površina može doći do pojave zamora. Izmjenično opterećenje gomila dislokacije prema slobodnim površinama, gdje dolazi do izbacivanja mikrostopenica (*slika 3.12.*) na kojima započinje mikropukotina.

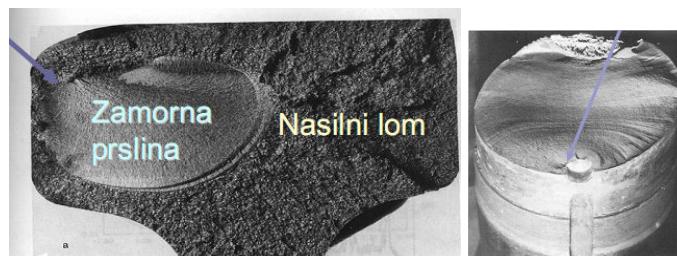


*Slika 3.12. Prikaz nastanka pukotine od zamora na glatkoj površini (prema Cotrell, A. H. i Hull, D.: Proc. R. Soc., A242, 211, 1957. )*

Razvojem brzohodnih strojeva zapažena je pojava lomova i pri naprezanjima unutar elastičnog područja ponašanja metala. Ove pojave analizirao je Fridrich Woehler koncem XIX. stoljeća i prikazao ih u dijagramu amplituda naprezanja - broj promjena opterećenja. Woehlerov dijagram s koordinatama  $\sigma$  -  $\log N$  ( $N$  = broj promjena opterećenja) prikazan je na *slici 3.13.* Vidljiva je razlika između izdržljivosti uzorka s glatkom i hrapavom površinom te između čelika i aluminija. Za nas je zanimljivo ono naprezanje kod kojeg je broj promjena opterećenja beskonačan. Kako se ispitivanja ne mogu produžiti do beskonačnosti usvojen je broj izmjena  $10 \cdot 10^6$  za čelik i  $100 \cdot 10^6$  za aluminij. Najveće naprezanje pri kojem je materijal izdržao usvojeni broj izmjena naziva se **dinamička izdržljivost** ili **granica umora**.



*Slika 3.13. Woehlerov dijagram, shematski prikaz*

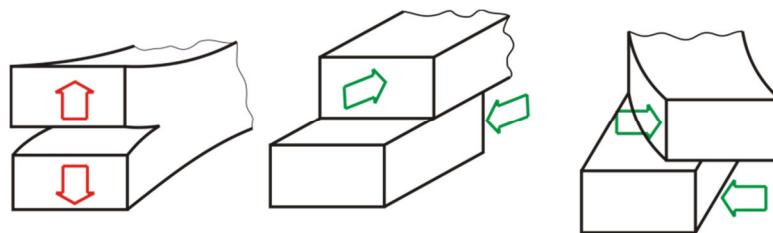


*Slika 3.14. Izgled površine prijeloma zbog dinamičkog opterećenja*

### 3.2 Lom materijala

Lom materijala je najgori slučaj inženjerske prakse, jer može imati katastrofalne posljedice za ljude i okoliš. Nakon katastrofa nekih velikih konstrukcija u prvoj polovici XX. stoljeća lomovi su se počeli detaljnije izučavati. Rezultati tih istraživanja omogućili su izradu i korištenje prilično sigurnih konstrukcija.

Lom nastaje kada opterećenje nadavlada kohezivne sile čestica tvari.



Slike 3.15. Lom trganjem i lom smicanjem

Na mjestima prijeloma nastaju nove slobodne površine s razdvojenim vezama između čestica. Uzroci povećanja naprezanja do prekida veza mogu biti različiti. U mikroprostoru gdje se lom događa postoje uglavnom dva vida razdvajanja materijala, i to trganjem i smicanjem (*slika 3.15.*) Lom trganjem nastaje kada je ravnina loma okomita na smjer djelovanja sile. U tom slučaju veliki broj veza prekida se istodobno, a pukotina se širi bez vidljive deformacije. Ukupni utrošak energije je malen. Ova vrsta loma karakteristična je za krhke materijale (staklo, keramika, zakaljeni čelik, sivi lijev).

Drugi način odvajanja čestica materijala je smicanjem sloja po sloju. U ovom slučaju se veze između atoma samo premještaju, a posljedica je klizanje čitavih blokova, deformacija kristalnih zrna, te vidljiva plastična deformacija na površini. Plastična deformacija na mnogim kliznim ravninama zahtijeva veliku količinu energije, tj. otpor na lom je velik.

Ovakve materijale nazivamo žilavima, a tipični predstavnik je ugljični čelik. Nažalost, na žilavost ovog materijala izrazito djeluje temperatura, tako da hlađenjem ispod neke kritične temperature do tada žilava konstrukcija postaje krhka.

U mnogim slučajevima lom ne nastaje odjednom, nego započinje na inicijalnoj pukotini. Ova pukotina može nastati gomilanjem dislokacija uslijed hladnog gnječenja, zamora, korozije, unutrašnjih naprezanja i slično. U povoljnim uvjetima inicijalna pukotina raste do postizanja kritične dimenzije, kada dolazi do brzog širenja pukotine.

Vrijeme nastajanja inicijalne pukotine može biti i dugo i kratko, ovisno o činiteljima. Širenje do kritičnih dimenzija zavisi od načina opterećenja i broja ciklusa promjena opterećenja. Konačni lom je brz i nastaje kada se nadavlada statička čvrstoća konstrukcije ili kada padom temperature toliko padne žilavost da postojeća naprezanja rastrgaju materijal.

Konstrukcije koje mogu ugroziti okoliš i ljudske živote izrađuju se iz žilavih materijala. Tijekom izrade i korištenja podvrgavaju se pregledima radi utvrđivanja eventualnog postojanja pukotina i drugih nehomogenosti koje bi mogle inicirati lom materijala.

## 4 Skrućivanje metala

### 4.1 Pojave pri skrućivanju čistih metala

Zagrijavanjem metala raste temperatura, a ujedno se povećava i volumen. Ioni u kristalnim rešetkama nisu u stanju mirovanja nego osciliraju oko svojih srednjih položaja frekvencijom oko 10 THz, s amplitudama pomaka do 0.1 parametra rešetke. Porastom temperature povećava se energija titranja iona i kada se nadvladaju kohezivne sile dolazi do taljenja. U talini su atomi još više razmagnuti nego u krutnini i volumen taline je nekoliko postotaka veći od krutnine iste temperature.

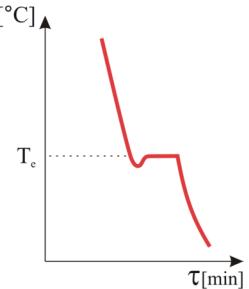
Ako talini i dalje dovodimo toplinu ona će se pregrijavati i na nekoj temperaturi iz nje se izdvajaju atomi više energije koji tvore metalne pare. Nasuprot tome, ako se talina hlađi konstantnim oduzimanjem topline (npr. hlađenje lonca na mirnom zraku) metalne pare se kondenziraju, temperatura taline pada i započinje skrućivanje, najprije po rubovima lonca, a zatim i u sredini.

Neka se promjena temperature bilježi u dijagramu temperature - vrijeme. Dobiva se krivulja hlađenja na kojoj se mogu proučavati neke pojave kod skrućivanja (*slika 4.1.*) Praćenjem pojava u talini i promjene temperature može se uočiti da se talina dosta jednoliko hlađi do početka skrućivanja, zatim nastaje zastoj u padu temperature sve dok se talina potpuno ne skrutne. Nakon toga temperatura opet dosta jednoliko pada. Temperatura na kojoj je došlo do zastoja naziva se stojište. Prilikom skrućivanja to je skrutište, a prilikom grijanja talište. U stvarnim uvjetima temperature skrutišta i tališta mogu se neznatno razlikovati zbog utjecaja brzine hlađenja (toplinska histereza).

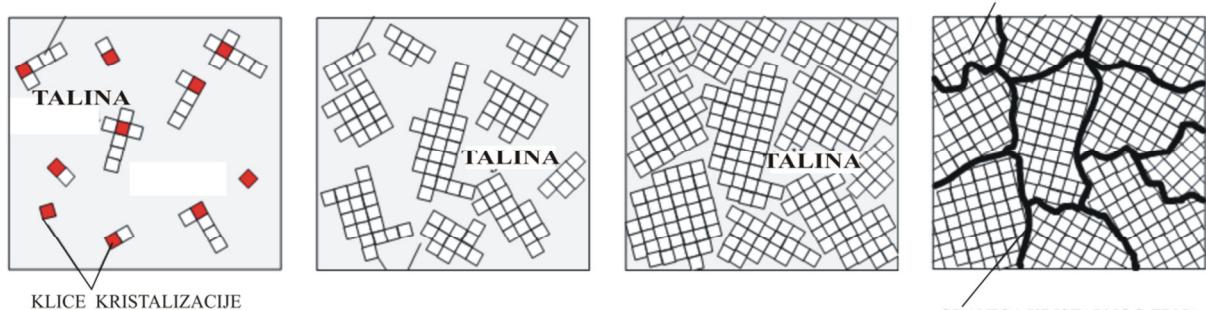
Zastoj na krivulji hlađenja nastaje zbog oslobađanja latentne topline skrućivanja, koja je svojstvena pojedinim elementima.

Znatan utjecaj na formiranje strukture ima brzina hlađenja  $v_h$ , koja predstavlja omjer pada temperature i danog vremenskog intervala:

$$v_h = \frac{dT}{dt} [K / s].$$



*Slika 4.1. Krivulja hlađenja*



*Slika 4.2. Nastanak kristala iz taline*

Sniženjem temperature do temperature skrutišta započinje kristalizacija. Kristaliti nastaju na mjestima finih nečistoća uz hladne stjenke kalupa ili na mjestima slučajnog zgušnjavanja atoma koji se zatim vezuju u kristalnu rešetku. Amplitude oscilacija atoma se smanjuju, a višak energije predaje okolini (latentna toplina skrućivanja). Kristal raste u različitim smjerovima, *slika 4.2*, ali se obično zapaža pretežni smjer rasta suprotno od smjera odvođenja topline. Kristal koji raste može se zbog cirkulacije taline lomiti na više dijelova oko kojih dalje napreduje kristalizacija. U međuprostoru između kristala nalazi se preostala talina koja

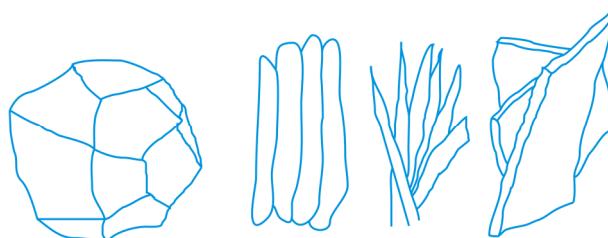
se postupno skrućuje. Na kraju ostaje krutnina s velikim brojem različito orijentiranih kristalnih zrna.

Oblik i veličina kristalnih zrna zavise od brzine skrućivanja, ali i o broju mesta na kojima je započinjalo skrućivanje. Ova mesta nazivaju se klice kristalizacije jer se najčešće radi o fino raspršenim nečistoćama visokog tališta.

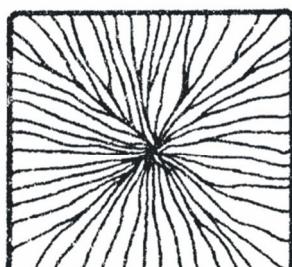
Trajanje skrućivanja ovisi o intenzitetu odvođenja topline i mijenja se u širokom rasponu od nekoliko desetaka minuta kod masivnih odljevaka, nekoliko sekundi kod zavarenih spojeva te mikrosekundi kod dobivanja amorfne metalne strukture. Što je hlađenje sporije i skrućivanje dulje to nastaju veća zrna. Vrijedi i obratno.

Najčešći oblici kod lijevane strukture su dendriti – drvolike strukture (grčki *dendron* = drvo), *slika 4.5*, koji mogu biti od mikroskopske veličine do nekoliko desetaka centimetara duljine. Često se nalaze u unutrašnjosti odljevka. Kod zavarivanja su česte izdužene, celularne strukture. Zrna mogu biti i poliedarskog, pločastog i igličastog oblika (*slika 4.3*).

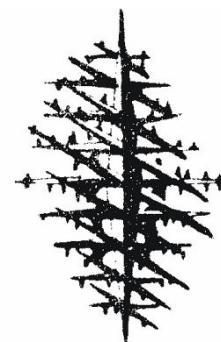
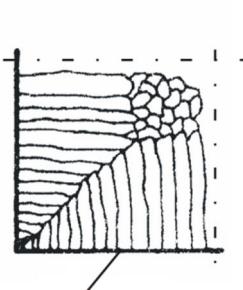
Ako je prilikom skrućivanja brzina nastajanja novih klica velika dobiva se sitnozrnata struktura. Skrućivanje započinje na više mesta, pa ne mogu narasti velika zrna. Inače je brzina nastajanja klica specifičnost pojedinog metala, ali se na to može djelovati dodavanjem umjetnih klica.



*Slika 4.3. Neki češći oblici kristalnih zrna u metalu*



*Slika 4.4 Bakrena šipka zaobljenih rubova i oštih rubova*



*Slika 4.5. Kristali dendriti*

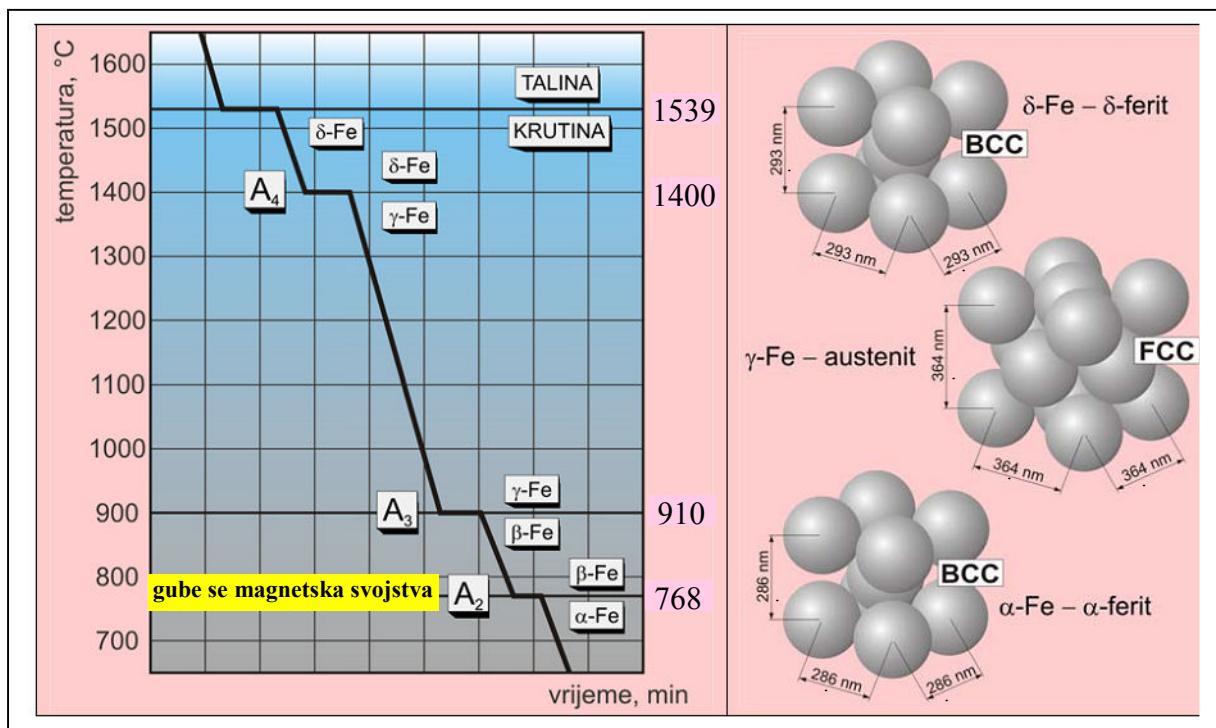
Na oblik i veličinu kristalnih zrna u skrućenom materijalu najlakše se može utjecati usmjerenim hlađenjem. Na *slici 4.4* prikazani su neki slučajevi strukture kao posljedice usmjerenog odvođenja topline. Kod oštih rubova (koji se inače u ljevarstvu izbjegavaju) dobiva se nepovoljan smjer kristala na rubu, koji se lako lome. Zaobljeni rub odljevka omogućava nastanak povoljnije orijentiranih zrna. Kod odljevka s različitim debljinama mogu se u dijelove kalupa, gdje je volumen taline velik, dodati komadi za brže hlađenje, a na mjestima tanjih presjeka dodati izolacijski materijal za usporavanje hlađenja, čime se postiže približno jednaka veličina zrna u čitavom komadu. Kod hlađenja samo u jednom smjeru, kao u slučaju izoliranog cilindra s hladnim dnom, dobivaju se aksijalno orijentirana kristalna zrna.

## 4.2 Promjene u krutnini

Kod pojedinih metala može se zapaziti da kod hlađenja već skrnutnutog metala dolazi do naglih promjena nekih osobina pri određenoj temperaturi (volumen, električni otpor, čvrstoća). Ove promjene ukazuju na promjenu kristalne rešetke i nazivaju se alotropske modifikacije (od grčkog allotropos-promjenljiv).

Metali koji pokazuju ovakve promjene u krutnini jesu željezo, kositar, kobalt, nikal, mangan, titan. Njihova se mehanička svojstva mogu mijenjati u širokom rasponu baš zahvaljujući promjenama kristalne rešetke.

Pojavu alotropske modifikacije možemo pratiti na primjeru željeza, pomoću krivulje hlađenja,(slika 4.6.) ili dilatometrijske krivulje (krivulje koja pokazuje ovisnost produljenja o temperaturi). Podaci o pojedinim temperaturama, koji su na slici navedeni, mogu neznatno odstupiti prema nekim autorima, jer je dobivanje čistog željeza teško, pa su prema tome i temperature zavisne o većem ili manjem udjelu primjesa.



Slika 4.6. Alotropska modifikacija željeza

Prvo stojište na krivulji hlađenja opaža se pri temperaturi od  $1539^{\circ}\text{C}$ , koja ujedno predstavlja i skrutište. Željezo kristalizira u prostorno centriranu kubnu rešetku (naziva se još i delta rešetka), koja se mijenja do sljedećeg stojišta na temperaturi od  $1400^{\circ}\text{C}$ , kada se rešetka modificira (prekristalizira) u površinski centriranu kubnu rešetku (naziva se još i gama rešetka). Na temperaturi od  $910^{\circ}\text{C}$  gama rešetka ponovno prekristalizira u prostorno centrirani kub, koji se nadalje zove alfa rešetka. Prema nekim autorima nemagnetična prostorno centrirana kubna rešetka željeza naziva se beta rešetka, a magnetična alfa rešetka. Nadalje nema promjene kristalne rešetke, osim što na temperaturi od  $768^{\circ}\text{C}$  do tada nemagnetično željezo postaje magnetično. Ova temperatura naziva se Curieva točka.

Promjena iz prostorno centriranog kuba u plošno centrirani pa opet u prostorno centrirani kub nastaje zbog toga što u intervalu temperatura od 910 do 1400°C plošno centrirani kub ima nižu slobodnu energiju od prostornog, pa je vjerojatniji oblik rešetke prostorno centrirani kub. Gama rešetku može se dobiti i na nižim temperaturama naglim hlađenjem, ali to nije njen stabilno stanje. Zagrijavanjem ili tijekom vremena pretvara se u prostorno centriranu alfa rešetku. Tek znatnim legiranjem može se i na niskim temperaturama zadržati gama rešetka.

Modifikacije rešetke najlakše je pratiti preko promjene volumena, odnosno produljenja hlađenog uzorka. Prilikom skrućivanja volumen se skokovito smanjuje za nekoliko postotaka. Hlađenjem delta rešetke se kontinuirano skraćuje uzorak do temperature modifikacije u gama rešetku. Prije je bilo spomenuto da je plošno centrirani kub gušće pakiran atomima od prostorno centriranog, što znači da će modifikacijom rešetke iz prostornog u plošno centrirani kub isti broj atoma stati u manjem volumen. Uistinu dolazi do naglog skraćenja uzorka pri pretvorbi u gama rešetku. Hlađenjem te rešetke duljina uzorka se kontinuirano smanjuje do modifikacijske temperature prijelaza u alfa rešetku, gdje volumen opet skokovito raste. Daljnje hlađenje pokazuje samo kontinuirano smanjenje duljine uzorka.

Premda se ovdje govori o čistim metalima, može se napomenuti da na modifikacijskim temperaturama također dolazi do nagle promjene rastvorivosti primjesa u metalu. Tako gama rešetka preuzima velike količine uključinskih atoma i plinova (vodik, ugljik, dušik), koje alfa rešetka praktički ne prima, što bitno utječe na mogućnost promjene mehaničkih svojstava kontroliranim grijanjem i hlađenjem metala.

Kod svake opisane modifikacije oslobađa se toplina, premda u znatno manjem iznosu nego kod skrućivanja.

Kod skrućivanja zbog pothlađivanja, skrućivanje može započeti i na nižoj temperaturi od one koja odgovara hlađenju normalnom brzinom. Slično i u krutnini može nastati modifikacija zbog povećane brzine hlađenja na znatno nižoj temperaturi od normalne. U tom slučaju, nastaju strukture koje nisu stabilne na toj temperaturi jer imaju višu energiju od stabilnih struktura. Prijelaz iz nestabilne ili metastabilne strukture u stabilnu može se postići dovođenjem toplinske ili mehaničke energije izvana za savladavanje energetske barijere pri prijelazu iz jednog stanja u drugo. Jednostavan prikaz ova pojave je prevrtanje opeke iz uspravnog (metastabilno) stanja u ležeće (stabilno). Potrebno je uložiti energiju da se opeka zarotira i prevrne ploštimice.

Osim transformacije kod željeza, može se spomenuti da transformacije kositra pokazuju drastičnu promjenu volumena i mehaničkih svojstava. Bijeli kositar se na temperaturi ispod 20°C pretvara u sivu prašinu. Ova pojava naziva se kositrena kuga (izgleda da je uzrokovala propast ekspedicije kapetana Scotta na Južnom Polu jer su im iscurile kante petroleja zalemljene kositrom).

Čisti metali se rijetko koriste. Tehnički čisti metali koriste se u elektrotehnici zbog dobre električne vodljivosti (bakar, aluminij) ili visoke temperature taljenja (volfram, molibden) kao antikorozivni materijali (oblaganje posuda titanom, bakrom, željezne posude za rastaljeni cink, prevlake cinka, kadmija, olova) za ukrasne prevlake (krom, nikal, zlato, srebro...).

U novije vrijeme, koriste se čisti metali i kao vlakna ultravisoke čvrstoće koja armiraju slabije matrice. Ova vlakna predstavljaju praktički monokristale s vrlo malom gustoćom dislokacija, što im daje visoku čvrstoću, desetak i više puta veću od polikristalnog materijala. Usmjerenom kristalizacijom također se mogu postići znatne anizotropije svojstava što može biti korisno u nekim primjenama.

## **5 Legure**

U strojarskoj praksi se znatno više od čistih metala koriste legure. Razlozi su višestruki: tehnički čisti metali teško se dobivaju u pročišćenom stanju, skupi su, premekani i niske čvrstoće, nepovoljnih kemijskih i fizikalnih svojstava, često teško obradivi standardnim postupcima obrade. Tehnički čisti metali su obično oni koji imaju najviše 0.1% primjesa. Veće količine primjesa su ili nečistoće ili namjerno dodani legirni elementi, i te metale nazivamo legure.

Do nastajanja legura dolazi miješanjem metala s metalima, ali i s drugim elementima. Svaki pojedini element smješte naziva se komponenta legure. Broj komponenata koje se praktično koriste iznosi oko 80. Od ovih komponenata je u primjeni oko 3000 dvokomponentnih i 80 000 trokomponentnih i višekomponentnih legura.

### **5.1 Faze u legurama**

Faza je homogeni dio tvari. Materija je homogena ukoliko su joj sva fizikalna i kemijska svojstva, na raznim mjestima ista. Kod čistog metala talina je jedna, a krutnina druga faza. Za vrijeme skrućivanja istodobno postoje dvije faze, kruta i tekuća. Kod legura može biti nekoliko različitih situacija, ovisno o međusobnoj rastvorivosti komponenata u talini i krutnini.

Ako legura sadrži komponente koje se potpuno miješaju u talini, onda je talina jedna faza. Međutim, komponente bitno različite specifične težine formiraju odvojene taline koje plivaju jedna na drugoj (aluminij i olovo). U krutnini također može biti samo jedna vrsta kristala nastalih od svih komponenti, ali mogu biti i odvojeni kristali pojedinih komponenti.

Kristali komponenti nastaju u legurama u kojima ne postoji rastvorivost u krutnini. Svaka komponenta kristalizira odvojena, a materijal je smjesa različitih kristala. Tako oovo zbog velikog atomskog radiusa (1.73 angstrema) odvojeno kristalizira u smjesi sa željezom (1.24), cinkom (1.33), bakrom (1.28), aluminijem (1.43). Mala količine olova u tim legurama olakšava obradu odvajanjem čestica zbog otkidanja kratke čestice pri rezanju.

#### **5.1.1 Krute otopine-mješanci**

Kristali mješanci tvore krute otopine kada jedna komponenta zadržava svoju rešetku, a na pojedinim mjestima u toj rešetki uključuju se atomi drugih komponenata. Mješanaca ima dvije vrste. Kako je prije spomenuto, to su zamjenske (supstitucijske) i uključinske (intersticijske). Naziv krute otopine dolazi od toga što su atomi pomiješani u kristalima slično kao i u talini.

Legure mogu biti sređene (struktura unutar kristalnog zrna) ili nesređene (granice kristalnih zrna).

#### **5.1.2 Zamjenski mješanci**

Zamjenski mješanci imaju osnovnu rešetku prevladavajuće komponente, ali su na pojedinim mjestima u rešetki strani atomi zamijenili atome osnovnog elementa. Radi jednostavnosti prikaza nadalje će se govoriti samo o slijevanju dviju komponenata, dakle o dvokomponentnim legurama.

Kod dvokomponentnih legura postoje samo dvije vrste atoma elemenata: rastvarači koji daju atome i tip rešetke, te rastvoreni koji daju samo atome.

Mješanci mogu imati ograničenu i rijede, neograničenu rastvorivost. U drugom slučaju se količinski odnos atoma jedne u odnosu na drugu komponentu može mijenjati u rasponu od 0 do 100%. To je slično potpunoj rastvorivosti u talini, pa se naziva potpuna rastvorivost u krutnini.

Rastvorivost stranih atoma u matičnoj rešetki ovisi o nekoliko činilaca, i to o relativnoj atomskoj veličini, i tipu kristalne rešetke rastvorenog elementa i valenciji elemenata.

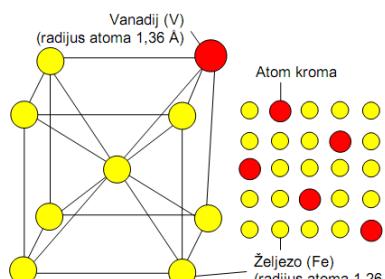
Potpuna rastvorivost u krutnini može se ostvariti kada je razlika veličine promjera atoma unutar 8% kristalne rešetke istog tipa, kada su elementi blizu u periodičkom sustavu elemenata, kada imaju jednaki broj valentnih elektrona i kada su oba elementa metali. Ako se valencije razlikuju, onda manje valentni element može rastvoriti više atoma drugog elementa, nego što taj element može rastvoriti manje valentni (npr. jednovalentan bakar rastvara do 32% Zn u rešetki, a dvovalentni cink samo do 2% Cu).

Tipičan zamjenski mješanac pokazan je na *slici 5.1.*

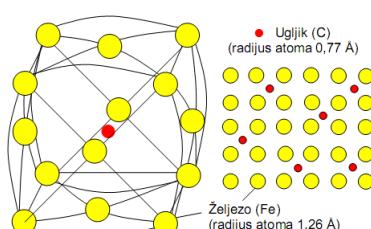
### 5.1.3 Uključinski mješanci

Ovi mješanci nastaju uključivanjem rastvorenih elemenata u međuprostore kristalnih rešetki matičnog elementa (*slika 5.2.*). Najčešće rastvoreni elementi su ugljik, bor, dušik i vodik (njihovi atomski radijusi su: C = 0.77, B = 0.83, N = 0.75, H = 0.37 angstrema).

Već mali sadržaj rastvorenih uključinskih atoma (osim vodikovih) izaziva veliko izvitoperenje rešetke rastvarača. Zbog toga, već sasvim mali sadržaj uključenog elementa izaziva bitne promjene kristala mješanca.



*Slika 5.1. Supstitucijski mješanac*



*Slika 5.2. Uključinski mješanac*

## 5.2 Kristali intermetalnih i kemijskih spojeva

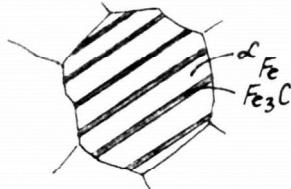
Kristali spoja tvore nove kristalne rešetke, različite od rešetki obje komponente. Karakteristika kemijskog spoja je točan omjer atoma komponenti u spoju, koji se svugdje u materijalu ponavlja. Tako npr, spoj željeznog karbida ima formulu Fe<sub>3</sub>C (*slika 5.4*). Između metala mogu nastati intermetalni spojevi, u kojima atomi nisu obvezno u istim brojčanim odnosima.

Rešetke spojeva su uglavnom komplikirane, bez kliznih ravnina i pravaca. Zato su takvi kristali vrlo tvrdi i krhki. Budući da imaju vezane elektrone, imaju i veliki električni otpor.

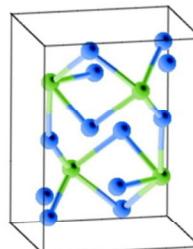
### 5.3 Mehaničke smjese kristala

U nekim slučajevima skrućivanje legura odvija se na stalnoj temperaturi pa može nastati smjesa sitnih, različitih kristala. To se može promatrati kao jedna faza, jer ti kristali imaju vrlo homogena svojstva zbog sitnoće zrna. Ovakve smjese zovu se eutektikum (grčki *eu* - dobro, *tehtein* - graditi, ima i tumačenja da dolazi od grčkog *tekein* - taliti, topiti) - *slika 5.3.*

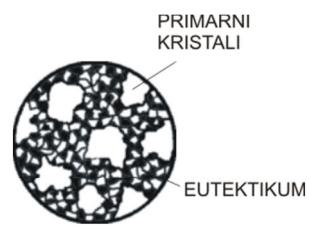
Nastanak homogene smjese različitih kristala prilikom pretvorbi u krutnini sličan je



Slika 5.3. Kristal spoja u perlitu



Slika 5.4.  $Fe_3C$



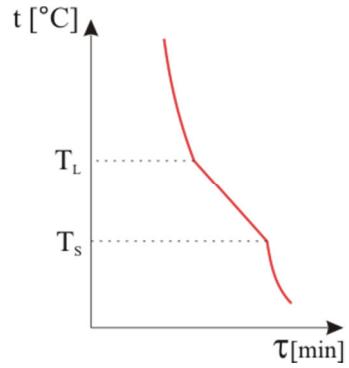
Slika 5.5. Eutektički kristali

skrućivanju eutektičke smjese, pa se ta smjesa naziva eutektoid. Na slici 5.5. prikazana je eutektička faza.

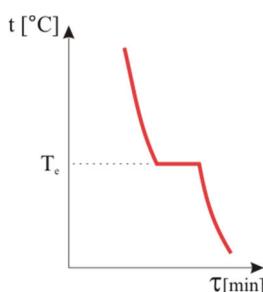
#### 5.4 Skrućivanje legura

Pojave kod skrućivanja legura su nešto složenija nego kod čistih metala i mogu se grubo svrstati u tri grupe:

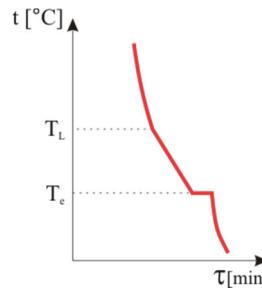
- Skrućivanje legure s komponentama potpune rastvorivosti u talini i krutnini odvija se u temperaturnom intervalu, umjesto na jednoj temperaturi, kao kod čistog metala. Početak i završetak skrućivanja je unutar intervala temperatura skrutišta komponenti (slika 5.6.). Postojanje intervala skrućivanja s usporenim hlađenjem objašnjava se manjim oslobođanjem topline pri skrućivanju, jer samo dio atoma komponente višeg tališta može na odgovarajućoj temperaturi stvarati rešetku, a u njoj se uvrštavaju atomi rastvorene komponente.
- Postoje legure kojima je rastvorljivost u talini potpuna, a u krutnini djelomična ili čak nikakva. Kod točno odrađenih koncentracija komponenti moguće je stvaranje rešetki na nižoj temperaturi od temperatura skrutišta obje komponente. Nastala krutnina je eutektikum, a krivulja hlađenja ima oblik isti kao za čisti metal, samo je stojište na nižoj temperaturi od stojišta komponenti (slika 5.7.).
- Postoji mogućnost da legura ima koncentraciju blisku eutektičkoj, tako da skrućivanjem najprije započinje jedna faza, a ostatak taline se skrutne kao eutektikum. Krivulja hlađenja dobiva oblik kao na slici 5.8.



Slika 5.6. Krivulje hlađenje legure s potpunom rastvorivošću u krutnini



Slika 5.7. Krivulja hlađenja legure s eutektikumom



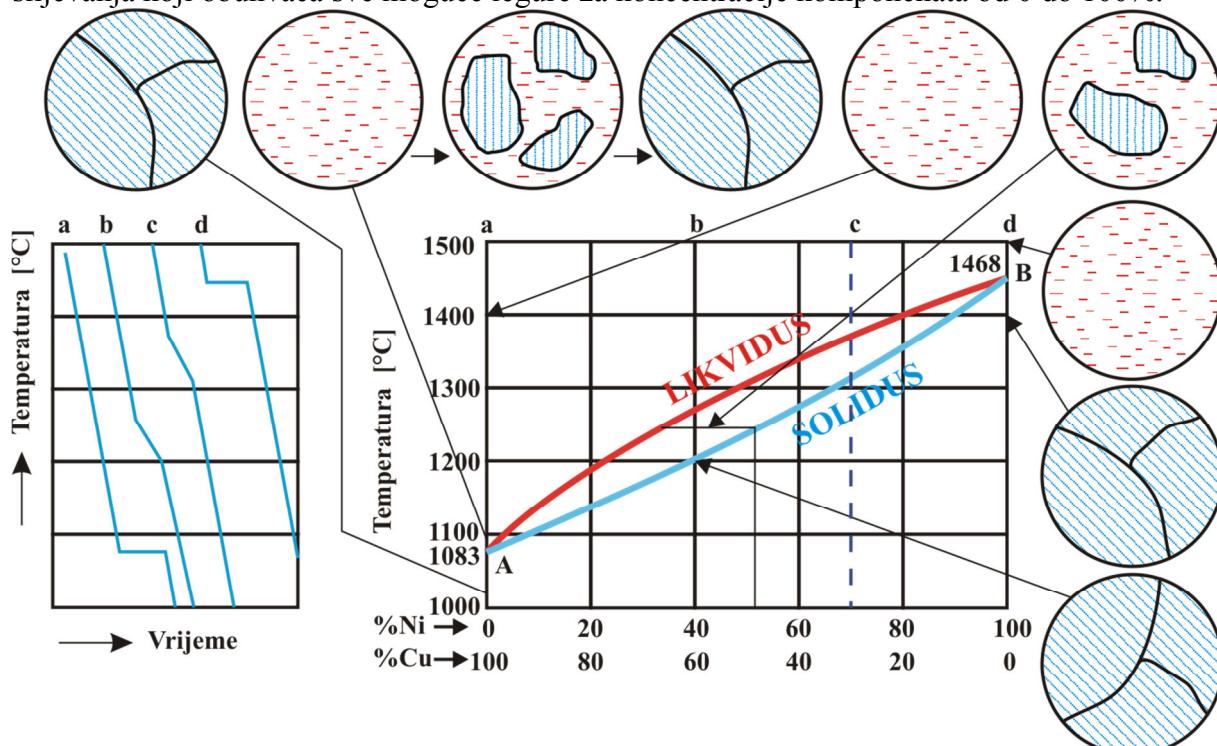
Slika 5.8. Krivulja hlađenja legure sa eutektikumom

Postoji i četvrta grupa krivulja hlađenja kod kojih se javlja interval skrućivanja sa stojištem unutar intervala skrućivanja. Ovakva krivulja hlađenja opisana je kod peritektičkog dijagrama slijevanja.

### 5.4.1 Dijagrami slijevanja dvokomponentnih legura

Neka je legura sastavljena od dviјe komponente, A i B. Njihov međusobni omjer u leguri moguće je mijenjati po volji. Udio svake komponente u leguri naziva se koncentracija komponente.

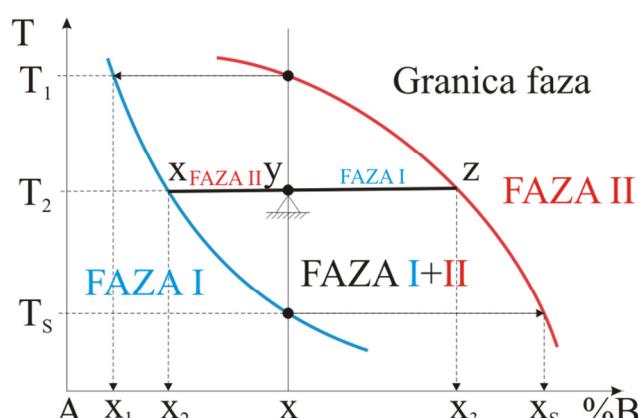
Svaka legura ima odgovarajuću krivulju hlađenja, koja se koristi za izradu dijagrama slijevanja koji obuhvaća sve moguće legure za koncentracije komponenata od 0 do 100%.



*Slika 5.9. Konstrukcija binarnog dijagrama slijevanja za legure potpune rastvorivosti u talini i krutnini*

Binarni (dvojni) dijagram slijevanja sastavlja se iz krivulja hlađenja većeg broja dvokomponentnih legura (slika 5.9.). Na slici je stabilni dijagram slijevanja Cu-Ni (često se koristi slitina sa 66%Ni, 29%Cu i 3%Mn – "monel" s velikom otpornosti na koroziju – koristi se za kondenzatorske cijevi, lopatice vodnih turbina, rashladne uređaje u morskoj vodi zbog otpornosti na obraštanje). Na osi apscisa nanesena je koncentracija, a na osi ordinata temperatura. Na ovaj način se od krivulje hlađenja uzimaju samo karakteristične temperature faznih pretvorbi (taline u krutnинu i modifikacije rešetki). Za pojedine koncentracije nanose se temperature početaka skrućivanja, eutektičke temperature, temperature završetka skrućivanja, promjena rastvorivosti i modifikacija rešetki u krutnинi. Nastali

binarni dijagram vrlo lijepo opisuje sve mogućnosti faznih stanja legura za promatrane temperature. Potrebno je naglasiti da ovo vrijedi za umjerene brzine hlađenja, kada se postižu



*Slika 5.10. Polužni zakon faza*

stabilne strukture. U tehničkoj praksi, zbog velike brzine hlađenja, ovi dijagrami u mnogom slučajevima daju samo približna stanja.

Spajanjem karakterističnih temperatura dobivaju se linije koje ograničavaju područja pojedinih faza. Tako se spajanjem temperatura početaka skrućivanja dobiva likvidus linija (latinski *liquidus* - tekuć), iznad koje postoji samo tekuća faza. Spojevi temperatura završetaka skrućivanja daju liniju solidus ispod koje postoji samo kruta faza (*solidus* od latinskog krut). Između likvidus linije i solidus linije postoji područje dviju faza, tekuće i krute. Za svaku temperaturu iz tog intervala postoji odgovarajuća količina pojedine faze. Ako se zaustavi hlađenje, proces skrućivanja ne napreduje, a količine krute i tekuće faze se ne mijenjaju. Tek snižavanjem temperature raste udio krute faze, a tekuće se smanjuje. Dosezanjem solidus linije skrutiće se sva talina, pa ostane samo kruta faza.

Količine pojedinih faza u dvofaznom području može se odrediti korištenjem **polužnog zakona**, koji kazuje da je udio jedne faze jednak kraku poluge na suprotnoj strani od granice te faze (*slika 5.10.*). Polugu predstavlja odsječak promatrane izoterme  $T_2$  između linija koje dijele dvofazni od jednofaznog materijala, a os (hvatište) poluge je u presjecištu okomice koja predstavlja koncentraciju legure.

Pomoću polužnog zakona moguće je za svaku izotermu ocijeniti koliki je udio pojedine faze u dvofaznom području, što je naročito korisno kod ocjenjivanja utjecaja pojedinih legirnih elemenata na svojstva legure.

Skrućivanje legure koncentracije  $x$ , na *slici 5.10.*, odvija se tako da na temperaturi koja odgovara presjeku linije likvidus i okomice započinje kristalizacija zamjenskog mješanca koji sadrži nižu koncentraciju B komponente od prosječne, jer B atomi još imaju veliku slobodnu energiju. Koncentraciju B atoma u nastalom mješancu može se očitati na presjeku izoterme i solidus linija, a iznosi u ovom slučaju  $x_1$ .

Na temperaturi  $T_1$  praktički nema krute faze, osim prvih kristala mješanaca koncentracije  $x_1$ . Dalnjim hlađenjem, na temperaturi  $T_2$  nastaju mješanci s nešto višom koncentracijom B atoma  $x_2$ , raste udio krute faze, a smanjuje se udio taline. S obzirom na to da se iz taline stalno skrućuje manje B atoma od prosječne koncentracije tih atoma, udio B komponente relativno raste u talini i iznosi  $x_3$  na presjeku izoterme i likvidus linije.

Dostizanjem temperature  $T_s$  skrućuje se preostala taline koncentracije  $x_s$ , u mješance iste koncentracije.

Općenito vrijedi da presjek izoterme u dvofaznom području s granicama faza daje koncentraciju legure u toj fazi, a da se količine faza nalaze na suprotnim stranama poluge koju tvori izoterna između granica faza, dok joj je os (hvatište) koncentracija legure.

Udio pojedine faze se lako izračuna izmjerom duljina poluga u dijagramu:

$$\frac{\text{Talina}}{\text{Krutnina}} = \frac{XY}{YZ} \text{ odnosno:}$$

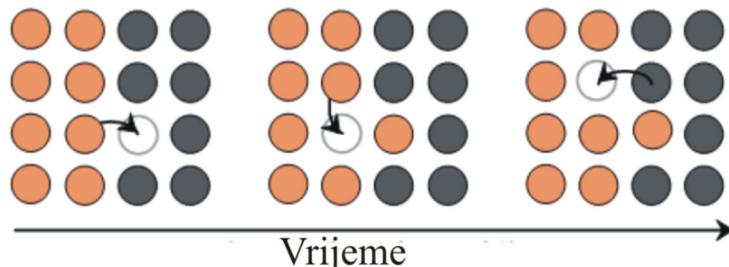
ili

$$\text{Krutnina} = \frac{YZ}{(XY + YZ)} = \frac{YZ}{XZ} \quad \text{Talina} = \frac{XY}{(XY + YZ)} = \frac{XY}{XZ}$$

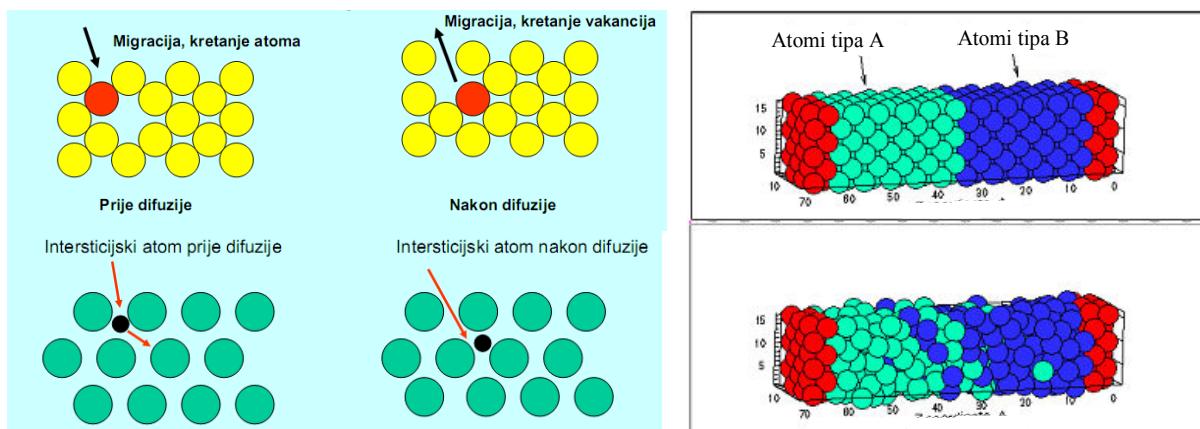
Prethodno opisani proces skrućivanja ukazuje da nastaju slojevi kristala s različitim koncentracijama, od znatno manje do znatno veće koncentracije od prosječne. Ovakva heterogenost materijala susreće se ipak u znatno manjoj mjeri nego što bi odgovaralo ovom prikazu. Homogenizacija krutnine nastaje seljenjem atoma s mjesta više na mjesta niže koncentracije komponenti. Ovaj proces, nazvan difuzija, predstavlja univerzalni prirodni proces izjednačavanja razlika.

## 5.5 Difuzija

Difuzija se u metalu događa najprije seljenjem atoma kroz vakancije, jer je tu energetska barijera za skok atoma najmanja. Na taj način atomi putuju u jednom smjeru, a vakancije u suprotnom (*slika 5.11.* i *slika 5.12.*). Inače, proces podsjeća na popularnu igru postavljanja poretku kvadratiča s brojevima od 1 do 15 u zatvorenom kvadratu od 16 polja.



*Slika 5.11. Difuzija atoma kroz vakancije i usporedba s igrom*



*Slika 5.12. Difuzija atoma kroz vakancije*

Prije je bilo navedeno da na visokim temperaturama raste broj vakancija, a i veze između atoma su slabije. Ovo ukazuje da se difuzija znatno brže odvija na visokim, nego na niskim temperaturama. Isto tako, proces preskakanja atoma u vakancije nije brz, što znači da je značajan činitelj difuzije i vrijeme u kojem se difuzija odvija. Ova dva činioca, temperatura i vrijeme predstavljaju osnovne parametre kojima se mogu mijenjati svojstva materijala.

## **5.6 Razlučivanje**

Ono što je načelno rečeno za kristalizaciju čistog metala, a odnosi se na klice kristalizacije, rast, veličinu i oblik kristalnih zrna, može se primijeniti i na legure.

Razlika u kristalizaciji legure u odnosu na čisti metal nastaje zbog toga, jer u leguri ima više komponenti što uzrokuju nehomogenu krutninu sa stajališta kemijskog sastava. Do heterogenosti krutnine neizbjježno dolazi zbog istodobnog postojanja dvije faze različite koncentracije koje su međusobno u ravnoteži na određenoj temperaturi (talina i krutnina). Krutnina se ne može potpuno homogenizirati zbog nemogućnosti potpunog odvijanja difuzije. Uslijed nepotpune difuzije prilikom pretvorbe jedne faze u drugu dolazi do segregacije ili razlučivanja. Ako se posljedice segregacije protežu samo na područje reda veličine kristala, onda govorimo o mikrosegregaciji ili o mikrorazlučivanju. Ukoliko su ta područja velika toliko da ih golim okom možemo razlučivati, utoliko govorimo o makrosegregaciji, tj. O makrorazlučivanju. Posljedice su skrućivanja bez difuzije u krutnini nastanak mješanaca koji u svakom sloju imaju različitu koncentraciju. Budući da u presjeku poprimaju izgled drva s godovima, nazivaju se slojasti dendriti. Izostankom difuzije dolazi i do pomicanja granica faza na niže temperature, a raste i rastvorivost mješanaca. Mikrorazlučivanje nastaje svugdje gdje se talina skrućuje u temperaturnom intervalu.

### **5.6.1 Makrorazlučivanje ili makrosegregacija**

Ova pojava nastaje u temperaturnom intervalu skrućivanja taline u kojem se izlučuju faze različitog tališta, a prema tome i različitog kemijskog sastava i specifične težine.

Uzroci makrosegregacije su dvojaki:

- heterogenost izazvana seljenjem taline
- heterogenost izazvana mehaničkim seljenjem faza.

Legure djelomične rastvorivosti u krutnini započinju skrućivanje kristalizacijom primarne faze uz stjenke kalupa, dok se talina npr. eutektičkog sastava potiskuje u sredinu kalupa. Na ovaj način nastaju bitne razlike kemijskog sastava masivnih odljevaka po debljini, *slika 5.13*. Sam proces se naziva normalno razlučivanje.

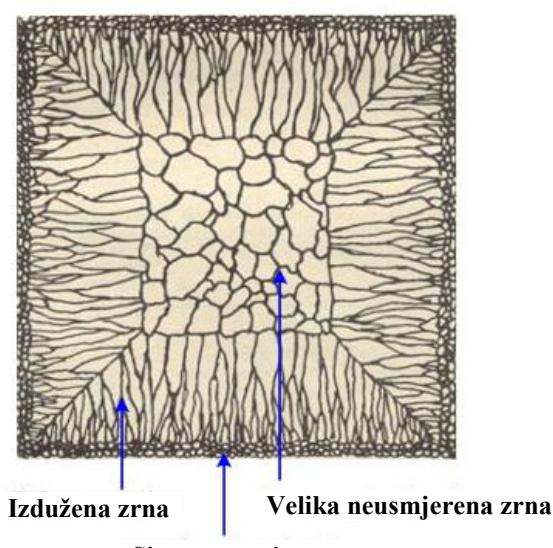
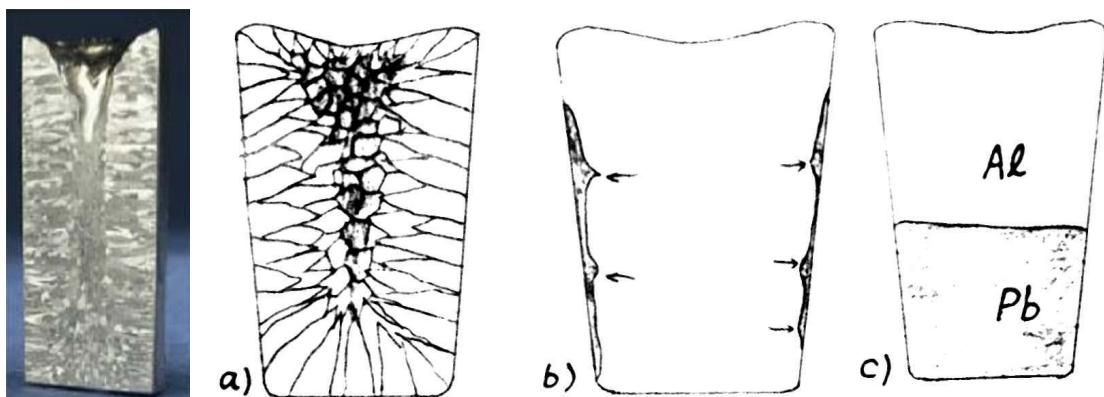
Kod skrnututih masivnijih odljevaka vanjska stjenka se odvaja od stjenke kalupa, dok je sredina još rastaljena. Sloj zraka između ohlađene stjenke i površine odljevka predstavlja toplinsku izolaciju, pa talina iz sredine može protaliti dio već skrnutog materijala i probiti se taljenjem granica zrna primarnih kristala. Tako se na površini metala nađu faze nižeg tališta. Pojava se zove obrnuto razlučivanje ili iznojavanje.

Vertikalno razlučivanje nastaje kada prema površini odljevka isplivava specifično lakša talina.

## 5.6.2 Struktурно razlučivanje

Struktурно разлуčivanje nastaje zbog različitog oblika i veličine kristalnih zrna, što ovisi o uvjetima odvođenja topline. Obično su zrna na površinskom sloju manja i izduljenija, a zrna u sredini odljevka (ili zavarenog spoja) krupnija i podjednakih dimenzija u svim smjerovima (poligonalna zrna), kao na *slici 5.13 a.*

Posljedice razlučivanja, naročito makrorazlučivanja, štetne su za mehanička svojstva metala. Moguće je umanjiti ove posljedice toplinskom i plastičnom obradom. Kod izrazitih razlučivanja ipak ostaju nehomogenosti u materijalu, što se štetno odražava na kvalitetu proizvoda.



d) horizontalni presjek ingota

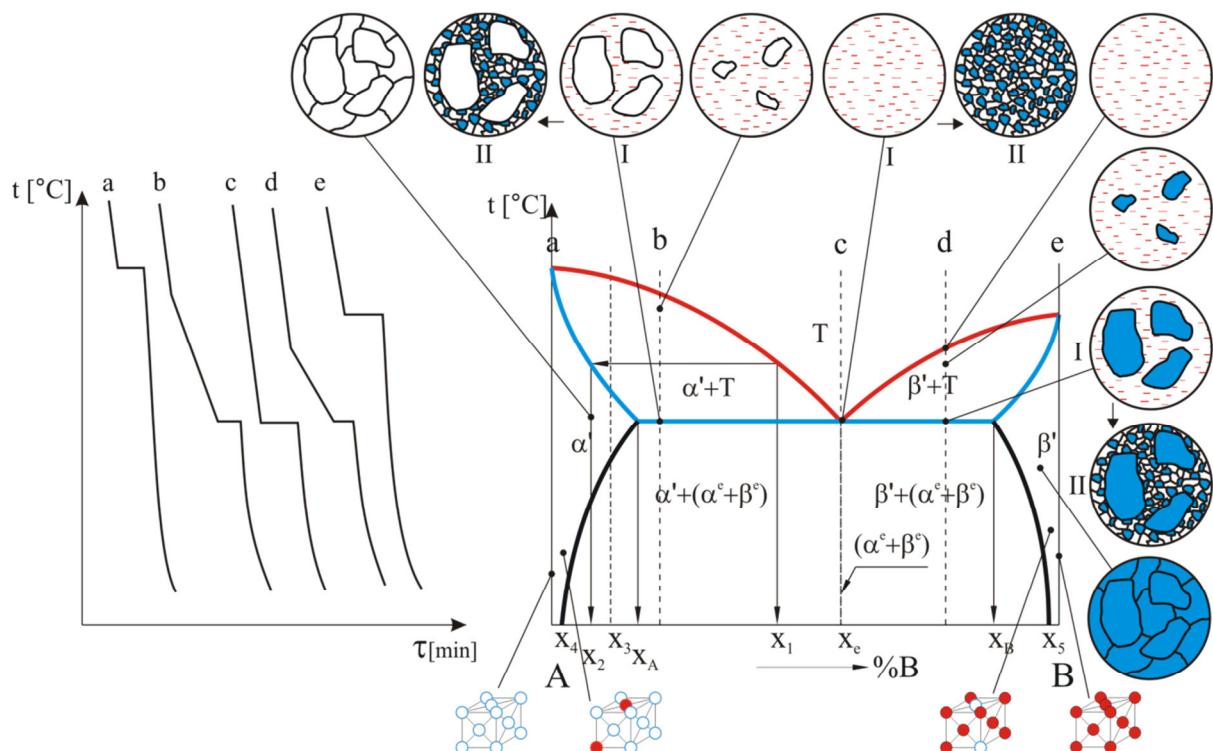
Slika 5.13. Razlučivanje kod masivnih odljevaka

## 5.7 Binarni dijagrami slijevanja tehničkih legura

Binarni dijagram slijevanja, opisan na *slici 5.9.*, odnosi se na manji broj slučajeva potpune rastvorivosti komponenata u krutnini. Slučajevi djelomične rastvorivosti su češći i ovdje će se detaljnije opisati.

### 5.7.1 Eutektički sustav slijevanja s djelomičnom rastvorivošću u krutnini

Dijagram slijevanja za ovaj slučaj pokazan je na *slici 5.14.* Lijevo od dijagrama je nekoliko krivulja hlađenja za koncentracije legura iz kojih se konstruira dijagram.



*Slika 5.14. Eutektički sustav slijevanja s djelomičnom rastvorivošću u krutnini*

Uz dijagram su dane i metalografske slike pojedinih faza za neke tipične koncentracije i temperature. Objekti stvaraju svoje kristale mješance u području koncentracija siromašnih drugom fazom, a u području eutektičke koncentracije nastaje smjesa mješanaca obiju komponenti. Komponente možemo označiti kao A i B, a pripadni kristali mješanci kao  $\alpha$  i  $\beta$ . Likvidus linije padaju od temperatura tališta komponenti do zajedničke eutektičke temperature na eutektičkoj koncentraciji. Solidus linija pada od skrutišta komponenti do eutektičke temperature, a zatim ide horizontalno u području ograničene rastvorivosti komponenti A i B.

Ispod solidus linije postoje tri različita područja, gledano s lijeva na desno, na eutektičkoj temperaturi:

- Od čiste komponente A do koncentracije  $x_A$  koja odgovara graničnoj rastvorivosti komponente B u  $\alpha$  mješancima nalazi se homogeno područje  $\alpha$  mješanaca.
- Između koncentracije  $x_A$  i  $x_B$ , koja odgovara graničnoj rastvorivosti komponente A u mješancima, nalazi se dvofazno područje  $\alpha$  i  $\beta$  mješanaca.
- Od koncentracije  $x_B$  do čiste komponente B je homogeno područje  $\beta$  mješanaca.

U dvofaznom području ističe se eutektička koncentracija  $x_e$ , koja odgovara eutektičkoj leguri. Legura eutektičke koncentracije se skrućuju sa stojištem na eutektičkoj temperaturi, a nastala krutnina predstavlja sitnu smjesu kristala mješanaca komponenti (vidi metalografske slike na *slici 5.14*), od kojih svaki ima graničnu rastvorivost druge komponente. Premda se ovi mješanci ni kemijski ni kristalografski ne razlikuju od mješanaca nastalih iz legura drugih koncentracija, smatraju se novom fazom, eutektikumom, jer zbog sitnog zrna smjesa ima homogena mehanička svojstva.

Dijagram se sada može promatrati od koncentracije čiste komponente A do eutektičke koncentracije, i dalje do koncentracije čiste komponente B. Pojave u oba dijela su simetrične, samo što ulogu komponente A preuzima komponenta B u drugom dijelu. Homogeno područje koncentracija do granice rastvorivosti  $\beta$  mješanaca odgovara prethodno opisanom slučaju na *slici 5.9*, tj. potpunoj rastvorivosti u krutnini, pa ga nije potrebno posebno opisivati.

Legura iz područja u kojem se javlja i eutektikum ima koncentraciju  $x_1$ . Iznad likvidus linije talina sadrži  $x_1$  komponente B i  $(1 - x_1)$  komponente A. Ukupna količina komponenti A + B = 1, odnosno 100%, hlađenjem legure do likvidus linije započinje skrućivanje primarnih  $\alpha'$  mješanaca koji imaju koncentraciju  $x_2$ . Dalnjim ohlađivanjem raste udio faze  $\alpha'$  mješanaca, a smanjuje se udio taline, u kojoj sve više raste koncentracija komponente B, te na eutektičkoj temperaturi poprima eutektičku koncentraciju  $x_e$ . Istodobno nastaju  $\alpha'$  mješanci koji na eutektičkoj temperaturi postižu graničnu moguću koncentraciju  $x_A$ . Na eutektičkoj temperaturi postoje dakle dvije faze, i to primarni  $\alpha'$  mješanci koncentracija  $x_A$  i eutektička talina  $T_E$  koncentracije  $x_e$ . Količina pojedinih faza može se odrediti polužnim zakonom za polugu  $x_{AX_e}$  iz krakova poluge  $x_{AX_1}$  i  $x_1x_e$ :

$$\alpha' : T_E = x_1x_e : x_{AX_1}, \quad \text{odnosno:}$$

$$\alpha' = \frac{x_1x_e}{x_Ax_e} \cdot 100 = \frac{x_e - x_1}{x_e - x_A} \cdot 100 [\%] \quad T_E = \frac{x_Ax_1}{x_Ax_e} = \frac{x_1 - x_A}{x_e - x_A} \cdot 100 [\%].$$

Odvodenjem topline započinje skrućivanje taline eutektičke koncentracije  $x_e$  i nastanak eutektikuma, smjese sitnih zrna mješanaca  $\alpha^e$  i  $\beta^e$  s graničnom rastvorivošću. Eutektikum je obično raspodijeljen između većih zrna primarnih mješanaca, pa se može smatrati posebnom fazom.

Količina primarnih mješanaca odgovara kraku poluge  $x_1x_e$ , a eutektikuma  $x_{AX_1}$ . Unutar eutektikuma omjer  $\alpha^e$  i  $\beta^e$  mješanaca odnosi se kao:

$$\alpha^e : \beta^e = x_e x_B : x_A x_e \quad \text{tj.:}$$

$$\alpha^e = \frac{x_e x_B}{x_A x_B} = \frac{x_B - x_e}{x_B - x_A} \cdot 100 [\%] \quad \beta^e = \frac{x_A x_e}{x_A x_B} = \frac{x_e - x_A}{x_B - x_A} \cdot 100 [\%]$$

Nakon skrućivanja legure koncentracije  $x_1$  metal se dalje hlađi. U većini slučajeva dolazi do smanjenja rastvorivosti mješanaca zbog smanjenja parametara rešetke. Višak, atoma druge komponente stvara odgovarajuće mješance s rastvorivošću koja odgovara trenutnoj temperaturi. Koncentracija  $x_A$  i  $x_B$  predstavljaju granice rastvorivosti komponenti A i B u mješanicama  $\alpha$  i  $\beta$ . Rastvorivost komponenti u mješanicama se obično smanjuje snižavanjem temperature.

U području potpune rastvorivosti na visokim temperaturama, za koncentracije ispod  $x_A$  i preko  $x_B$ , hlađenjem može rastvorivost pasti do mjere da mješanac ne može sadržavati toliko druge komponente kao na višim temperaturama, pa se izlučuju sekundarni mješanci druge komponente u do tada homogenoj fazi. Sekundarnih mješanaca ima obično malo, ali kako se razlikuju po svojstvima od primarnih, mogu bitno utjecati na mehanička svojstva metala.

Za leguru  $x_3$  iz područja potpune rastvorivosti vrijedi da na eutektičkoj temperaturi ima samo fazu primarnih  $\alpha'$  mješanaca, dok na sobnoj ima još izlučenih sekundarnih  $\beta''$  mješanaca. Količina tih mješanaca može se odrediti polužnim zakonom:

$$\alpha' : \beta'' = x_3 x_5 : x_4 x_3 \text{ tj.:}$$

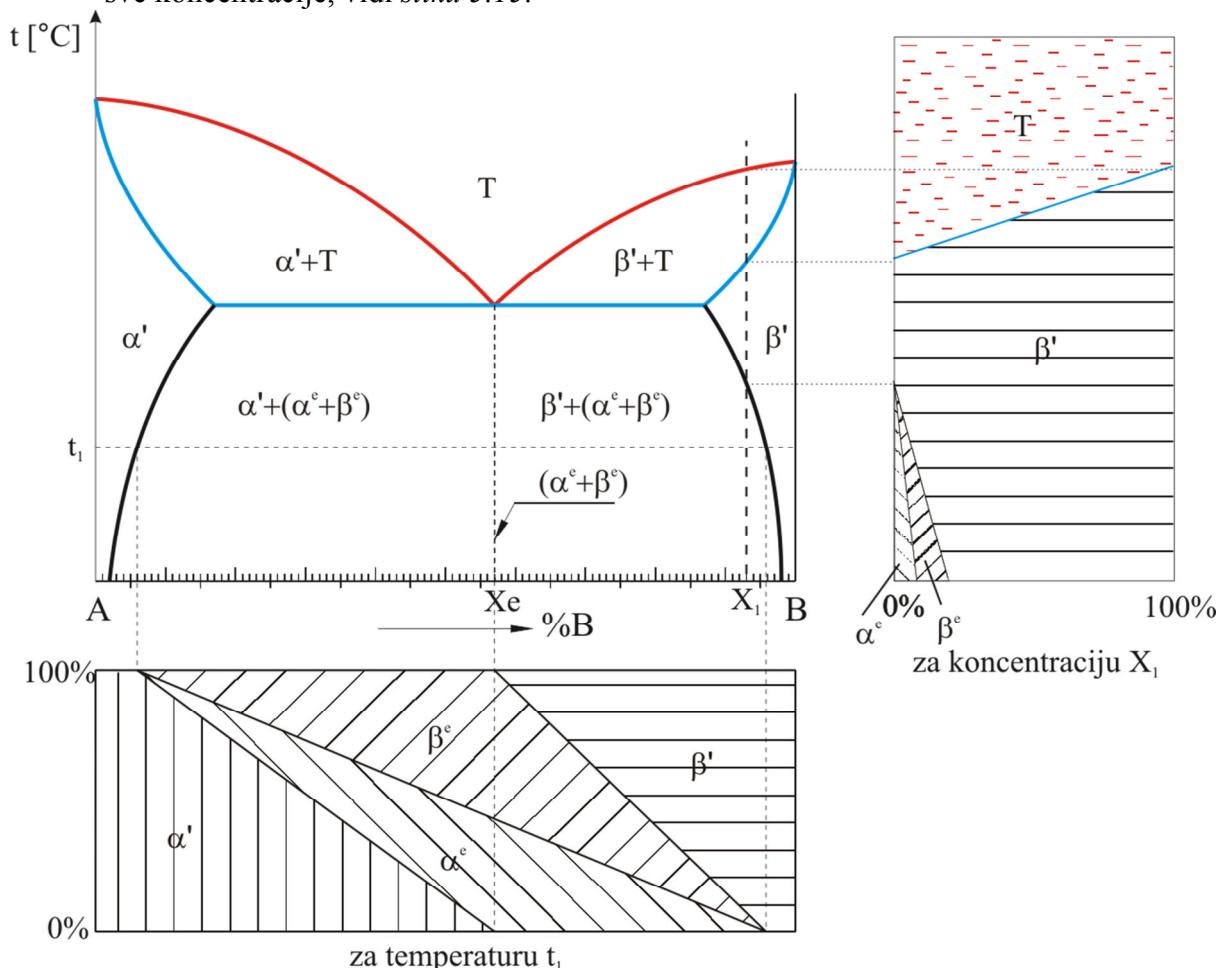
$$\alpha' = \frac{x_3 x_5}{x_4 x_5} = \frac{x_5 - x_3}{x_5 - x_4} \cdot 100[\%]$$

$$\beta'' = \frac{x_4 x_3}{x_4 x_5} = \frac{x_3 - x_4}{x_5 - x_4} \cdot 100[\%]$$

Talina eutektičke koncentracije hlađi se do eutektičke temperature na kojoj se skrućuje sa stojištem na krivulji hlađenja. Nastala krutnina je eutektikum s homogenom smjesom  $\alpha$  i  $\beta$  mješanaca. Koncentracije su tih mješanaca  $x_A$  i  $x_B$ , a količinski se odnose kao krakovi poluga  $x_e x_B$  prema  $x_A x_e$ . Sve ostale pojave pri dalnjem hlađenju slične su već prije opisanim.

Grafički prikaz udjela faza može se dati:

1. Za izabranu koncentraciju  $x$  i raspon temperatura od zagrijane taline do ohladene krutnine, *slika 5.15*.
2. Za neku promatrano, karakterističnu temperaturu pri čemu se dobiva pregled faza za sve koncentracije, vidi *sliku 5.15*.

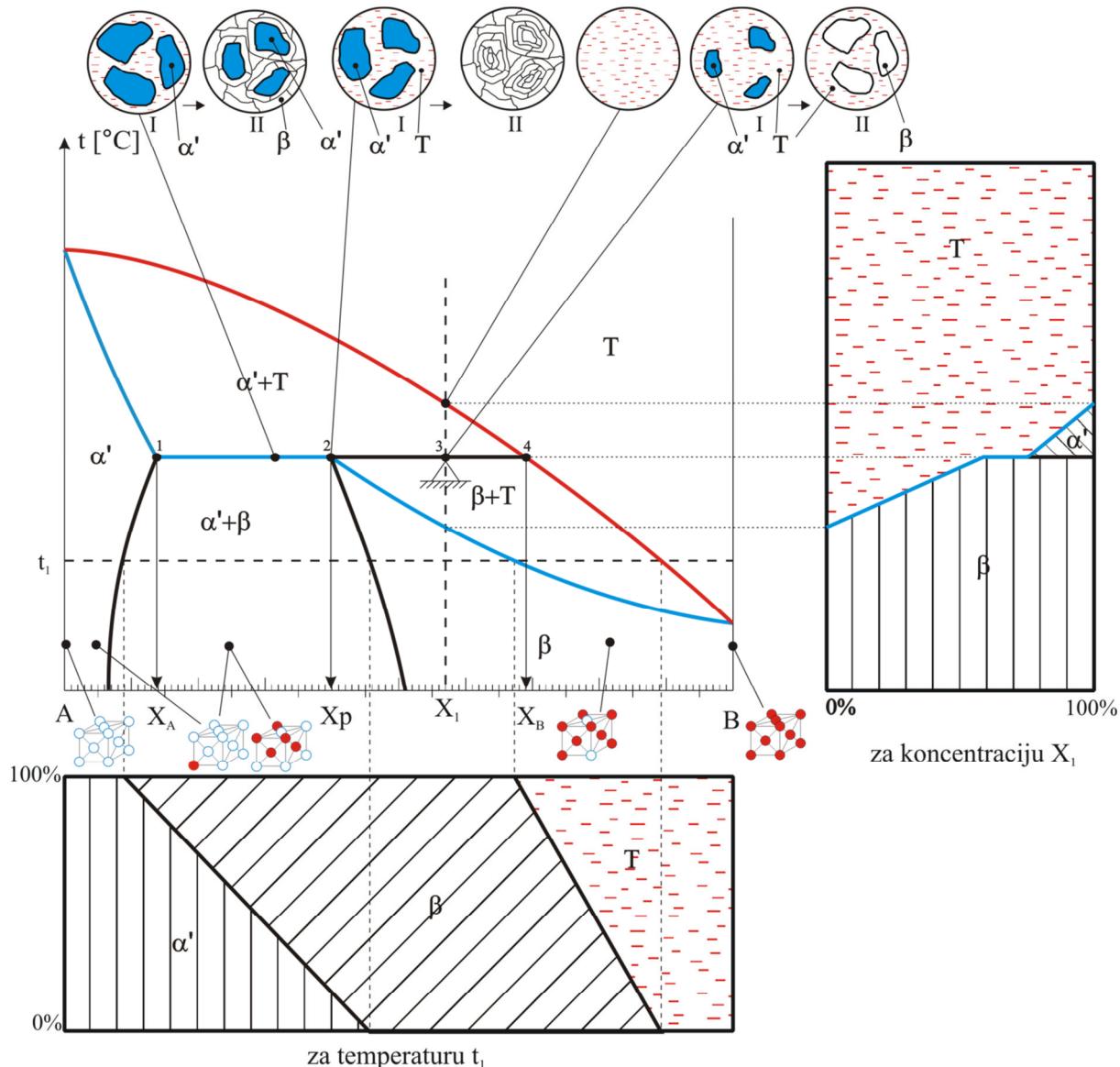


*Slika 5.15. Grafički prikaz udjela faza za zadatu koncentraciju i temperaturu*

Ovakav grafički pregled olakšava cjeloviti uvid u pretvorbe faza i promjene njihove količine. Eutektičke legure daju pogodnost slijevanja komponenti s inače visokim temperaturama taljenja, što je u ljevarstvu pogodno jer se u pećima ne moraju postizati visoke temperature. Legure koncentracije niže od eutektičke nazivaju se podeutektičke, a veće od eutektičke koncentracije nadeutektičke.

### 5.7.2 Peritektički sustav s djelomičnom rastvorivošću u krutnini

Ako su komponente bitno različite temperature tališta, onda obično ne nastaje eutektikum, nego peritektikum, s peritektičkom temperaturom negdje oko sredine raspona temperatura taljenja komponenti. U području niskih koncentracija jedne ili druge faze postoji područje potpune rastvorivosti, kao u dijagramu na *slici 5.9.* Međutim u području peritektičke koncentracije postoji dvofazno područje mješanaca obje komponente. U krutnini također obično dolazi do promjena rastvorivosti mješanaca, pa su i granice rastvorivosti zakriviljene.



*Slika 5.16. Dijagram s peritektikumom*

Tipičan peritektički dijagram prikazan je na *slici 5.16.* Promatrat ćemo samo područja koja se razlikuju od do sada opisanih.

U području koncentracija 0 do  $x_A$  nema nikakve razlike u odnosu na dijagram na *slici 5.9.*, skruće se primarna faza  $\alpha'$  mješanaca. Hlađenjem se ovim mješanicima smanjuje rastvorivost, a moguće je izlučivanje i sekundarnih  $\beta''$  mješanaca.

Legure koncentracija između  $x_A$  i  $x_p$  skrućeju se najprije primarni  $\alpha'$  mješanci do peritektičke temperature. Na toj temperaturi postoje dvije faze, primarni  $\alpha'$  mješanci koncentracije  $x_A$

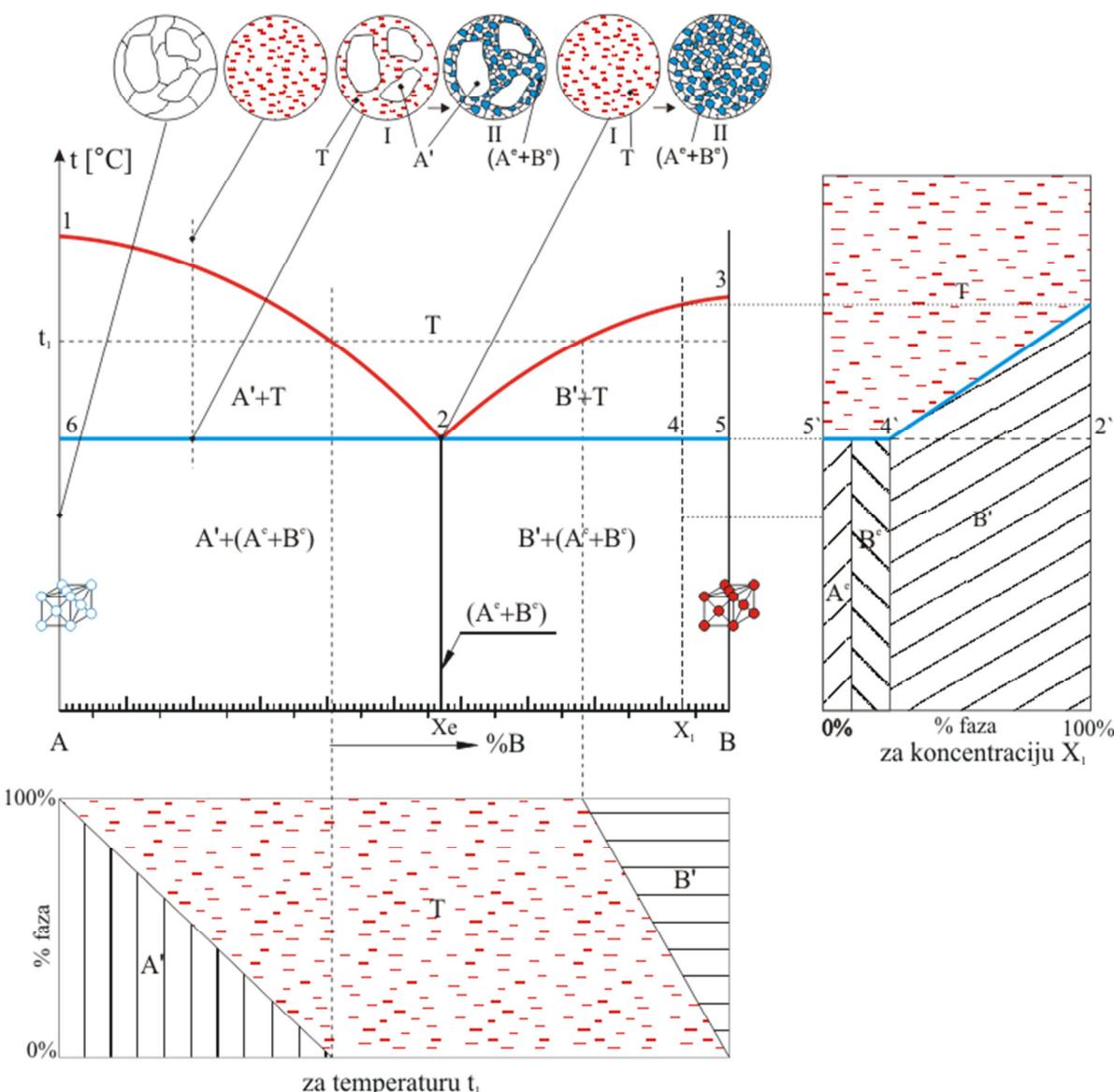
talina koncentracije  $x_B$ . Ova talina se dalje skrućuje kao  $\beta$  mješanac, jer je  $\alpha'$  mješanac već na granici rastvorivosti, pa ne može primati B atome iz taline bogate tom komponentom. Kako  $\beta$  mješanci nastaju nakon  $\alpha'$  mješanaca, to se obično grade oko primarnih  $\alpha'$  mješanaca, odakle im potječe i naziv (grčki *peri* - oko, *tehtein* - graditi). Tom prilikom i dio  $\alpha'$  mješanaca obloženih  $\beta$  mješancima prekristalizira u  $\beta$  mješance.

Na samoj peritektičkoj koncentraciji dolazi do skrućivanja primarnih  $\alpha'$  mješanaca koji se kristaliziraju do peritektičke temperature. Na toj temperaturi postoji faza primarnih  $\alpha'$  mješanaca i talina bogata B komponentom, koncentracije  $x_B$ . Skrućivanje se odvija sa stojištem, pri čemu se talina skrutiće u  $\beta$  mješance koncentracije  $x_P$ , a primarni  $\alpha'$  mješanci prekristaliziraju potpuno u  $\beta$  mješance (vidi metalografsku skicu na *slici 5.16.*). Na nižim je temperaturama, zbog smanjenja rastvorivosti rešetke, moguće izlučivanje sekundarnih  $\alpha''$  mješanaca.

Legure koncentracija između  $x_P$  i  $x_B$  započinju skrućivanje primarnom  $\alpha'$  fazom; na peritektičkoj temperaturi dolazi do skrućivanja dijela taline u  $\beta$  mješance i prekristalizacije  $\alpha'$  mješanaca u  $\beta$  mješance. Ostatak taline nadalje kristalizira u  $\beta$  mješance.

## 5.8 Sustav slijevanja s komponentama potpuno nerastvorivim u krutnini

Ovaj slučaj je isti kao kod eutektičkog sustava, samo što nastaju odvojeni kristali komponenata, a ne mješanci (slika 5.13.), tj. nastaju kristalne rešetke čistih komponenata. Skrućivanjem podeutektičke taline nastaju kristalne rešetke čiste komponente A. Snižavanjem temperature rastu kristalna zrna koncentracije 100% A komponente, a koncentracija taline se povećava do eutektičke koncentracije  $x_e$  na eutektičkoj temperaturi. Na ovoj temperaturi talina se skruti u eutektikum koji, za slučaj potpune nerastvorivosti u krutnini, predstavlja mehaničku smjesu čistih kristalića komponente A i komponente B. Do sobne temperature nema promjene udjela faza nastalih nakon eutektičke pretvorbe.



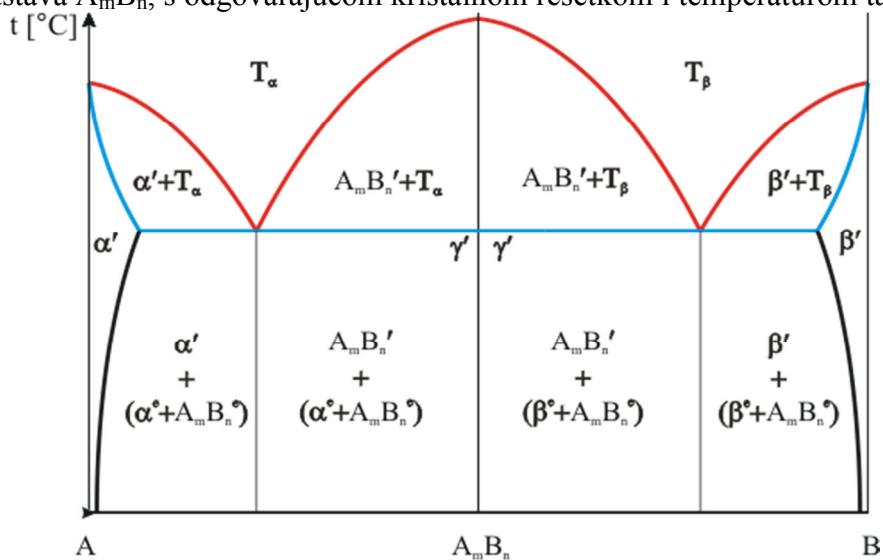
Slika 5.17. Eutektički sustav slijevanja za komponente s potpunom nerastvorivošću u krutnini

Na slici 5.17. vidimo grafičke prikaze udjela faza za koncentraciju  $x_1$  lijevo od dijagrama i za temperaturu  $t_1$  ispod dijagrama. Grafički prikazi se crtaju pomoću polužnog zakona što je detaljno objašnjeno u prethodnim poglavljima.

Sustave s potpunom nerastvorivošću tvore metali s većim razlikama u svojstvima. Češći je slučaj da jedna komponenta tvori mješance, a druga ne.

## 5.9 Slijevanje s komponentama koje u krutnini stvaraju spojeve

U ovom slučaju se dijagram slijevanja praktički razbija na dva ili više dijagrama u kojima ulogu komponenata uzimaju spojevi definiranog sastava. Kristali spojeva obično ne tvore mješance, te predstavljaju komponente s potpunom nerastvorivošću u krutnini. Jednostavan primjer prikazan je na *slici 5.18*. Osnovne komponente su A i B, ali za neku koncentraciju x tvore spoj sastava  $A_mB_n$ , s odgovarajućom kristalnom rešetkom i temperaturom taljenja.

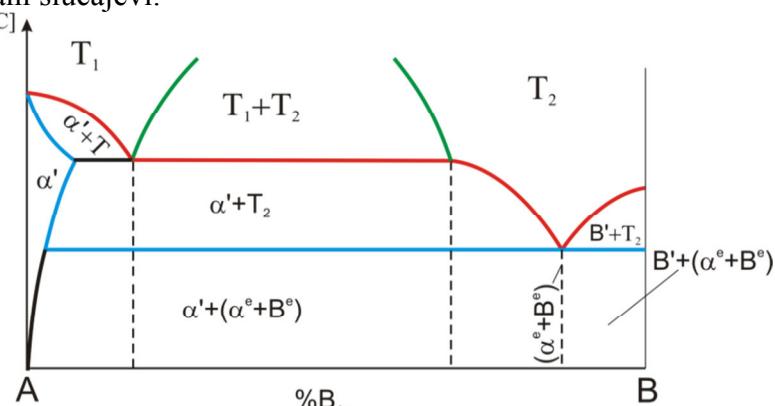


*Slika 5.18. Sustavi s kemijskim spojem*

Razdvajanjem dijagrama u dva dijela može se promatrati odvojene sustave s komponentama A i  $A_mB_n$  te drugi sustav s kemijskim spojem  $A_mB_n$ , i komponentom B. U praksi često samo jedan od ovih dijagrama predstavlja tehnički upotrebljive legure.

## 5.10 Sustav slijevanja s djelomičnom rastvorivošću u talini

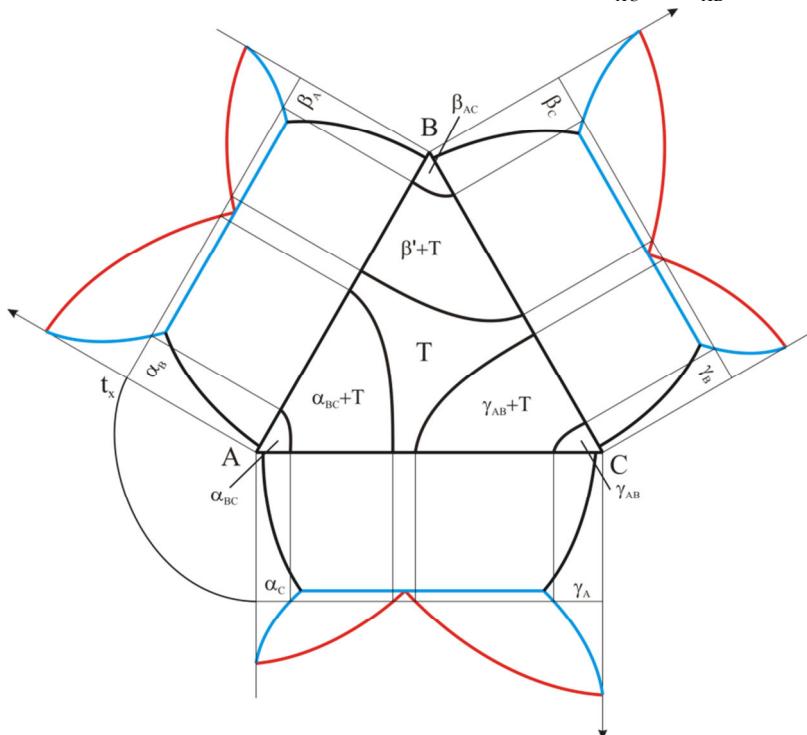
Pojave nerastvorivosti u talini javljaju se kod metala s velikom razlikom u specifičnim težinama, najčešće su to legure bakra, željeza i aluminija s olovom. Kod mirne taline lakši metal pliva nad težim, a i skrućivanje se odvija odvojeno. Dijagram slijevanja s djelomičnom rastvorivošću u talini prikazan je na *slici 5.19*. Miješanjem taline i brzim skrućivanjem nakon ulijevanja u kalup moguće je postići homogenu mješavinu kristala komponenata. Ako je olovo jedna komponenta, onda je čvrstoća materijala na mjestu kristala olova mala, pa je obrada rezanjem olakšana. U područjima koncentracija gdje nema razdvajanja taline mogući su prethodno opisani slučajevi.



*Slika 5.19. Sustavi s djelomičnom rastvorivošću u talini*

## 5.11 Trokomponentni sustavi slijevanja

Ovi su sustavi česti u praksi, ali se obično promatra binarni sustav u kojem se treća komponenta drži nepromjenljivom. Trojni ili ternarni sustavi konstruiraju se iz odgovarajućih binarnih dijagrama parova komponenti A, B, C, kao što se vidi na *slici 5.20*. Ovi dijagrami sijeku se izotermnim plohamama, a sam prikaz dijagrama je u istokračnom trokutu za pojedinu izotermu (u našem primjeru  $t_x$ ). Kristali mješanci npr.  $\alpha_{BC}$  imaju u svojoj rešetci uključene atome i B i C komponente. Isto vrijedi i za kristale mješance  $\beta_{AC}$  i  $\gamma_{AB}$ .



*Slika 5.20. Trokomponentni dijagram slijevanja*

Trokomponentni dijagrami su relativno malobrojni i postoje uglavnom samo za najčešće korištene trojne legure. Najviše se ipak koriste kvazibinarni dijagrami gdje se promatra ponašanje samo dvije komponente, dok se ostale komponente i primjese, odnosno nečistoće, nastoje držati nepromijenjenima u svim promatranim legurama (jedna komponenta je A + (C + D + F + ...), a druga, koja se varira je B).

Prikazani dijagrami slijevanja predstavljaju osnovicu proučavanja struktura i svojstava tehničkih metala i njihovih legura. Usprkos činjenici da se odnose na strukture nastale sporim hlađenjem, daju dobru sliku struktura u legurama za različite omjere miješanja komponenti.

Općenito se može reći da homogeni, jednofazni metal pokazuje dobra svojstva plastičnosti, dok dvofazni materijali, posebno ako imaju izlučene sekundarne faze, pokazuju veću čvrstoću. Dijagrami slijevanja koriste se za prikazivanje pojava i kod slijevanja i kod skrućivanja nemetala, kako organskih, tako i anorganskih. Obično se radi o kemijskim spojevima kao komponentama smjese.

Ovim prikazom bio bi završen općeniti uvod u građu materijala i posebno metala. Slijedi prikaz najčešće korištenih metala prema njihovoј zastupljenosti u upotrebi. Valja napomenuti da svaki metal ima neko optimalno područje korištenja, tako da nema podjele na važnije ili manje važne metale. Neke metale koristimo svakodnevno, a neke vrlo rijetko ili nikako. Razvojem metalurgije i tehnologije obrade neki do nedavno egzotični metali postaju dio svakodnevnice.

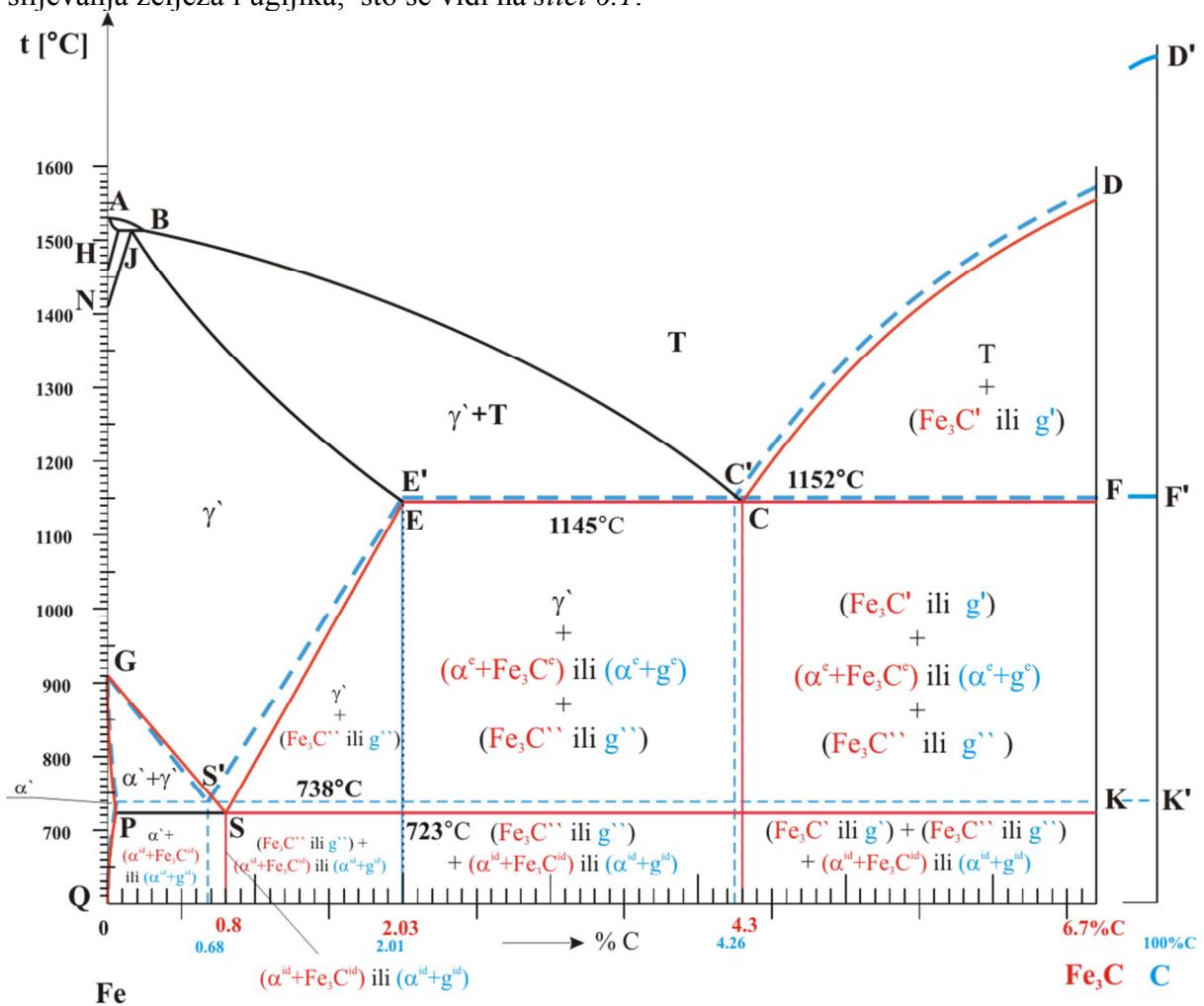
## 6 Tehnički metali i njihove legure

Nakon općenitog prikaza pojava kod čistih metala i legura, u nastavku ćemo detaljno opisati najviše korištene metale u tehničkoj praksi. Tehnički se metali najčešće dijele na dvije grupe i to na željeza ili legure željeza i na neželjezne metale. Ovakva podjela je razumljiva jer je godišnja proizvodnje željeza skoro deset puta veća od proizvodnje svih drugih tehničkih metala zajedno.

### 6.1 Sirovo željezo

Pod pojmom sirovo željezo podrazumijevamo sve legure željeza s ugljikom, uz dodatke ostalih elemenata. U nastavku ćemo se ograničiti samo na analizu legura željeza i ugljika. Naziv željezo ostaje naziv za tehnički čisto željezo sa zanemarivim sadržajem ugljika. Legure željeza znatnije legirane drugim elementima nisu predmet izlaganja ovog kolegija.

Različite vrste legura željeza međusobno se razlikuju po fazama koje imaju na sobnoj temperaturi i po svojstvima koja im daju te faze. Najjednostavniji put je analiza dijagrama slijevanja željeza i ugljika, što se vidi na *slici 6.1*.



*Slika 6.1. Dijagram slijevanja željezo-ugljik*

Vidljivo je da se dijagram odnosi na relativno male koncentracije ugljika u željezu, najviše do 7%. Ovo je i razumljivo jer je ugljik uključinski element i već male količine ugljika mogu bitno mijenjati mehanička svojstva željeza. Kod lijevanih željeza sadržaj ugljika obično ne prelazi 4,5%, dok kod vrsta koje se prerađuju plastičnom deformacijom i zavarivanjem taj

postotak pada ispod 0.4%. Visokolegirane vrste legiranog željeza najčešće imaju sadržaj ugljika ispod 0.1%.

Na dijagramu se vidi da se radi o eutektičkom dijagramu s djelomičnom rastvorivošću ugljika u željezu u krutnini i potpunoj nerastvorivosti željeza u ugljiku. Na temperaturama iznad 1400°C i za koncentracije ugljika ispod 0.2% postoji peritektički dio koji se kod nelegiranog željeza obično ne proučava.

Dijagram označen (plavom) isprekidanom linijom predstavlja proces sporog hlađenja legure željeza i ugljika u kojem nastaju stabilne strukture, i to mješanac željeza i ugljika s neznatnim sadržajem ugljika te kristali ugljika u heksagonskoj modifikaciji (grafit).

Dijagram označen punim (crvenim) crtama odnosi se na slučaj metastabilnog skrućivanja, dakle skrućivanja s većom brzinom hlađenja i nastankom metastabilne strukture. Linije B-C' i J-E' su zajedničke za oba dijagraama. Zbog te povećane brzine hlađenja nisu nastali odvojeni kristali ugljika (u formi grafita) i mješanci željeza i ugljika, nego nastaje kemijski spoj, željezni karbid,  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Metastabilna struktura se sastoji od mješanaca željeza i ugljika i kristala spoja željeznog karbida.

Oba slučaja, stabilni i metastabilni imaju isti oblik dijagrama slijevanja, samo je kod metastabilnog došlo do sniženja temperatura pretvorbi i do povećanja granica rastvorivosti zbog bržeg hlađenja. Žarenjem je moguće metastabilnu strukturu  $\text{Fe}_3\text{C}$  pretvoriti u mješance Fe i kristale grafita, ali se stabilna struktura Fe mješanaca i grafita ne može žarenjem pretvoriti u metastabilnu.

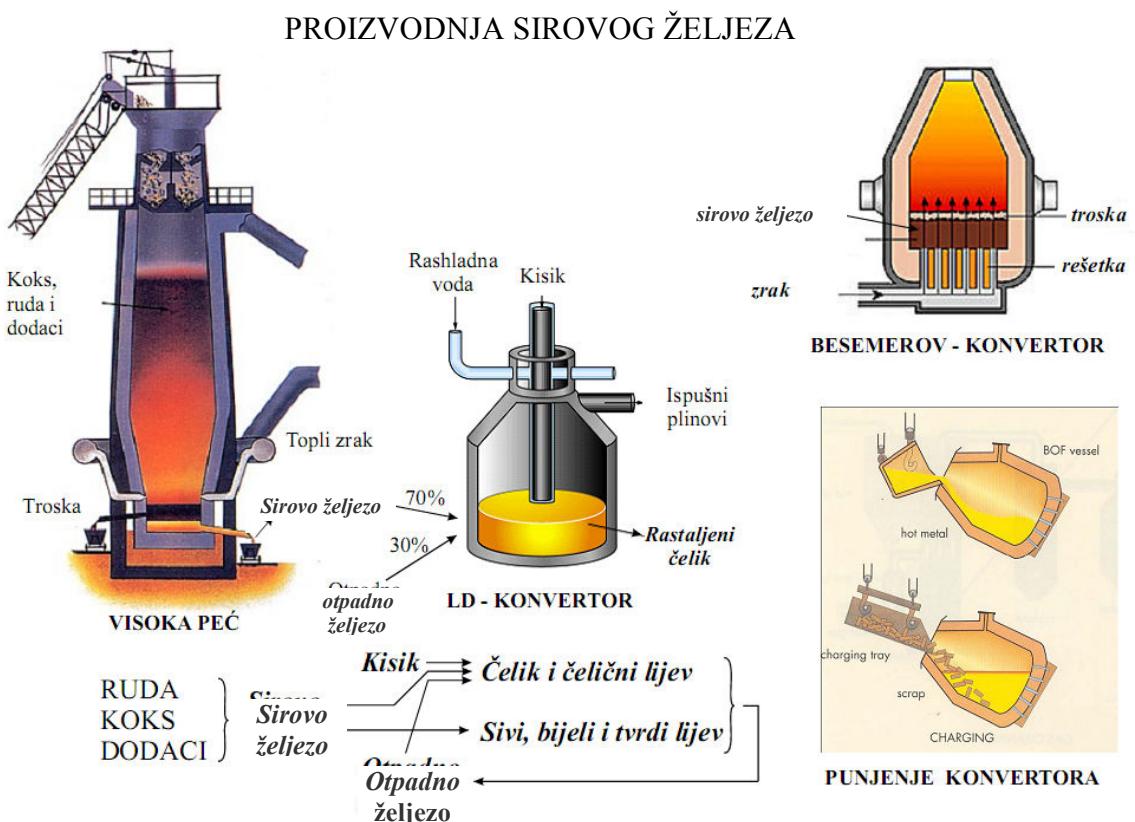
Eutektička temperatura nalazi se na oko 1152°C, pri koncentraciji oko C = 4.3%. Ovo je znatno niža temperatura od tališta čistog željeza (oko 1539°C) i temperature sublimacije ugljika (preko 3000°C).

### 6.1.1 Dobivanje sirovog željeza

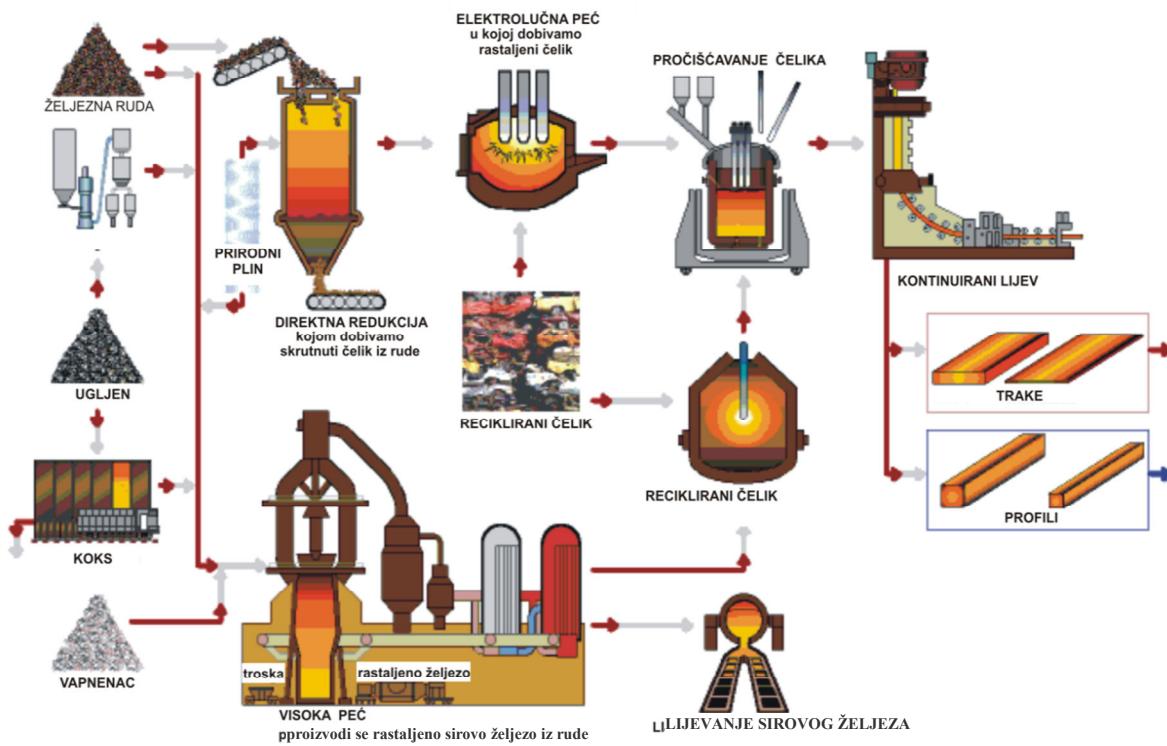
Sirovo željezo se dobiva u visokim pećima s koncentracijom ugljika oko eutektičke, što olakšava taljenje zbog nižih temperatura. Proizvodnja sirovog željeza u svijetu u 2008. godini prelazi 1300 milijuna tona, što zahtijeva odgovarajuće količine rudače, koksa i metalurških dodataka. Dio sirovog željeza dobiva se i pretaljivanjem otpadnog željeza. Od ove količine željeza najviše se proizvodi ugljični čelik sa sadržajem ugljika do 0,4%, od kojeg se izrađuju različiti poluproizvodi-cijevi, limovi, profili, trupci, poluge, otkivci. Legirani čelici se proizvode u znatnoj manjim količinama i skuplji su od ugljičnog čelika. Čelici su metastabilne vrste legiranog željeza i ugljik je u njima vezan sa željezom u željezni karbid. Ostale vrste legura željeza su najčešće lijevovi, u kojima najviše ima sivog lijeva sa svojim podvrstama. Sivi lijev je legirano željezo sa stabilnom strukturalom i ugljikom izlučenim u obliku grafita. Dobivanje željeza je predmet metalurških studija i ovdje se iznosi samo u elementarnim crtama.

Željezna rudače, u kojoj dominiraju oksidi i sulfidi reducira se u visokim pećima pomoću koksa (ugljik) na sirovo željezo s temperaturom taljenja na oko 1150°C i približno eutektičkom koncentracijom od oko 4% C. Ako u metalurškim dodacima i oblozi peći prevladavaju spojevi silicija (kisela obloga) dobivaju se stabilne strukture (sivo sirovo željezo), a ukoliko prevladavaju spojevi mangana (bazična obloga, vapnenac i dolomit) onda je metastabilne (bijelo sirovo željezo). U sirovom željezu prilikom redukcije rudače ostaje nešto silicija i mangana, koje držimo korisnim pratiteljima u leguri, ali i sumpora i fosfora, koji su nečistoće, pa ih se nastoji ukloniti iz taline naknadnim zahvatima. Talina sirovog željeza se ulijeva u peći za dobivanje čelika, a koriste se i procesi gdje se u peć ubacuje i određena količina otpadnog, starog čelika. Sadržaj ugljika se smanjuje propuhivanjem taline kisikom, pri čemu najprije izgara ugljik zbog većeg afiniteta prema kisiku, zatim silicij i mangan, koji tvore trosku što isplivava na površinu. Posljednje oksidira željezo, ali se propuhivanje prekida nego što izgori sav ugljik. Izgaranjem ugljika raste i temperatura

taline od eutektičke temperature do temperature od oko  $1500^{\circ}\text{C}$ , što se može vidjeti iz dijagrama. Sadržaj ugljika, zavisno od trajanja propuhivanja pada s oko 4% na ispod 2%, najčešće ispod 0.4%. Čelik se prije najviše dobivao Bessemerovim i SiemensMartinovim postupkom, ali sada prevladava dobivanje čelika u elektrolučnim pećima. Zbog čistije atmosfere u ovim pećima, dobiva se i kvalitetniji čelik. Talinu zagrijava električni luk između elektroda u poklopcu peći. Kisik se upuhuje kroz vodom hlađenu cijev. Na površini taline izdvaja se troska s nečistoćama, a čisti čelik se ulijeva u lonce, a zatim pretače u kalupe gdje se skrućuje u odgovarajuće oblike za daljnju prerađu. U modernim čeličanama proces između visoke peći, elektropeći za čelik i izrade poluproizvoda je povezan tako da se štedi ogromna količina energije. Daljnja ušteda je izravno oblikovanje poluproizvoda lijevanjem kroz hlađenu kokilu odgovarajućeg oblika – kontinuirani lijev. Duljina gredice ili lima nije ograničena. Nakon lijevanja limovi se valjaju na konačnu mjeru da se zrno usitni i poboljšaju mehanička svojstva. Na taj je način izbjegnut skupi proces lijevanja čelika u ingote i brame, grijanje tih odljevaka i valjanje u valjačkim stanovima, sa svim nedostacima koje nosi skrućivanje masivnih komada (segregacija!). Shematski prikaz proizvodnje sirovog željeza dan je na *slici 6.2.*



*Slika 6.2. Shematski prikaz dobivanja sirovog željeza*



*Shematski prikaz proizvodnje čelika od rudače željeza do lijevanja sirovog željeza odnosno kontinuiranog lijeva ploča i trupaca*

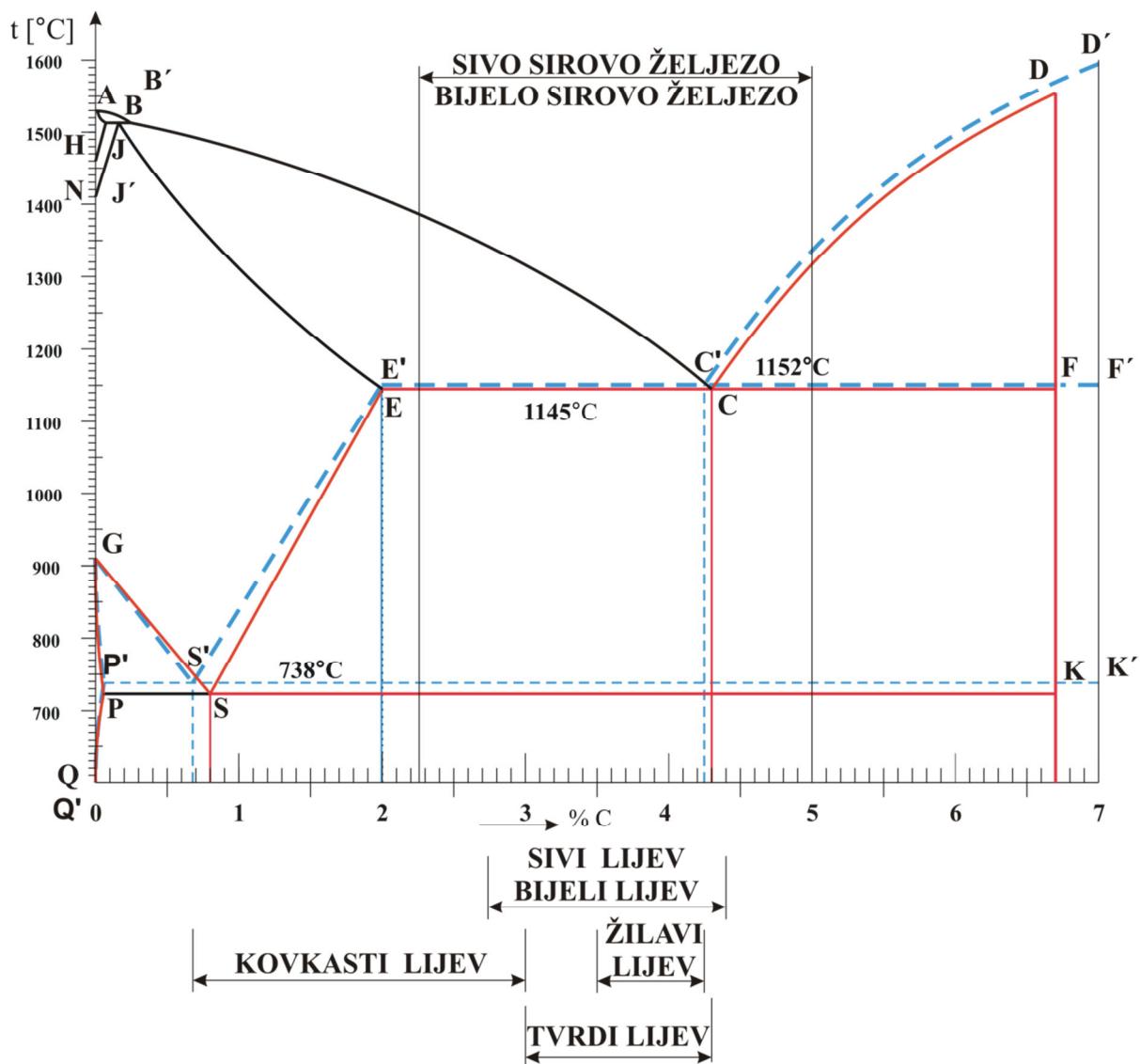
Prilikom propuhivanja taline nastaje i manja količina željeznog oksida, koja je jednolikoraspodijeljena u metalu. Kasnijom preradom koja uključuje taljenje (zavarivanjem) dolazi do redukcije Fe-oksida ugljikom izdvojenim iz  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Ova reakcija razvija plinove CO i  $\text{CO}_2$  i pjeni metal, pa se ovakav čelik naziva neumirenim čelikom.

Dodavanjem silicija u talinu željezo manje oksidira, pa se ovakav čelik naziva poluumireni. Prepoznaje se po malom sadržaju silicija u kemijskoj analizi materijala.

Ako se sasvim želi izbjegići željezne okside u čeliku, ubacuje se aluminij u talinu. Aluminij ima znatno veći afinitet prema kisiku od željeza i tako ga štiti od oksidacije. Ovakav čelik, koji u kemijskom sastavu ima malu količinu aluminija, naziva se umirenim čelikom. Većina kvalitetnijih konstrukcijskih čelika su umireni.

Znatan utjecaj na svojstva čelika, a posebno na otpornost prema lomu i koroziji, imaju brojne primjese, koje se često namjerno dodaju u vrlo malim količinama. Proces je potrebno pažljivo voditi jer se radi o vrlo uskim tolerancijama sadržaja pojedinih elemenata.

Visokokvalitetni čelici se dobivaju u manjim količinama elektro pretaljivanjem pod troskom, prelijevanjem pod zaštitom argona ili u vakuumu. Kod vakuumskog pretaljivanja dobiva se metal s vrlo niskim sadržajem plinova. U vakuumu dolazi do otplinjavanja rastaljenog metala. Prikaz raznih vrsta legiranih željeza dan je shematski na slici 6.3. U nastavku ćemo obraditi osnovne vrste - čelik i čelični lijev, kovkasti lijev, sivi i žilavi lijev, bijeli i tvrdi lijev, dok se bijelo i sivo sirovo željezo, koji su sirovine, neće promatrati.



*Slika 6.3. Prikaz područja koncentracija za razne vrste željeza*

## 6.2 Stabilni slučaj slijevanja željeza i ugljika, Fe-C dijagram

Dio dijagrama označen isprekidanom (plavom) linijom na *slici 6.3*, odnosi se na stabilan slučaj slijevanja, tj. na potpuno ravnotežnu pretvorbu. Ovaj dijagram predstavlja promjene stanja Fe-C legura pri vrlo sporom hlađenju. Sporijim hlađenjem od ovoga dobili bi isti dijagram. Sadržaj ugljika prikazan je na apscisi, a na ordinati je prikazana temperatura. S obzirom da željezo hlađenjem mijenja rešetku, do mijenjanja dolazi i kod legura, samo su temperature i intervali mijenjanja različiti. Na slici je prikazan stabilni dijagram slijevanja željeza i ugljika. Karakteristične linije pretvorbi u dijagramu imaju svoje nazive i to:

- B'- C' - D': likvidus liniju
- J' - E' - C' - F': solidus liniju
- E' - S': granica rastvorivosti ugljika u rešetci željeza.

### 6.2.1 Pojave pri skrućivanju

Promatrat ćemo hlađenje taline karakterističnih šest koncentracija i to od stanja taline do sobne temperature prema *slici 6.4*. Linija B' - C' - D' predstavlja likvidus liniju, a linija J' - E' - C' - F' solidus liniju. Dijagram ima eutektički karakter s djelomičnom rastvorivost C u rešetci Fe, te potpunom nerastvorivosti Fe u rešetci C.

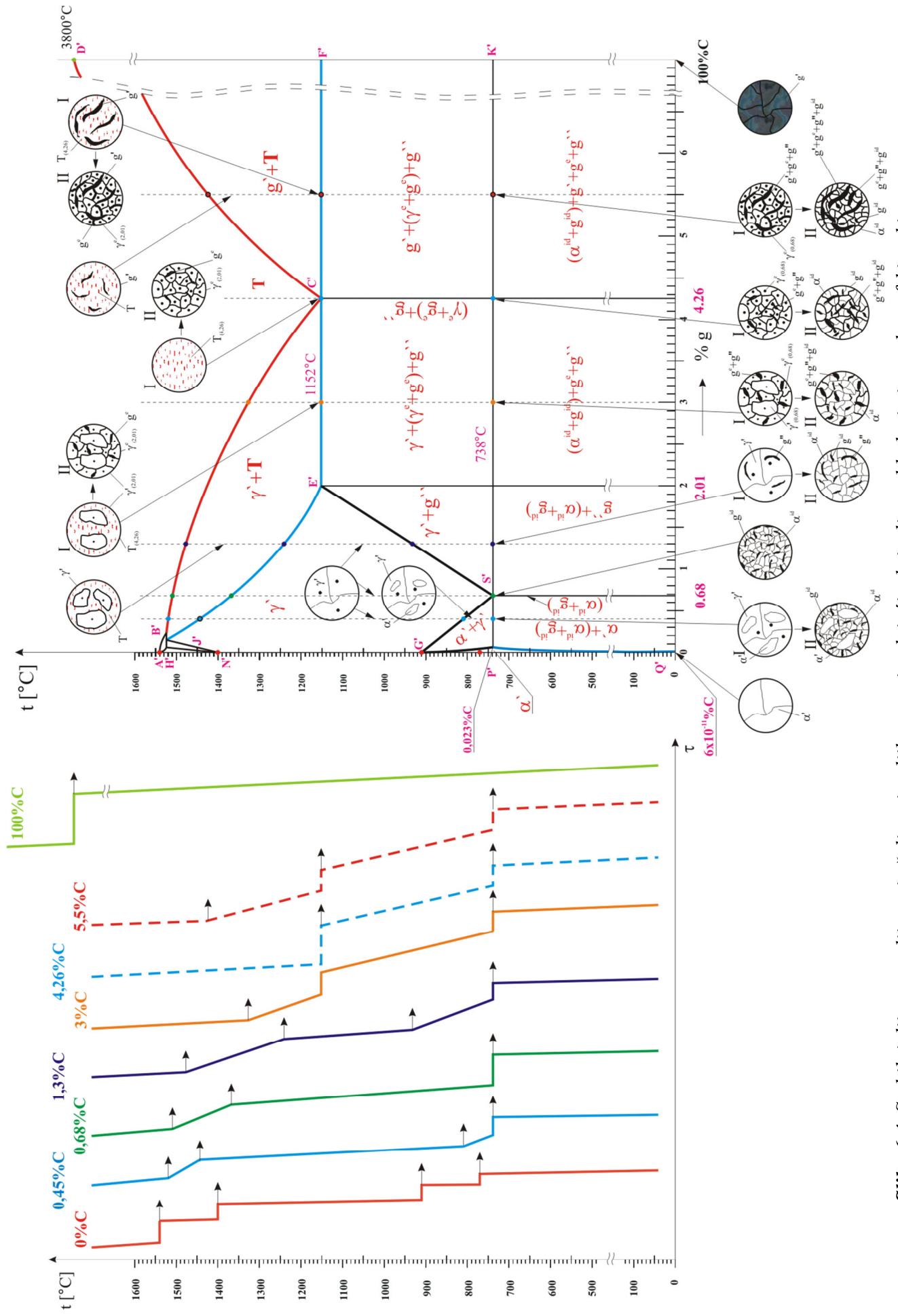
#### *Skrućivanje legure podeutektoidne koncentracije "x=0,3%C"*

Legure do 0,2%C započinju skrućivanje peritektičkom pretvorbom. Zbog toga ove legure započinju skrućivanje kao tzv.  $\delta'$ - rešetke sa prostorno centriranim kubom. Ovo se događa na jako visokim temperaturama (iznad  $1410^{\circ}\text{C}$ ) i za našu praksu ima manju važnost.

Nakon skrućivanja imamo homogenu leguru  $\gamma'$  uključinskih mješanaca (Fe rešetka sa uključenim atomima C), plošno centriranu kubnu rešetku koju nazivamo **austenit** (prema engleskom metalurgu Austenu). Od prije nam je poznata alotropska modifikacija čistog željeza (plošno centrirana u prostorno centriranu kubnu rešetku) na  $910^{\circ}\text{C}$  pa je za očekivati ovu promjenu rešetke i za našu leguru. To se uistinu i događa, ali na nešto nižim temperaturama, što ovisi o sadržaju ugljika. Povećanjem sadržaja ugljika u leguri do  $0,68\%C$  temperatura modifikacije pada na  $738^{\circ}\text{C}$  i dalje, dok za veće koncentracije, ostaje konstantna. Na ovoj temperaturi austenit prestaje biti stabilna faza.

Dalnjim hlađenjem nastalog austenita i presijecanjem linije G'-S' ( $A_3$  linija) započinje pretvorba  $\gamma' \rightarrow \alpha'$ . To je promjena koja se odvija u krutnini. Novonastali  $\alpha'$  mješanac se naziva **ferit** (zbog toga što je rastvorivost ugljika u ovoj rešetki neznačna). Ferit koji nastaje iz primarnog austenita  $\gamma'$  nazivamo primarni ferit  $\alpha'$ . Pretvorba završava hlađenjem do eutektoidne temperature  $738^{\circ}\text{C}$ . Ta se izoterma u dijagramu naziva se  $A_1$  linija. S obzirom na to da je temperatura  $A_1$  niža od Curieve ( $A_2$ ) to materijal postaje magnetičan prijelazom u feritnu fazu.

U ovom procesu dolazi do pretvorbi sličnih eutektičkim, ali kako se one odvijaju u krutnini nazivaju se **eutektoidne pretvorbe**. Analogno prijelazu eutektičke taline u eutektikum na eutektičkoj temperaturi, dolazi do prijelaza krutnine eutektoidne koncentracije u eutektoid na eutektoidnoj temperaturi. Eutektoidna pretvorba austenita u ferit praćena je izraženim povećanjem volumena. Rastvorivost uključinskog ugljika u feritu ( $0,023\%$  na eutektoidnoj temperaturi) znatno je manja nego u austenitu ( $0,68\%$  na eutektoidnoj temperaturi), tako da zbog pretvorbe dolazi do izlučivanja eutektoidnog grafita. Ovaj grafit se ne razlikuje od eutektičkog i sekundarno izlučenog grafita. U prvom trenutku imamo  $\alpha'$  kristale u matrici  $\gamma'$  mješanaca.



*Slika 6.4. Stabilni dijagram slijevanja željeza i ugljika sa pripadajućim krivuljama hlađenja i metalografskim skicama*

Eutektoidnom pretvorbom, pri konstantnoj temperaturi, preostali  $\gamma'$  mješanci eutektoidne koncentracije 0,68%C modificira se u smjesu sitnih kristala ferita i grafita koje označavamo indeksom " id"  $\gamma' \xrightarrow{768} (\alpha^{id} + g^{id})$  i nazivamo eutektoid. Tako, nakon eutektoidnog raspada, naša legura ima heterogeni fazni sastav  $\alpha' + (\alpha^{id} + g^{id})$ . Hlađenjem do sobne temperature smanjuje se parametar  $\alpha$  rešetke, pa se ionako mala rastvorivost ugljika dodatno smanjuje (prema liniji promjene rastvorivosti C u rešetki  $\alpha$  mješanaca P'- Q') na zanemarivo malu vrijednost. Višak ugljika izlučuje se iz rešetki  $\alpha$  mješanaca kao  $g''$ . Kako se radi o zanemarivo maloj količini izlučivanje, ove faze nećemo razmatrati, nego ćemo usvojiti da dolazi do povećanja udjela  $\alpha^{id} + g^{id}$  faze snižavanjem od eutektoidne do sobne temperature. Faza  $g''$  nije upisana niti u naše dijagrame slijevanja. Opisane promjene strukture mogu se vidjeti u metalografskim skicama na *slici 6.4.*

### ***Skrućivanje legure eutektoidne koncentracije 0,68%C***

Ova legura započinje skrućivanje taline kao i prethodna tako da nakon prolaska ispod solidus linije imamo homogenu strukturu primarnog austenita izvorne koncentracije sve do eutektoidne temperature. Na ovoj temperaturi dolazi do eutektoidnog raspada  $\gamma' \rightarrow (\alpha^{id} + g^{id})$  uz stojište na krivulji hlađenja. Daljnje promjene su vezane uz izlučivanje neznatne zanemarive količine  $g''$  iz  $\alpha^{id}$  ferita. Vidi metalografsku skicu na *slici 6.4.*

### ***Skrućivanje legure nadeutektoidne koncentracije "b=1,5%C"***

Presijecanjem likvidus linije B'-C' započinje skrućivanje nastajanjem  $\gamma'$  mješanaca. Skrućivanje se završava presijecanjem solidus linije J'- E'. Nakon skrućivanja imamo potpuno homogenu strukturu – čisti  $\gamma'$  mješanci. Dalnjim spuštanjem temperature, presijecanjem linije promjene rastvorivosti S'- E' (nazivamo je  $A_{cm}$  linija) austenit ne može više rastvoriti ovoliku količinu C pa dolazi do njihovog izlučivanja iz rešetke  $\gamma'$  mješanca stvarajući kristale grafita  $g''$ . Linija granice rastvorivosti S'- E' pokazuje nam koliko najviše ugljika može rastvoriti  $\gamma$  rešetka između 1152°C i 738°C. Hlađenjem do 738°C u prvom trenutku imamo  $\gamma'$  mješanac eutektoidne koncentracije 0,68%C i  $g''$  kristale čistog grafita. Nakon eutektoidne pretvorbe imamo sljedeći fazni sastav:  $g'' + (\alpha^{id} + g^{id})$ . Koncentracija  $\alpha^{id}$  odgovara koncentraciji ferita za ovu temperaturu, tj. 0,023%C, a koncentracija  $g^{id}$  je 100%. Do sobne temperature izlučuje se nešto  $g''$  iz  $\alpha$  mješanaca kako je to opisano za koncentraciju "a". Pogledajmo metalografske skice na *slici 6.4.*

### ***Skrućivanje legure podeutektičke koncentracije "c=3%C"***

Skrućivanje započinje presijecanjem likvidus linije B'-C' i nastajanjem  $\gamma'$  mješanaca, a završava na eutektičkoj temperaturi 1152°C – linija E'- C'. Na eutektičkoj temperaturi u prvom trenutku imamo zrna austenita  $\gamma'$  koncentracije 2,01%C i talinu eutektičke koncentracije 4,26%C. Zbog eutektičke pretvorbe dolazi do stojišta na krivulji hlađenja. Struktura je, u drugom trenutku, nakon skrućivanja heterogena i sastoji se od:  $\gamma' + (\gamma^e + g^e)$ . Eutektikum se sastoji od sitnih kristala austenita i grafita koji se skrutiće oko zrna primarnog austenita. Naravno, koncentracija  $\gamma^e$  odgovara koncentraciji austenita za ovu temperaturu, tj. 2,01 %C, a koncentracija  $g^e$  je 100 %C. Slično kao i u prethodnom slučaju, hlađenjem do eutektoidne temperature dolazi do izlučivanja viška ugljika zbog promjene rastvorivosti ( $A_{cm}$  linija) iz  $\gamma'$  i  $\gamma^e$  pa nastaju  $g''$  kristalići grafita. Na eutektoidnoj temperaturi dolazi do

eutektoidnog raspada austenita  $\gamma'$  i  $\gamma^e$  koncentracije 0,68%C u eutektoid ( $\alpha^{id} + g^{id}$ ) sa stojištem na krivulji hlađenja. Koncentracije komponenti eutektoida opisane su u prethodnom slučaju, kao i promjene koje nastaju hlađenjem do sobne temperature. Pogledajmo metalografske skice na *slici 6.4.*

### **Skrućivanje legure eutektičke koncentracije 4,26%C**

Hlađenjem do eutektičke temperature imamo samo talinu. Na eutektičkoj temperaturi eutektička talina skrutne u čisti eutektikum ( $\gamma^e + g^e$ ) sa stojištem na krivulji hlađenja. Daljnje pojave koje nastaju hlađenjem do sobne temperature identične su kao u prethodnom slučaju. Promotrimo metalografske skice na *slici 6.4.*

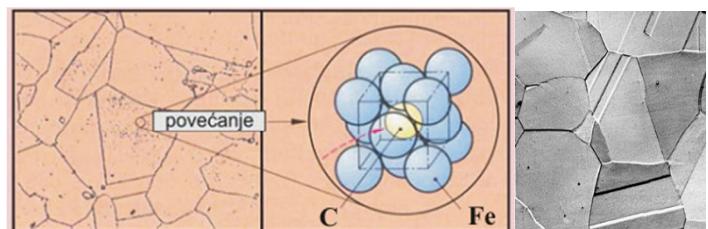
### **Skrućivanje legure nadeutektičke koncentracije "d=5,5%C"**

Presijecanjem likvidus linije C'-D' nastaju prve klice kristalizacije  $g'$  koncentracije 100%C. Do eutektičke temperature raste količina  $g'$ . U prvom trenutku prije eutektičke pretvorbe imamo  $g'$  kristale u talini eutektičke koncentracije. Nakon eutektičke pretvorbe sa stojištem na krivulji hlađenja, iz taline nastaje eutektikum ( $\gamma^e + g^e$ ), tako da je fazni sastav  $g' + (\gamma^e + g^e)$ . Hlađenjem do eutektoidne temperature dolazi do smanjivanja rastvorivosti  $\gamma^e$  pa se izluči nešto  $g''$ . Na eutektoidnoj temperaturi dolazi do eutektoidnog raspada  $\gamma^e$  faze uz stojište na krivulji hlađenja u eutektoid ( $\alpha^{id} + g^{id}$ ). Pojave pri dalnjem hlađenju su opisane u prethodnim slučajevima. Promotri metalografske skice na *slici 6.4.*

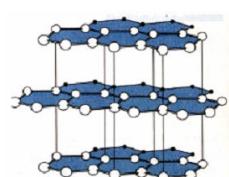
## **6.2.2 Faze u krutnini**

Faze u krutnini koje nastaju potpuno ravnotežnom pretvorbom:

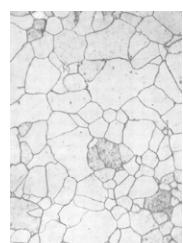
**Austenit  $\gamma'$**  - uključinski mješanac željeza sa uključenim atomima ugljika. Kristalizira plošno centriranom kubnom rešetkom. Atom ugljika uključen je u središte kuba. Rastvara veću količinu uključinskih atoma. U temperaturnom intervalu između linije  $A_3$  (linija G'-S') i  $A_1$  linije (P'-S'-K') prelazi u ferit (alotropska modifikacija rešetke), a višak ugljika se izlučuje.



**Grafit  $g', g'', g^e, g^{id}$**  - heksagonska rešetka ugljika, meka faza, izlučuje se u obliku grafitnih listića u sivom i srodnim ljevovima. Heksagonska rešetka daje ugljiku dobra svojstva mazivosti, tako da se u smislu čvrstoće materijala mogu listići grafita smatrati šupljinom, odnosno oštrim zarezom u metalnoj matrici. Nalazi se u svim stabilnim vrstama legiranog željeza. Može nastati i dugotrajnim žarenjem metastabilnih legiranih željeza (dobivanje kovkastog lijeva).

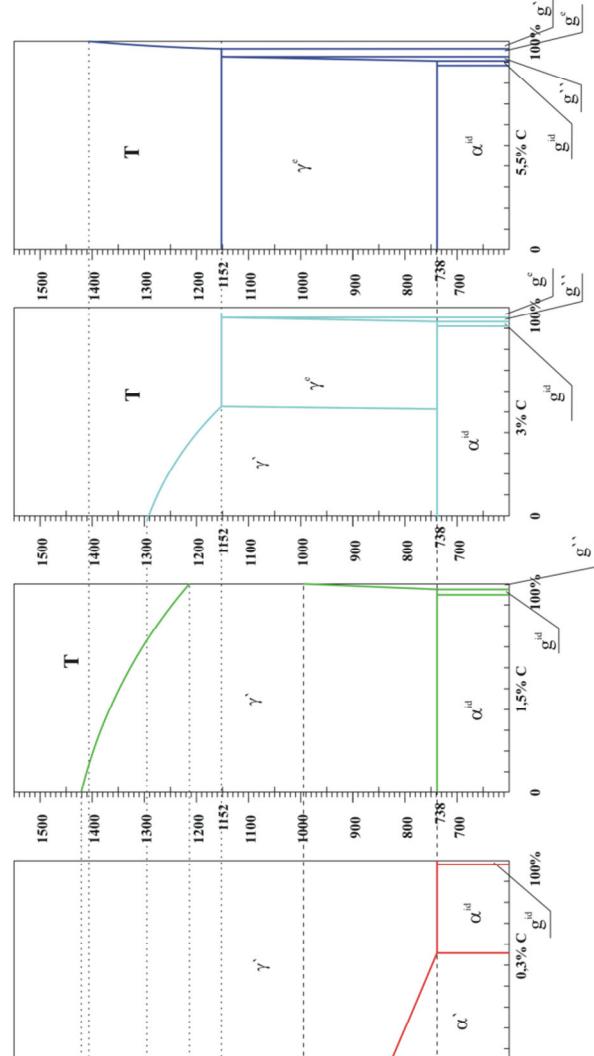
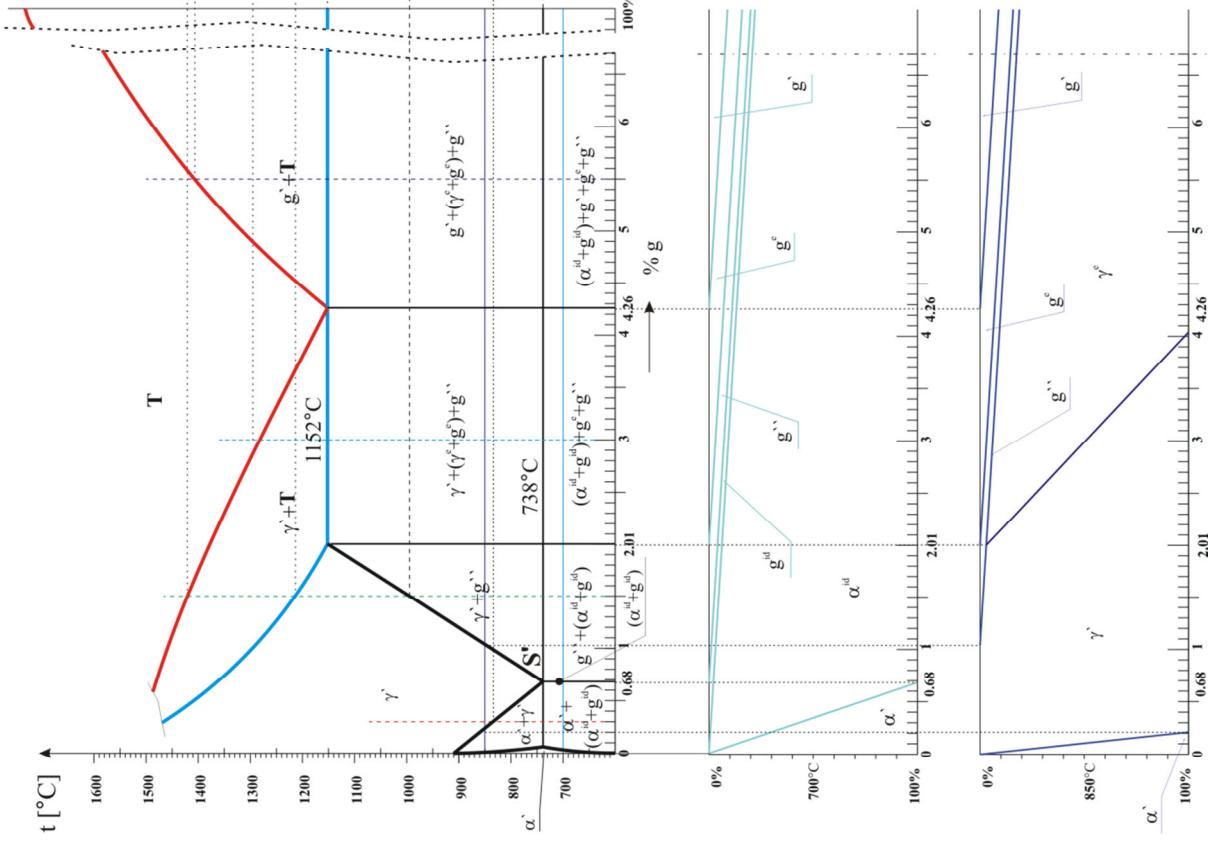


**Ferit  $\alpha', \alpha^e, \alpha^{id}$**  - željezna faza sa  $\alpha$  rešetkom (prostorno centrirani kub), postojana na sobnoj temperaturi. Na sobnoj temperaturi može sadržavati zanemarivo malo uključenih atoma ugljika pa je možemo smatrati rešetkom čistog željeza. Feromagnetična je faza ispod 768°C ( $A_2$  temperatura). Ferit koji nastaje iznad ove temperature nije feromagnetičan i nekad se obilježavao kao  $\beta$  faza. Čvrstoća ferita iznosi do 250 [MPa], a rastezljivost do 50%.



Dijagrami količinskih udjela faza za nekoliko različitih koncentracija i temperatura mogu se vidjeti na *slici 6.5.*

## GRAFIČKI PRIKAZ UDJELA FAZA ZA STABILNI DIJAGRAM Fe-C



Slika 6.5. Dijagrami količinskih udjala faza za stabilni slučaj slijevanja Fe-C

### 6.3 Metastabilni dijagram slijevanja Fe-C

Dijagram na *slici 6.3* označen isprekidanom crtom predstavlja metastabilni sustav Fe-C, nastao zbog veće brzine hlađenja (važan je i utjecaj primjesa, naročito silicija i mangana). Na *slici 6.11* prikazan je metastabilni dijagram slijevanja željeza i ugljika. Metastabilna struktura razlikuje se od stabilne po tome što je ugljik vezan u kristale tvrdog kemijskog spoja  $\text{Fe}_3\text{C}$ , dok je u stabilnoj strukturi ugljik izdvojen u mekim kristalima grafita.

Kod koncentracije od oko 6,687% C dobiva se čitava masa kao kemijski spoj, pa se dijagram može promatrati kao dijagram dviju komponenti, željeza Fe i željeznog karbida  $\text{Fe}_3\text{C}$ . U području koncentracija ugljika od 0 do 6,687%, nalaze se feritna i karbidna faza u različitim omjerima.

S obzirom na to da u svakom dijelu metastabilnog dijagraama postoje upotrebljive vrste legiranog željeza, analizirat ćemo svaki dio pojedinačno, i to eutektički (4,3%), nadeutektički (od 4,3 do 6,7%) i podeutektički (od 2,03 do 4,3%), te eutektoidni (0,8%), nadeutektoidni (od 0,8 do 2,03%) i podeutektoidni (od 0 do 0,8%).

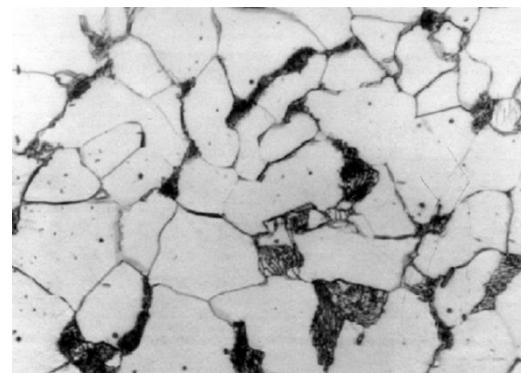
#### 6.3.1 Pojave pri skrućivanju

##### *Skrućivanje legure podeutektoidne koncentracije 0,5% C*

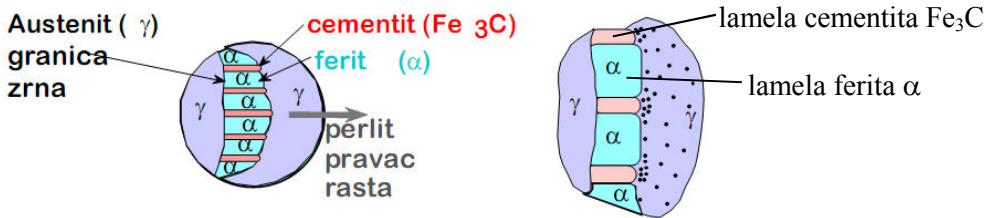
Podeutektoidni čelici se daleko više (količinski) troše od svih drugih gvožđa i ostalih metala. Promatra se čelik s 0,5% C (ovo je blizu sadržaja ugljika kojeg imaju čelici za poboljšavanje,...).

Zanemarivši peritektičku pretvorbu na temperaturi iznad 1400°C, možemo smatrati da nakon skrućivanja postoji homogena faza primarnog austenita. Hlađenjem austenita ispod temperature pretvorbe austenita u ferit kod čistog željeza (linija G-S), započinje izlučivanje ferita između austenitnih zrna. Ova temperatura je niža nego kod čistog željeza zbog utjecaja ugljika rastvorenog u austenitu, a spušta se na eutektoidnu temperaturu pri koncentraciji od 0,8% ugljika. Spojnica između tih dviju temperatura pretvorbi gama u alfa naziva se linija  $A_3$ . Hlađenjem čelika u intervalu između  $A_3$  i eutektoidne temperature koju označavamo sa  $A_1$  izlučuje se sve više ferita iz austenita. Na temperaturi 768°C nemagnetična  $\alpha'$  rešetka postaje paramagnetična. Iz austenita pretvorenog u ferit izlučuje se ugljik jer ga ferit može rastvoriti vrlo malo. Ovaj izlučeni ugljik obogaćuje preostali austenit, tako da na eutektoidnoj temperaturi  $A_1$  preostali austenit ima eutektoidnu koncentraciju. Ferit izlučen u intervalu temperatura  $A_3-A_1$  naziva se primarni ferit  $\alpha'$ .

Ohlađivanjem na temperaturu eutektoidne pretvorbe 723°C  $A_1$  (koja je nešto niža za metastabilni proces slijevanja nego za stabilni), austenit se pretvara u eutektoidni ferit, a višak ugljika tvori eutektoidni cementit. Ova pretvorba se odvija unutar austenitnog zrna eutektoidne koncentracije, tako da prema vani zrno djeluje kao nova faza. U stvari, to je eutektoidni ferit i cementit, najčešće u formi lamele složenih u sendvič. Lamele eutektoidnog ferita  $\alpha'^{id}$  su znatno deblje nego lamele eutektoidnog cementita  $\text{Fe}_3\text{C}^{id}$ . Ova eutektoidna smjesa naziva se još i perlit i obično promatra kao zasebna faza. Nastajanje perlita je prikazano na *slici 6.7*.



*Slika 6.6. Mikrostruktura čelika s 0,2% C*



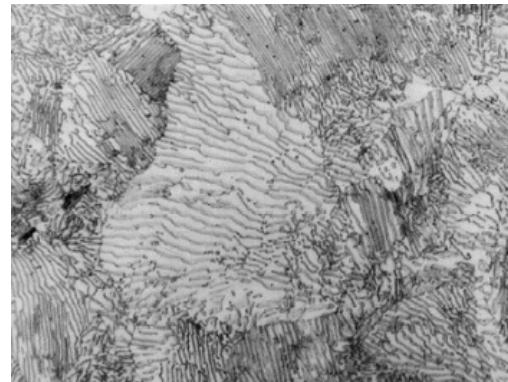
$$\text{Perlita} = 88\% \text{ ferita} + 12\% \text{ Fe}_3\text{C}$$

*Slika 6.7. Nastajanje perlita*

Austenit eutektoidne koncentracije pretvara se u perlit na  $A_1$  temperature. Nastala struktura ispod  $A_1$  sastoje se od zrna primarnog ferita i perlita u međuprostoru feritnih zrna, *slika 6.6*. Količina feritne i perlitne faze može se odrediti pomoću polužnog zakona. U promatranom slučaju čelika s 0,5% C prema polužnom zakonu ferita  $\alpha'$  ima 37,5%, a perlita ( $\alpha'^{id} + Fe_3C^{id}$ ) 62,5%. Kod sadržaja ugljika ispod 0,4% prevladava ferit, pa je čelik rastezljiviji i mekši, dok za  $C > 0,4\%$  raste čvrstoča i tvrdoča jer prevladava perlitra faza. Hlađenjem do sobne temperature smanjuje se ionako mala rastvorivost ugljika u rešetki ferita koja na sobnoj temperaturi iznosi  $2 \cdot 10^{-7}\%C$ . Ovaj višak ugljika zajedno s malim dijelom ferita tvori tercijarni cementit  $Fe_3C''$  čija je količina neznatna pa je ovdje nećemo ni razmatrati.

#### *Skrućivanje legure eutektoidne koncentracije 0,8%C*

Čelik eutektoidne koncentracije skrućuje se kao primarni austenit, koji se ne mijenja (osim smanjenja dimenzije rešetke zbog hlađenja) do eutektoidne temperature  $A_1$ . Na toj temperaturi austenit se pretvara u perlit, kako je prije opisano. Čitava struktura sastoje se samo od perlita. Do sobne temperature pojave su opisane za podeutektoidnu koncentraciju.



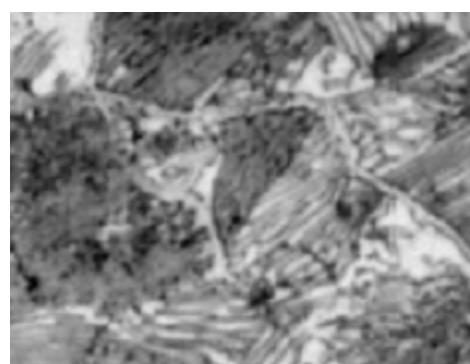
*Slika 6.8. Mikrostruktura čelika s 0,8%C*

#### *Skrućivanje legure nadeutektoidne koncentracije 1,3%C*

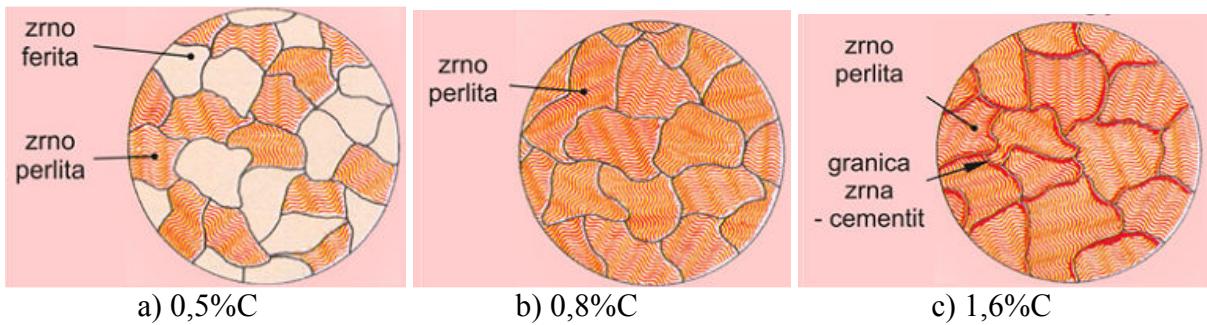
Nadeutektoidni čelik skrućuje se u primarnim kristalima austenita. Hlađenjem se smanjuje rastvorivost ugljika u austenitu i na nekoj temperaturi dolazi do izlučivanja sekundarnog cementita  $Fe_3C''$ .

Granica rastvorivosti ugljika u austenitu označava se kao  $A_{cm}$  (linija S-E). Sekundarni cementit se izlučuje kao ovojnica oko austenitnih zrna, ohlađenjem na  $A_1$  austenit se pretvara u perlit, što je već opisano.

Nadeutektoidni čelici koriste se najviše za izradu alata jer su jako tvrdi. Mogu se oblikovati u toplom stanju, zagrijani na temperaturu iznad  $A_{cm}$ , dakle, u području homogene austenitne faze.



*Slika 6.9. Mikrostruktura čelika s 1,8%C*



*Slika 6.10. Mikrostrukture čelika*

Na slici 6.10 prikazane su mikrostrukture čelika na sobnoj temperaturi i to za podeutektoidni 0,5%C, eutektoidni 0,8%C i nadeutektoidni 1,6%C.

#### ***Skrućivanje legure podeutektičke koncentracije 3% C***

Podeutektička koncentracija predstavlja područje bijelog lijeva. Hlađenjem taline na likvidus liniju, kristalizira primarni austenit, a ohlađenjem na eutektičku temperaturu između primarnih kristala skrućuje se eutektikum austenita i cementita ( $\gamma^e + Fe_3C^e$ ). Hlađenjem do  $A_1$  smanjuje se rastvorivost ugljika u austenitu, kao što je već ranije opisano. Ugljik izlučen iz austenita tvori sekundarni cementit, koji ovija austenitna zrna. Na temperaturi  $A_1$  dolazi do eutektoidnog raspada austenita u perlit, kako je prije opisano.

#### ***Skrućivanje legure eutektičke koncentracije 4,3% C***

Eutektička legura skrućuje se na temperaturi od  $1145^{\circ}C$ , dakle nešto nižoj nego kod stabilnog dijagrama. Nastaje eutektikum austenitnih mješanaca s rastvorenim 2,03 % C i željeznog karbida,  $Fe_3C$ , koji ima u kristalima 6,7% C. Ovaj eutektikum naziva se ledeburit (prema Ledeburu, metalurgu iz XIX. stoljeća).

Vidljivo je, prema polužnom zakonu, da je količina obje faze približno podjednaka. Željezni karbid, odnosno cementit, ima komplikiranu kristalnu rešetku, što mu daje vrlo veliku tvrdoću. Ovaj ledeburitni eutektikum je zato vrlo tvrda i krhkva tvar. Hlađenjem u intervalu temperatura od eutektičke temperature do  $A_1$  smanjuje se rastvorivost ugljika u austenitu, kako je već opisano, a višak ugljika vezuje se sa željezom u sekundarni cementit. Izlučivanje sekundarnog cementita odvija se pretežno po granicama austenitnih zrna, gdje cementit tvori tvrdu ovojnici oko zrna. Ova ovojnica kasnije pokazuje koliko je bilo austenitno zrno prilikom skrućivanja, jer se dalnjim hlađenjem ne mijenja.

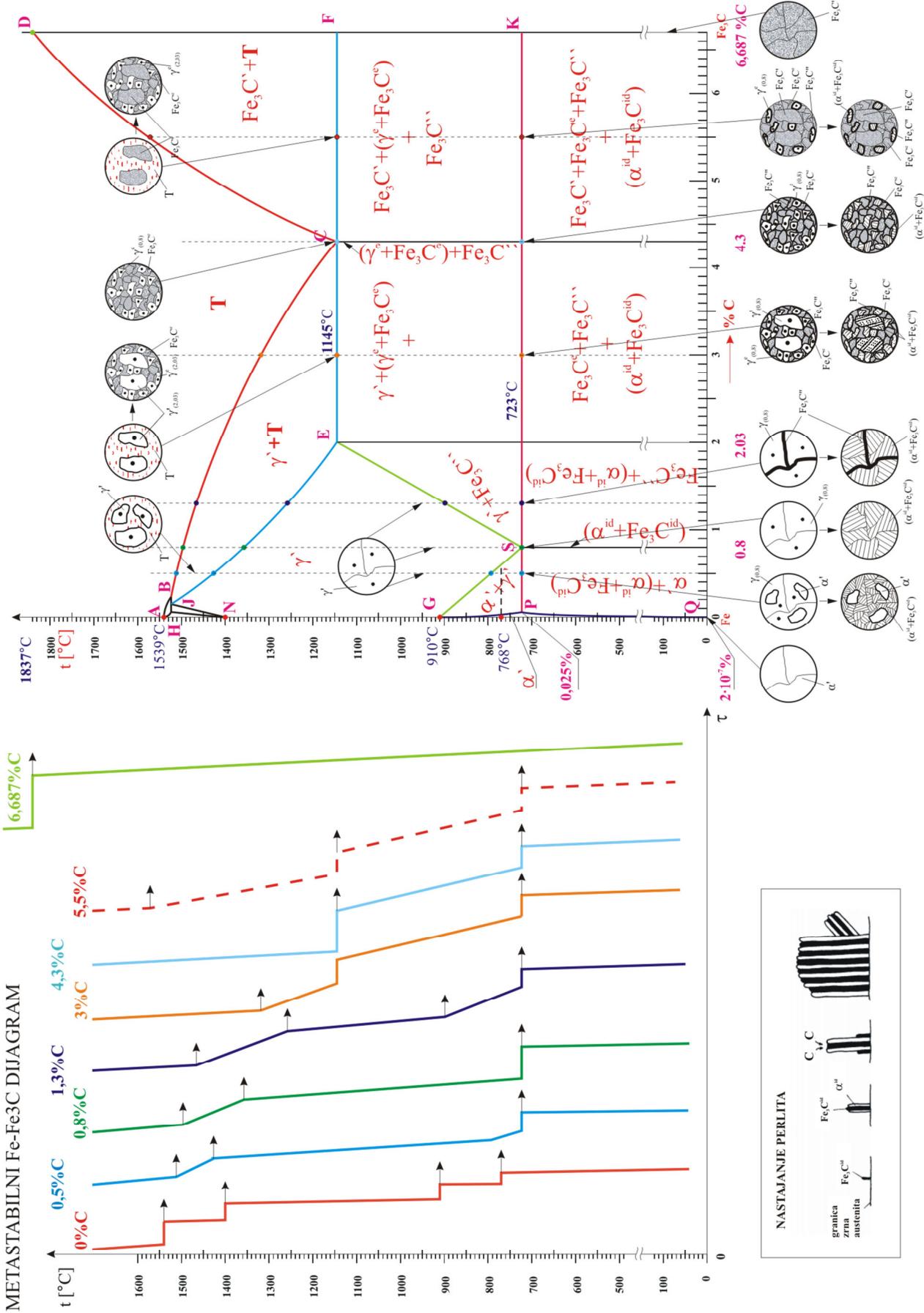
Ohlađivanjem na temperaturu eutektoidne pretvorbe  $A_1$  (koja je nešto niža za metastabilni slučaj slijevanja nego kod stabilnog), austenit se pretvara u eutektoidni ferit, a višak ugljika tvori eutektoidni cementit.

#### ***Skrućivanje legure nadeutektičke koncentracije 5,5% C***

Legure nadeutektičke koncentracije započinju skrućivanje s primarnim kristalima cementita, a zrna imaju oblik oštrih ploča u svim smjerovima. Na eutektičkoj temperaturi skrutne se eutektikum austenita i cementita koji popunjava međuprostor između ploča primarnog cementita. Hlađenjem do temperature  $A_1$  izlučuje se oko austenitnih zrna ovojnica sekundarnog cementita. Na eutektoidnoj temperaturi  $A_1$  austenit se pretvara u perlit, tj. u eutektoidnu smjesu ferita i cementita. Vidljivo je da u materijalu prevladavaju izuzetno tvrde i krhke faze, tako da se nadeutektička željeza koriste samo u nekim slučajevima kao alati.

Mogu se oblikovati samo lijevanjem i brušenjem.

## METASTABILNI Fe-Fe<sub>3</sub>C DIJAGRAM



Slika 6.11. Metastabilni dijagram slijevanja željeza i ugljika

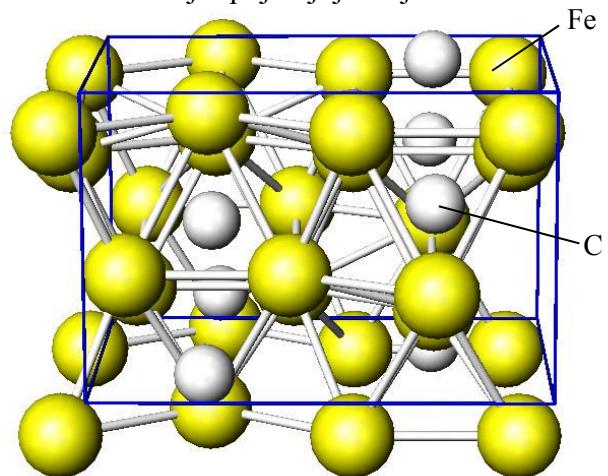
Metastabilna legirana željeza podeutektičke koncentracije su također vrlo tvrda i krhka, a koriste se kao odljevci za naknadnu toplinsku obradu (bijeli lijev žarenjem postaje kovasti lijev) ili kao tvrdi lijev za izradu valjaka.

Sve opisane promjene prilikom hlađenja odvijaju se pomoću difuzije, pa je razumljivo da brzina hlađenja bitno utječe na strukturu i svojstva željeza.

### 6.3.2 Faze u krutnini u nelegiranim željezima

S obzirom na značaj pojedinih faza, te postojanje više sinonima za istu strukturu, ovdje se daje kratki pregled faza u nelegiranim željezima. Osim austenita, ferita koji su objašnjeni u dijelu o stabilnim dijagramima slijevanja, u metastabilnom slučaju pojavljuju se još i:

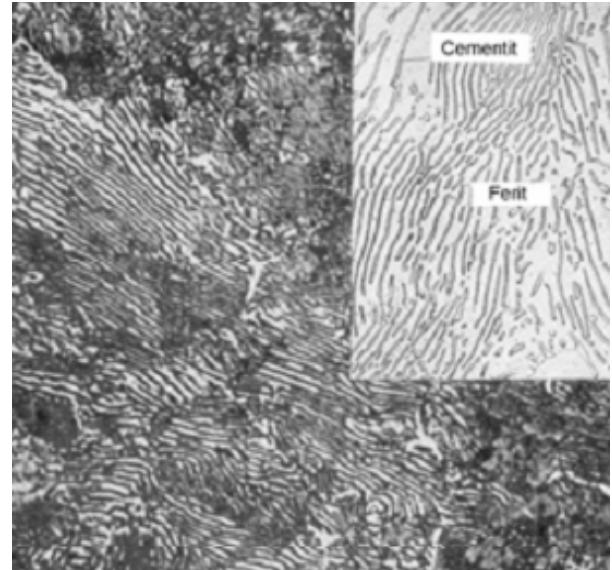
**Cementit** -  $Fe_3C$  - željezni karbid. Kemijski spoj željeza i ugljika. To je tvrda struktura, desetak puta tvrđa od ferita, koja ima komplikiranu i krhku kristalnu rešetku i koja kristalizira iz taline, ali se izlučuje i u krutnini, zbog smanjenja rastvorivosti ugljika u austenitu, u sekundarni, eutektoidni i tercijarni cementit. Može tvoriti odvojene pločaste kristale (primarni), tvrde opne oko kristalnih zrna (sekundarni) ili lamele (eutektoidni), ovisno o uvjetima nastajanja. Iznad 210°C čisti cementit nije magnetičan.



*Slika 6.12. Kristalna rešetka željeznog karbida*

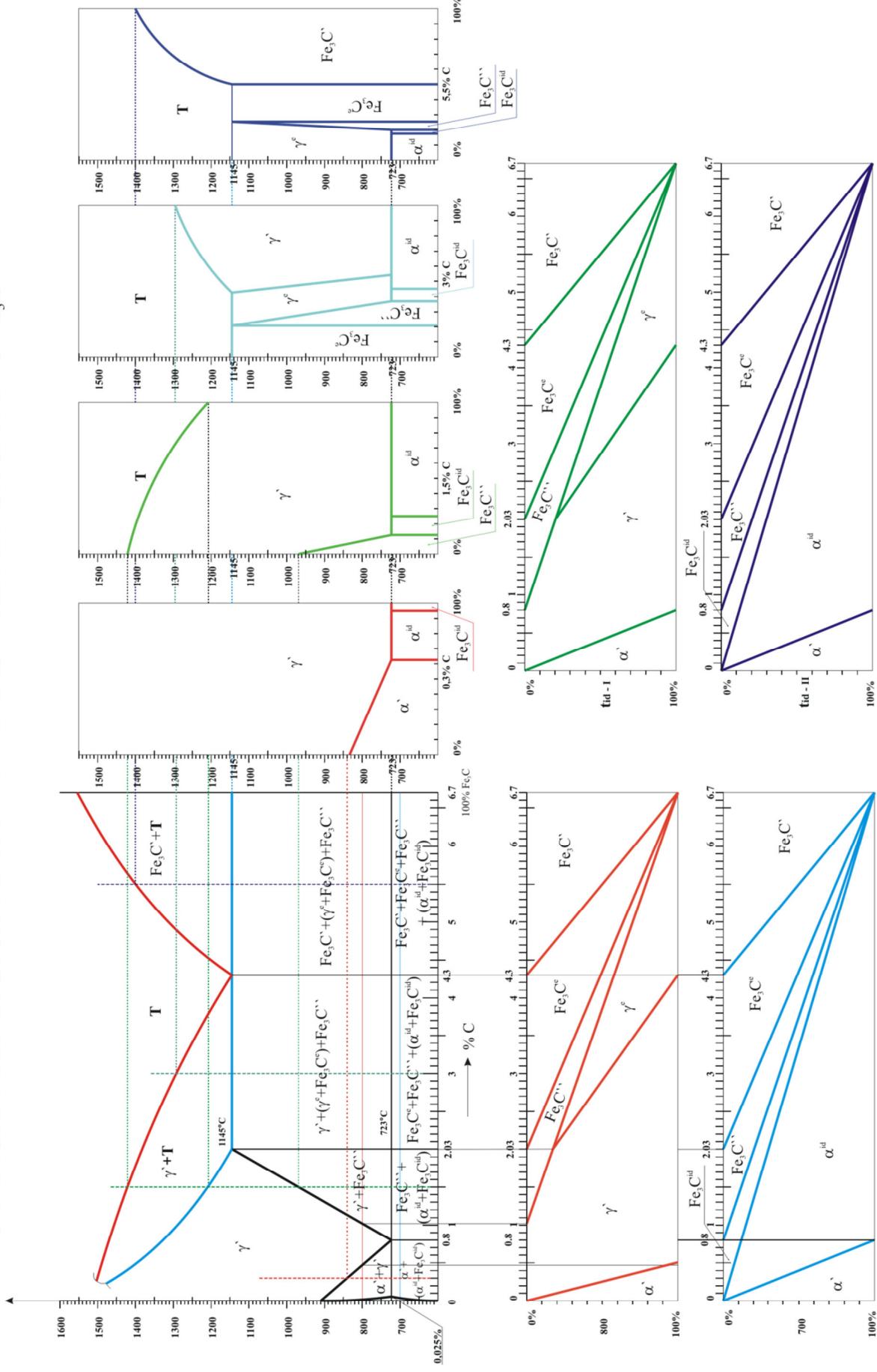
**Perlit** -  $(\alpha^{id} + Fe_3C^{id})$  - smjesa eutektoidnog ferita i cementita, jednoliko složene lamele u sendvič. Lamele cementita su znatno tanje od feritnih. Finije lamele daju veću čvrstoću perlitu, a nastaju bržim hlađenjem koje omogućava pretvorbu austenita na velikom broju mesta u zrnu. Lamele je moguće razaznati samo pod vrlo velikim povećanjem. Znatno je tvrdi od ferita, ali dosta meksi od cementita. Toplinskom obradom može se mijenjati oblik i veličina lamela.

Na *slici 6.14.* prikazani su dijagrami količinskih udjela faza za više različitih koncentracija i temperatura.



*Slika 6.13. Perlit*

## GRAFIČKI PRIKAZ UDJELE FAZA ZA METASTABILNI DIJAGRAM $Fe-Fe_3C$



Slika 6.14. Dijagrami količinskih udjala faza za metastabilni slučaj slijevanja  $Fe-Fe_3C$

## 6.4 Zaključne napomene o dijagramu Fe-C (6.4.)

Promatrani dijagrami (stabilni i metastabilni) su idealizirani slučajevi, jer nikada nemamo u praksi takve legure koje bi se sastojale samo od željeza i ugljika. Neizbjegna je pojava još i redovitih pratilaca u željezima kao što su to mangan, silicij (katkad i Al, Cu, Ni, Cr,...) i nečistoća, sumpora i fosfora. Redoviti pratitelji i nečistoće se uključuju tijekom metalurškog procesa dobivanja, bilo iz rudača bilo iz pomoćnih dodatnih materijala, goriva, vatrootpornih materijala kojima su obloženi uređaji za dobivanje sirovog željeza, te iz otpadnog materijala koji se pretaljuje.

Dok se količinski udjeli ovih pratilaca kreću u minimalnim granicama, dotle ne utječu bitno na dijagrame slijevanja Fe-C, koji je u stvari pseudo-binarni dijagram za male količine pratećih elemenata. Nešto veći sadržaj stranih elemenata bitno mijenja oblik dijagrama, o čemu će opširnije biti govora u legiranim vrstama željeza.

Primjese u manjim količinama, iako suštinski ne mijenjaju Fe-C dijagram, utječu na to hoće li se ugljik prilikom hlađenja i kristalizacije izlučiti u obliku grafita ili cementita, tj. teku li promjene stabilno ili metastabilno. Do sada je uglavnom navedena brzina hlađenja kao odlučujući činilac tijeka kristalizacije, a sada treba navesti i utjecaj primjesa.

Silicij, ugljik, nikal i aluminij pospešuju nastajanje grafita, pa se zovu **grafitizatori**.

Mangan i krom ubrzavaju nastajanje cementita, pa se zovu **cementatori**.

Prekoračenjem količine grafitizatora ili cementatora, primjese imaju odlučujući utjecaj na tijek kristalizacije, a ne brzina hlađenja. Sumpor i fosfor praktički ne utječu na kristalizaciju sirovog željeza.

Hlađenjem, kakvo je pretpostavljeno u dijogramima slijevanja, dobivaju se legure željeza s opisanim fazama. Iz činjenice koje faze postoje nije moguće donijeti zaključak o strukturi, a niti o posljedicama koje nastaju uslijed bržeg hlađenja od metastabilnog.

Kombiniranim djelovanjem brzine hlađenja i primjesa dobiva se u praksi ili potpuno metastabilna ili kombinirana stabilna i metastabilna vrsta željeza. U prvom se slučaju radi o **bijelim**, a u drugom o **sivim vrstama sirovog željeza**.

Duljim žarenjem krutnine na povišenim temperaturama moguć je prijelaz iz metastabilne ravnoteže u stabilnu zahvaljujući raspadu cementita:  $\text{Fe}_3\text{C} = 3 \text{ Fe} + \text{C}$ .

Suprotan proces nije moguć, osim pretaljivanjem i naknadnim metastabilnim skrućivanjem.

## 6.5 Nelegirana željeza

Ako se željeza sastoje samo od do sada opisanih faza, uz male količine primjesa, onda se nazivaju nelegirana željeza. Prema tehnologiji dobivanja, dijele se na čelik i ljevove. Ljevovi u najvećem broju slučajeva sadrže znatno više ugljika od čelika.

### 6.5.1 Čelik

Ova vrsta legure željeza nastaje metastabilnim skrućivanjem u području koncentracija od 0 do 2,03%. Na metastabilnu kristalizaciju odlučujuće djeluju ponajprije cementatori. Rijetko imamo čelik s najvećim sadržajem ugljika, ali načelno promatrano, to je njegovo područje.

Čelik se dobiva oduzimanjem ugljika talini sirovog željeza ili pretaljivanjem i pročišćavanjem otpadnog željeza. Takva talina se nakon smanjenja sadržaja ugljika skruti u obliku većeg bloka, koji se naziva ingot ili brama, ovisno o obliku. Kod kontinuiranog lijevanja talina se skrućuje u oblik poluproizvoda. Ako se ingot gnječenjem prerađuje u posebno oblikovane proizvode, kao što su šipke i profili, a brame u trake i limove, onda takvu leguru željeza zovemo čelik. Prema tome, čelik ima gnječenu strukturu, sitno i usmjereno zrno, jer se gnječenje obično završava ispod temperature rekristalizacije. Do konačno oblikovanih predmeta iz čelika dolazimo naknadnim postupcima oblikovanja čeličnih poluproizvoda.

### 6.5.1.1 Strukture čelika

Nastajanje pojedinih struktura faza pri hlađenju je općenito opisano u dijagramu Fe-C. Međutim, potrebno je još nešto reći o strukturalnim oblicima izlučenih faza, koji zavise od nekih činitelja.

Kod podeutektoidnih čelika primarni se ferit izlučuje iz austenita u dva oblika, **mrežasto** i **pločasto**.

Mrežasti oblik nastaje izlučivanjem ferita po granicama austenitnih zrna do temperature  $A_1$ , nakon čega se preostali austenit raspada u perlit. Ovakav mrežasti ili poligonalni oblici zrna daju dobru izotropiju svojstava i žilavost.

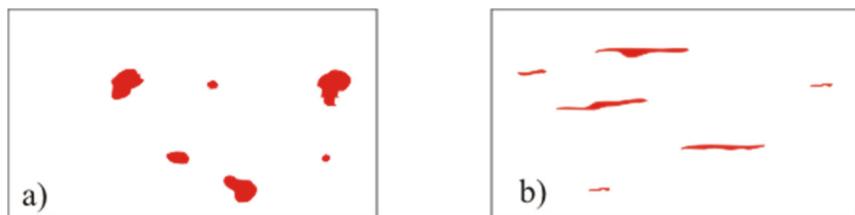
Pločasti ferit nastaje izlučivanjem ferita u austenitu po preferencijalnim kristalografskim ravninama u obliku ploča koje se sijeku pod raznim kutovima. Ova struktura se često naziva **Widmannstattenova struktura**, ali i **igličasta**, jer se ploče u presjeku (na metalografskoj slici) vide kao igle. Na svojstva čelika značajno utječe veličina kristalnih zrna ferita i perlita. Usitnjavanjem zrna raste čvrstoća.

Sitno zrno dobiva se termomehaničkom obradom i dodavanjem malih količina legirnih elemenata koji blokiraju rast zrna prilikom zagrijavanja. Gnječenje se provodi na temperaturi malo iznad  $A_3$  linije da ne poraste austenitno zrno, a hlađenje je nešto brže. Bržim hlađenjem pretvorba austenita u ferit odvija se na većem broju mjesta, tako da nastane fina feritno-perlitna struktura. Ovakav proces usitnjena zrna bržom pretvorbom austenita u ferit naziva se normalizacija. Rezultat postupka je struktura povишene čvrstoće i rastezljivosti te otpornosti na lom. Istodobno se mehanička svojstva ujednačavaju po debljini presjeka materijala.

### 6.5.1.2 Nehomogenosti u čeliku

Prilikom dobivanja u čeliku zaostanu nečistoće koje mogu izazvati nehomogenosti, a time i anizotropiju svojstava. Pogreške kod lijevanja ingota i brama također u kasnijoj preradi mogu uzrokovati greške u poluproizvodima.

**Sumpor** u čeliku tvori niskotaljivi željezni sulfid ( $T_t = 950^\circ\text{C}$ ), koji se izlučuje po granicama zrna. Prilikom zagrijavanja čelika na visoke temperature (kod zavarivanja uz sami spoj i kod kovanja) dolazi do taljenja sulfida i nastanka **toplih pukotina** po granicama zrna. Današnji čelici sadrže uglavnom malo sumpora i pojava toplih pukotina je rijetka. Sumpor u čeliku veže i mangan u manganov sulfid, koji je smješten u obliku izduženih uključaka u sredini poluproizvoda. Ovakvi uključci razbijaju homogenost čelika i slabe ga prema poprečnom opterećenju (slika 6.15.)

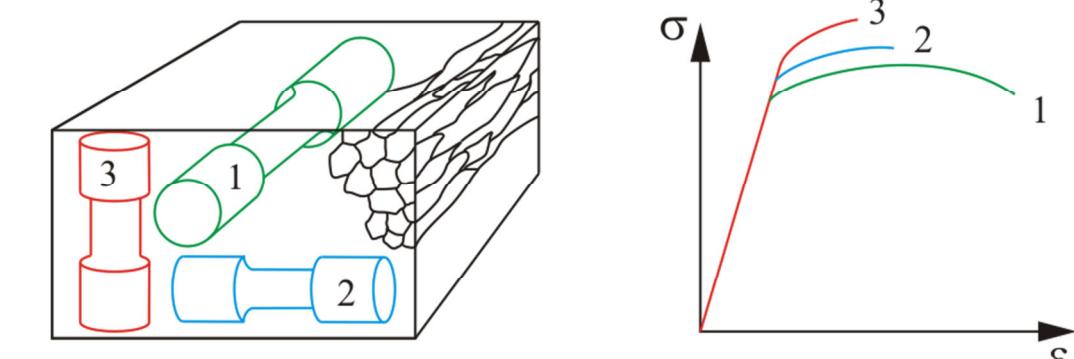


Slika 6.15. Sulfidi u čeliku nakon a) skrućivanja, b) gnječenja

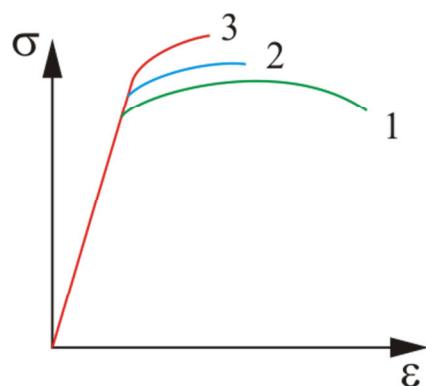
**Fosfor** sa željezom stvara tvrdi uključinski mješanac što uzrokuje **hladnu lomljivost**. Ako je fosfor vezan kao kemijski spoj željezni fosfid  $\text{Fe}_3\text{P}$  i fino raspršen u feritnoj matrici, to povećava čvrstoću inače mekanog ferita. **Dušik** se uključuje u sastav čelika za vrijeme pretaljivanja. Jako utječe na mehanička svojstva već u malim količinama. Tijekom vremena vezuje se sa željezom i nekim primjesama u tvrde nitride, što uzrokuje pad rastezljivosti i žilavosti. Početno žilavi čelici, ako sadrže nitride, kroz desetke godina ostare i postanu krhki. Kod nekih čelika dušik se namjerno kontrolirano dodaje kao element za povećanje čvrstoće (u isti mah smanjuje se sadržaj ugljika).

Skrućivanje ingota (iz kojih se dalje gnječenjem dobivaju poluproizvodi) je dosta sporo tako da se ne može izbjegći segregacija u trupcu. Stoga uz stjenke trupca metal ima manji sadržaj ugljika nego u središtu (*slika 6.16.*). Gnječenjem ovakvog trupca trajno ostane različiti sastav središta i površine. Isto vrijedi i za sulfide i fosfide koji se koncentriraju u sredini. Osim nečistoća u talinu se apsorbira dosta plinova, a ima i plinova koji se izdvajaju uslijed metalurške reakcije u talini. Skrućivanjem metala smanji se rastvorivost za plinove, pa se oni počnu izdvajati iz taline. Ukoliko je brzina napredovanja fronta kristalizacije velika, utoliko može doći do zarobljavanja plinskih mjehura, a time i do ostatne poroznosti (*slika 6.16.*). U trupcu mogu zaostati i djelići troske. Ponekad se lijevanje provodi poklapanjem kokile pod tlakom što onemogućava isplinjavajuće iz taline. Na taj način plinovi ostaju kao mikroporoznost koja se kasnijim toplim gnječenjem može ukloniti. Ukoliko je zaostali plin vodik, mogu nastati i tzv. vodikove pukotine. Uključci troske se ne mogu ukloniti dalnjom preradom.

Usmjerenost i oblik zrna također se razlikuje po debљini poluproizvoda. Prognječenje ne ide suviše u dubinu, tako da se, uz usmjereni i ugnječeno površinsko zrno, u sredini nalazi krupno, neusmjereni zrno. Ovakva anizotropija strukture, a time i svojstava, česta je kod debelih limova i trupaca. Žilavost i rastezljivost se mogu jako razlikovati uzduž i poprijeko na smjer valjanja, čvrstoća se manje razlikuje, dok kod tvrdoće nema praktički nikakvih razlika (*slika 6.17.*).

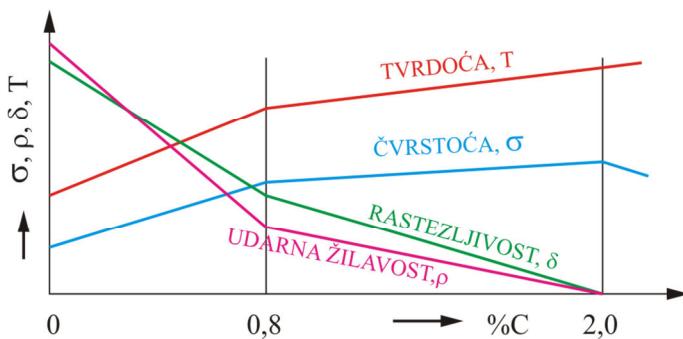


*Slika 6.17. Anizotropija oblika zrna i mehaničkih svojstava*



### 6.5.1.3 Utjecaj ugljika na svojstva čelika

Ovisnost mehaničkih svojstava o sadržaju ugljika prikazana je načelno na *slici 6.18.* Ova ovisnost odnosi se na umjerene brzine hlađenja, kod kojih nastaje cementit, tako da se svojstva mijenjanju s povećanim udjelom ove tvrde faze. Inače kod povišenih sadržaja ugljika kod bržeg hlađenja dolazi do bezdifuzijske pretvorbe austenita u ferit. Zbog velike brzine pretvorbe zaostaje ugljik u kristalnoj rešetki koja ostaje deformirana. Ova struktura naziva se martenzit, prema metalurgu Martensu. Martenzitna pretvorba daje vrlo tvrdi i krhklu strukturu.



*Slika 6.18. Utjecaj ugljika na mehanička svojstva čelika za raspon koncentracija od 0,05 do 2% ugljika*

Tvrdoća čelika raste od mekog ferita do čistog cementita za oko deset puta. Tvrdoća brže raste u podeutektoidnom području, a kasnije se porast usporava u nadeutektoidnom području. Naime, dodatno povećanje tvrdoće zbog izlučivanja sekundarnog cementita po granicama austenitnih zrna ne može znatnije mijenjati tvrdoću, koja je već jako visoka za čisti perlit.

Čisti ferit je rastezljiv, dok cementit praktički nema rastezljivosti. Porast udjela cementita pada rastezljivost. Pad rastezljivosti veći je u podeutektoidnom području, dok u nadeutektoidnom rastezljivost dodatno pada zbog sekundarnog cementita.

Rastezna čvrstoća se ponaša slično kao i tvrdoća. Porast udjela perlite faze znatno očvršćuje čelik. Čvrstoća perlita je za oko tri puta veća od čvrstoće ferita. U nadeutektoidnom području čvrstoća malo raste zbog velike krhkosti čelika.

Ovo su samo načelna razmatranja jer je utjecaj primjesa također znatan, tako da se čisto ugljični čelici rjeđe susreću.

## 6.6 Legirani čelici

Legirani čelici predstavljaju skupinu čelika kojima ugljik nije toliko presudan za postizanje nekih svojstava. Legirani čelici imaju različita svojstva, od mekanih do izuzetno čvrstih, otpornih na koroziju, vatru i visoke temperature.

Prema količini legirnih elemenata mogu se podijeliti na nekoliko grupa:

- mikrolegitirani ili sitnozrnasti čelici
- niskolegitirani čelici ili kaljeni poboljšani čelici
- legitirani čelici
- visokolegitirani čelici.

### 6.6.1 Mikrolegitirani ili sitnozrnasti čelici

Ovi čelici legitirani su uglavnom manganom Mn (preko 1,5%) te malim količinama drugih elemenata (N, Al, Cu, Nb, V,...). Sadržaj ugljika je nizak, tako da se teško zakaljuje. Sitno zrno daje im povišenu čvrstoću i žilavost, posebice na niskim temperaturama. Koriste se najviše za izradu zavarenih konstrukcija (cjevovodi, spremnici, mostovi). Usitnjene zrna postiže se gnječenjem u austenitnom području, malo iznad A<sub>3</sub> linije te hlađenjem na zraku, čime se postiže učinak normalizacije. Izrađuje se u debljinama ispod 30 mm, jer pri većim debljinama nije lako usitniti zrno. Otporniji su na koroziju od običnih ugljičnih čelika.

### 6.6.2 Niskolegitirani čelici

Ovo je grupa čelika legitirana kromom Cr i molibdenom Mo do cca 2% do 3% ukupno, uz dodatke manjih količina Ni, Nb, V, ... . Ovisno o udjelu ugljika, mogu se dobiti metali visoke čvrstoće i tvrdoće. Koriste se za izradu strojnih dijelova, otporniji su na trošenje zbog veće tvrdoće (zupčanici). Koriste se za izradu jako napregnutih konstrukcija (čvrsti trup podmornice). Skuplji su od ugljičnih čelika. Kod izrade strojnih dijelova obrada se obavlja u mekom stanju, zatim se proizvodi kale i popuštaju do željenih svojstava. U zavarenim konstrukcijama koriste se u poboljšanom stanju, bez naknadne toplinske obrade. Moguće su pukotine u varovima, pa se obično predgrijavaju.

### 6.6.3 Legirani čelici

Grupa ovih čelika sadrži 5-10% legitirnih elemenata i povišeni sadržaj ugljika. Uz krom, nikal, vanadij, niobij, često se dodaju titan, volfram te kobalt. Ovi čelici najviše se koriste za izradu alata i medicinskog pribora.

### 6.6.4 Visokolegitirani čelici

Visokolegitirani čelici legitirani su kromom Cr i niklom Ni, te manjim količinama ostalih elemenata. Čelici s povišenim sadržajem ugljika i kroma mogu se zakaliti do najviših tvrdoća (**martenzitni čelici**). Koriste se za izradu alata. Otporni su na koroziju. Kod sadržaja kroma iznad 13% nema pojave hrđanja (korozije u prisutnosti kisika).

Kod visokog sadržaja kroma prilikom skrućivanja izostaje austenitno područje. Ovi čelici se zovu **feritični čelici**. S obzirom da nema fazne pretvorbe ne mogu se toplinski obrađivati. Ovi materijali otporni su na puzanje i oksidaciju na visokoj temperaturi. Koriste se za dijelove u ložištima i kemijskim aparatima.

Uz visoki sadržaj nikla, prilikom hlađenja struktura je nakon nastajanja austenita nepromjenjiva. Austenit je stabilan do vrlo niskih temperatura (**austenitni čelici**). Ovi čelici su osrednje čvrstoće, ali izuzetno žilavi na najnižim temperaturama. Vrlo su otporni na

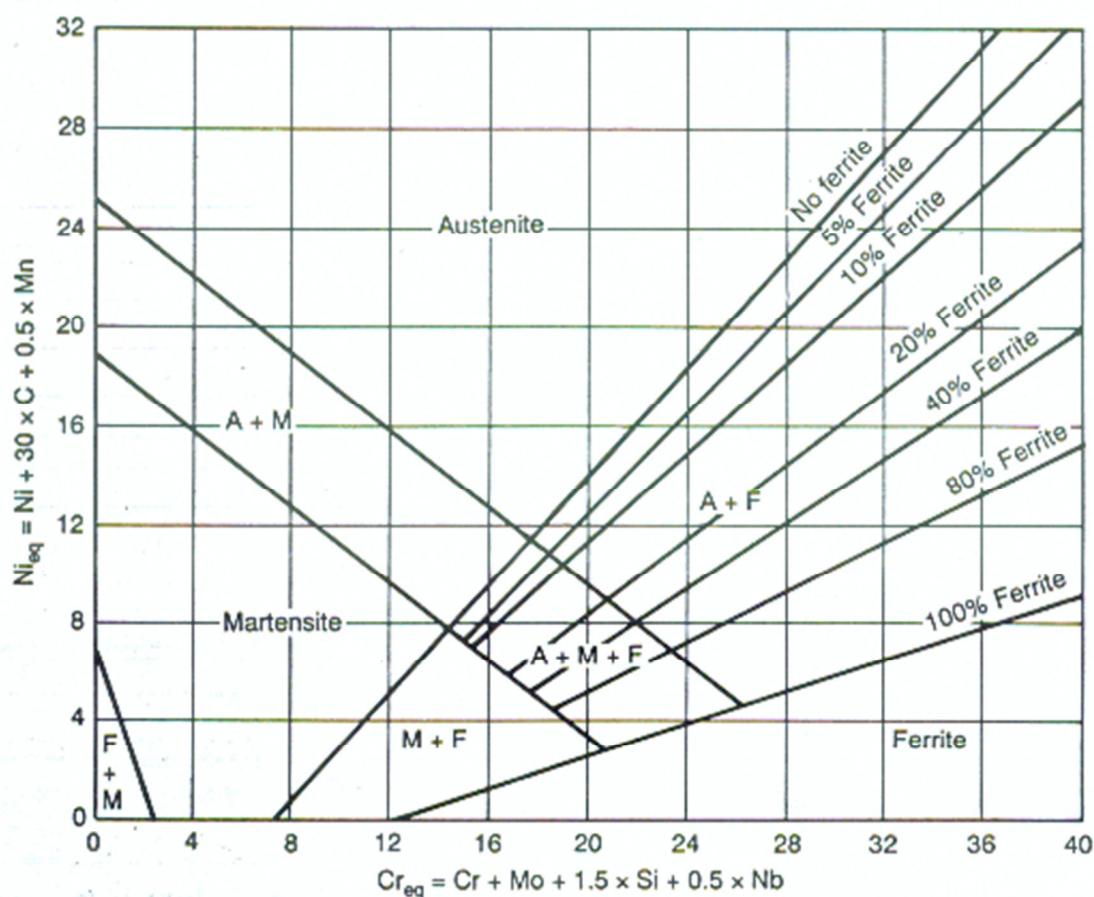
koroziju. Koriste se u kriogenoj tehnici, kemijskoj industriji, prehrambenoj (mljekare, mesnice, vinarije), ugostiteljstvu (šankovi), arhitekturi.

U prelaznom su području moguće mješovite strukture:

- martenzitno - feritne
- austenitno - feritne
- austenitno - martenzitne
- austenitno - martenzitno-feritne.

Visokolegirani čelici skuplji su od ugljičnih. Međusobno se razlikuju po cijeni, te prema količini i vrsti legirnih elemenata. Koriste se kao valjani, kovani i lijevani proizvodi.

Dobar uvid u fazni sastav visokolegiranih čelika moguć je uz pomoć Schaefflerova dijagrama (*slika 6.19*), koji je izведен za veće brzine hlađenja iz Maurerovog dijagrama (*slika 6.25*).



**Slika 6.19. Schaefflerov dijagram**

Specifična vrsta visokolegiranog čelika je manganski austenitni čelik koji sadrži 13% do 14% mangana Mn i visoki sadržaj ugljika C. Lijevana struktura je mekana, austenitna. Ako je izložena udarcima, austenit se pretvara u martenzit, tako da se ovaj čelik koristi za dijelove izložene udarcima u mlinovima. Praktički se ne može obrađivati rezanjem, jer otvrđnjava uslijed ugnječenja pod oštricom alata.

## 6.7 Ljevovi

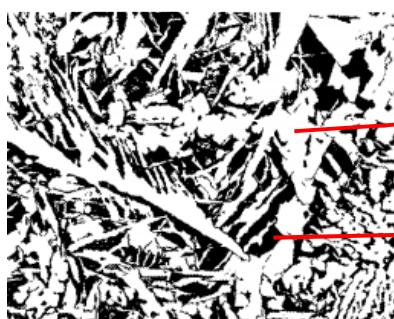
Ljevovi se u pravilu koriste za izradu predmeta komplikiranijeg oblika i većeg broja istovrsnih komada. Izrađuju se i masivni komadi. Lijevanjem se oblikuju i predmeti iz materijala koji se zbog velike tvrdoće ili drugih svojstava ne bi mogli drukčije obradjavati na konačni oblik.

Materijali koji služe za oblikovanje predmeta lijevanjem imaju određene uvjete s obzirom na tehnologiju prerade. Važni su parametri za izbor materijala lijeva: temperatura tališta, interval skrućivanja, koeficijent slijeganja i toplinskog stezanja te faze i strukture. Zbog toga se za različite namjene biraju ljevovi odgovarajuće koncentracije.

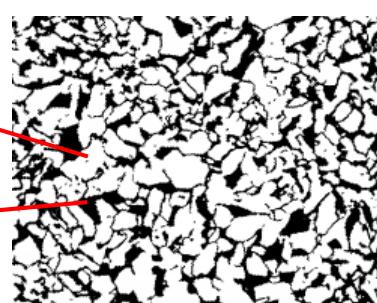
### 6.7.1 Čelični lijev

Čelični lijev razlikuje se od čelika samo po načinu prerade, dok su imaju faze jednake. Dotjerivanje odljevka do konačnog oblika i dimenzije obavlja se naknadno postupcima odvajanjem čestica. Mehanička svojstva čeličnih odljevaka lošija su od svojstava gnećenih čeličnih poluproizvoda. Zrno je grublje, postoje zaostala naprezanja od nejednolikog hlađenja, a vjerojatnije su nehomogenosti (pore, kaverne, troska). Livljivost čeličnog lijeva nije dobra jer talina ima veliku površinsku napetost, pa loše vlaži kalup i ne ispunjava tanke presjeke. Minimalne debljine stjenke su oko 5 mm.

Čelični lijev obično ima 0.2-0.4% C i sadrži više nečistoća od čelika. Ima čvrstoću 400-600 MPa. Veći sadržaj ugljika može izazvati pucanje pri skrućivanju, a taline koncentracije ispod 0.2% C imaju lošu livljivost zbog visokog tališta i viskoznosti.



Slika 6.20. Čelični lijev nakon lijevanja  
(Widmannstattenova pločasta struktura)



Slika 6.21. Čelični lijev  
(Normalizirana struktura  
usitnjeno zrno)

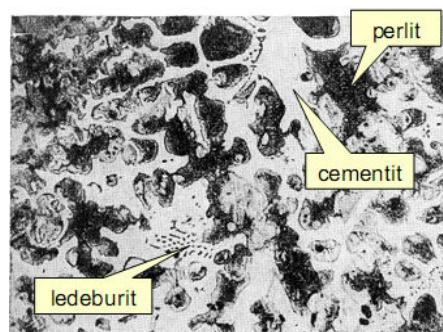
Čelični lijev ima u pravilu nižu žilavost od čelika istog sastava zbog grublje strukture (slika 6.20.). To se može popraviti normalizacijskim žarenjem odljevka (slika 6.21.).

Na konstrukcijama koje se podvrgavaju preciznoj strojnoj obradi zaostala naprezanja mogu izazivati promjene dimenzija za vrijeme skidanja slojeva metala. Ova se pojava izbjegava žarenjem radi popuštanja zaostalih naprezanja na temperaturi rekristalizacije (Tr), na kojoj se nakon nekog vremena zaostala naprezanja smanjuju zbog procesa puzanja. Temperatura rekristalizacije za čelik iznosi oko 600°C.

Kada svojstva dobivena utjecajem osnovnih legirnih komponenti više ne zadovoljavaju, uzimaju se legirani čelični ljevovi. Lijevanje čelika zahtjeva veći utrošak energije, skuplje peći i bolje vatrostalne materijale te kvalitetnije kalupe koji podnose više temperature taline.

## 6.7.2 Bijeli lijev

Bijeli lijev nastaje metastabilnim skrućivanjem podeutekističke legure (*slika 6.22.*). Ugljik je izlučen samo u obliku cementita i to najviše zbog utjecaja mangana. Kako ima više cementita nego ferita, radi se o vrlo tvrdoj i krhkoj leguri željeza koja nije upotrebljiva u takvom stanju. Zbog toga je bijeli lijev upotrebljiv ili u kombinaciji s mekšim lijevom (tvrdi lijev) ili nakon toplinske obrade (kovkasti lijev).



*Slika 6.22. Struktura bijelog lijeva*

## 6.7.3 Tvrdi lijev

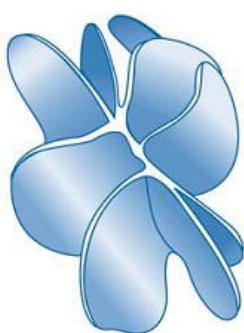
Tvrdi lijev je kombinacija bijelog i sivog lijeva. Na površini, koja se brže hlađi, dolazi do metastabilnog skrućivanja, a u sporije hlađenoj jezgri nastaje stabilno skrućivanje. Koristi se za izradu valjaka za valjanje limova (posebno za toplo valjanje gdje se tvrdoća površine ne smije smanjivati sa porastom temperature). Na površini su feritna i cementitna faza, u jezgri feritna i grafitna. U međuprostoru mogu postojati sve tri faze istodobno (ferit, cementit i grafit).

Ova kombinacija struktura moguća je zbog izjednačenog utjecaja primjesa na kristalizaciju, tako da utječe samo brzina hlađenja. Valjci od tvrdog lijeva koriste se za izradu limova valjanih na toplo ili hladno, folija iz polimernih materijala, papira i slično. Brušenjem i poliranjem površine postiže se fina površina valjanih proizvoda. Tvrdi lijev često se i legira radi smanjenja trošenja površine.

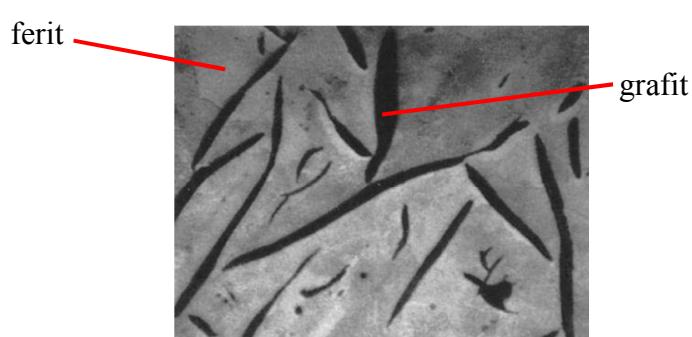
## 6.7.4 Sivi lijev

Taljenjem sivog sirovog željeza u kupolnoj peći i dodavanjem otpadaka drugih ljevova, kao i drugih elemenata, dobiva se talina sivog lijeva. Sivi lijev je legura podeutekističke koncentracije koja kristalizira stabilno, tako da se sastoji pretežno od ferita i lamela grafta (*slika 6.23. i 6.24.*). Sadržaj mangana može utjecati da se dijelom izluči i cementit.

Silicij je grafitizator i poviće eutektičku koncentraciju u lijevo. Tako legura s 2% Si u talini, što je tipična koncentracija za sivi lijev, poviće eutektičku koncentraciju sa 4,26% na 3% C. Mangan djeluje suprotno od silicija. Sadržaj fosfora je znatno veći nego kod čelika (oko 1%), jer djeluje povoljno na livljivost stvarajući eutektikum koji popunjava šupljine između ranije skrunutnih faza. Sumpor djeluje štetno u svakom slučaju.



*Slika 6.23. Prostorni izgled lamela grafta*



*Slika 6.24. Mikrostruktura sivog lijeva*

Sivi je lijev otporan na visoke temperature (koristi se za ložišta, roštilje, vratašca na pećima...). i koroziju zbog ljevačke kore (Si-oksid) – bitve, poklopcu, kućišta elektromotora, pumpi i turbina, blokovi motora, ispušni kolektori, klizni ležaji, glave motora. Izvrstan je materijal za kočnice zbog grafita koji sprječava blokiranje prilikom kočenja.

#### 6.7.4.1 Vrste sivog lijeva

##### *Feritni sivi lijev*

Sivi lijev je načelno podeutektičkog sastava. Nakon završetka skrućivanja krutninu sačinjavaju primarni austenitni kristali u grafitnom eutektikumu. Do eutaktoidne temperature nastaje još sekundarni grafit. Eutaktoidni raspodjeli se stabilno, pa se od austenita dobije ferit i grafit (grafitni eutaktoid). U tom se slučaju, sivi lijev sastoji samo od ferita i grafta različitog postanka pa se naziva feritni sivi lijev.

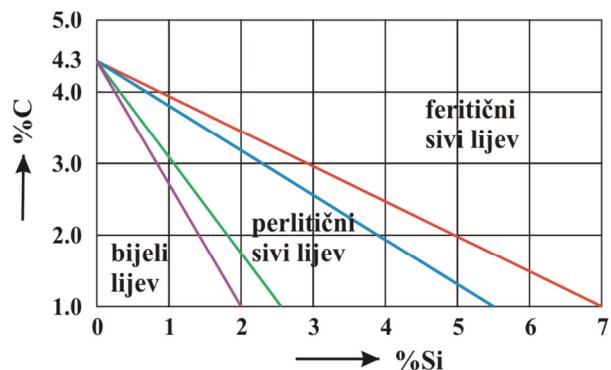
##### *Perlitični sivi lijev*

Dručnjom kombinacijom utjecajnih činitelja (brzine hlađenja, sadržaja Mn, Si, C, ...) može se dogoditi djelomična metastabilna pretvorba. Sekundarni cementit nastaje brzim hlađenjem od  $T_e$  do  $A_1$ , a moguća je i pretvorba eutaktoidnog austenita u perlit. Ova vrsta lijeva naziva se perlitični sivi lijev.

Utjecaj ugljika i silicija na kristalizaciju, nezavisno o brzini hlađenja, prikazan je u Maurerovu dijagramu na *slici 6.25*. Načelno, grafit ima više što je sadržaj silicija i ugljika viši, te što je hlađenje sporije. Nadeutektički sivi lijev se ne koristi, iako visoki sadržaj ugljika potiče stabilnu kristalizaciju, jer nastaju preveliki listovi primarnog grafta.

Veća brzina hlađenja omogućava nastanak sitnijih listića grafta i pretvorbu austenita u perlit što povećava čvrstoću lijeva. Tako na istom odljevkama tanje stjenke imaju veću čvrstoću od debljih. Obično se čvrstoća sivog lijeva navodi za stjenku debljine 30 mm, lijevanu u pješčanom kalupu.

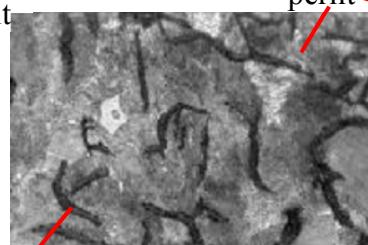
Po mehaničkim svojstvima perlitični sivi lijev je bolji od feritnog sivog lijeva, pa se primjenjuje tamo gdje čvrstoća igra bitnu ulogu. Feritni sivi lijev je mekan, ali je otporniji na koroziju na povišenim temperaturama, a ujedno je izrazito meki magnetski materijal.



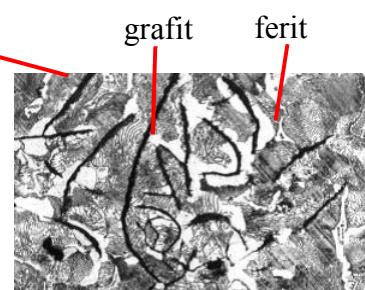
*Slika 6.25. Maurerov dijagram*



*Slika 6.26. Feritni sivi lijev*



*Slika 6.27. Perlitični sivi lijev*



*Slika 6.28. Feritno-perlitni sivi lijev*

Upotrebljava se za izradu kućišta elektromotora, pumpi, turbina, blokova motora s unutarnjim izgaranjem, remenica, kartera, ispušnih grana itd. Zahvaljujući sposobnosti prigušenja vibracija iz sivog se lijeva izrađuju postolja alatnih strojeva, a zbog otpornosti na trošenje izrađuju se kočioni diskovi.



*Slika 6.29. Odljevci iz sivog lijeva*

### 6.7.5 Cijepljeni lijev

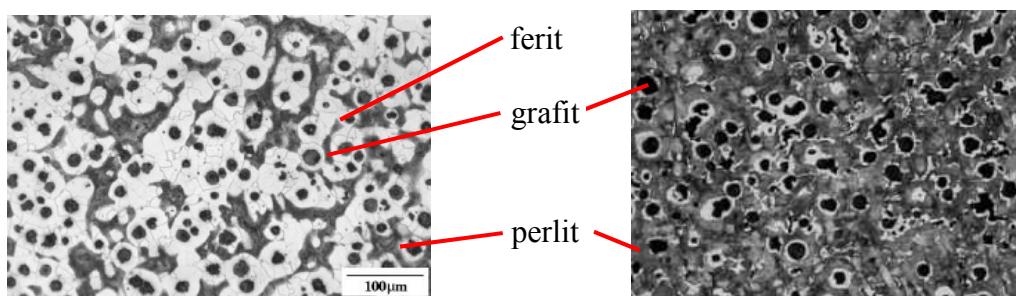
Posebna vrsta sivog lijeva je cijepljeni lijev, kojem se pomoću dodataka prilikom skrućivanja grafit izluči u obliku pločica, a ne u obliku listića kao kod sivog lijeva.

### 6.7.6 Žilavi lijev

Žilavi lijev je podvrsta sivog lijeva, kojemu se zbog dodatka prilikom skrućivanja grafit formira u kuglice razne veličine. Matrica može biti perlitna ili feritno-perlitna sa sekundarnim cementitom. Ovaj lijev se naziva još i **sferoidni ili nodularni lijev**.

Naziv žilavi lijev dolazi od toga što ovaj lijev pokazuje dobru rastezljivost i veću čvrstoću od lijeva s lisnatim grafitom. U nekim se slučajevima koristi za jako napregnute odljevke koji se inače izrađuju iz čeličnog lijeva, jer se bolje obrađuje odvajanjem čestica.

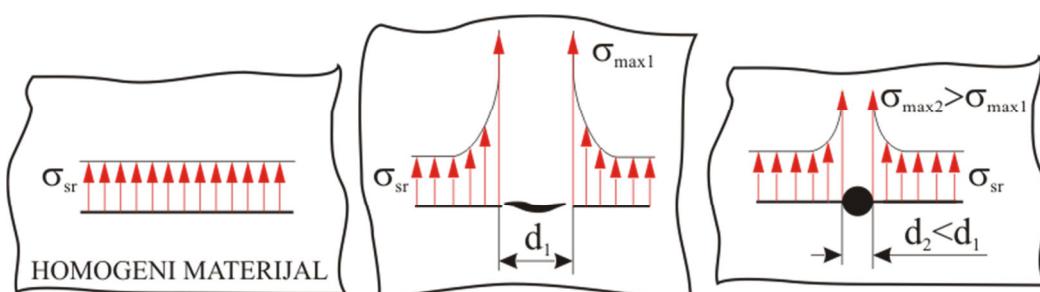
Žilavi lijev povezuje dobru livljivost sivog lijeva i žilavost čeličnog lijeva. Dobiva se ubacivanjem u talinu magnezija u obliku predlegura s niklom, bakrom ili silicijem. Magnezij potiče primarno skrućivanje cementita. Nakon što odgori magnezij, cementit se raspada u grafit kuglastog oblika. Na *slici 6.30.* i *6.31.* prikazana je struktura feritno-perlitnog i perlitnog žilavog (nodularnog) lijeva.



*Slika 6.30. Perlitno – feritni nodularni lijev*

*Slika 6.31. Perlitni nodularni lijev*

Na mehanička svojstva sivog lijeva i njegovih podvrsta bitno utječe grafit, s obzirom da predstavlja nehomogenost u feritnoj ili feritno-perlitnoj matrici. Ujedno, lisnati oblik grafta predstavlja oštре, plošne defekte koji izazivaju visoku koncentraciju naprezanja na svojim rubovima (*slika 6.32.*). Sve to utječe na to da je sivi lijev krhka vrsta željeza, čvrstoće niže od čelika. Kuglasto izlučen grafit smanjuje koncentraciju naprezanja pri rastezanju, tako da žilavi lijev pokazuje veću čvrstoću od sivog lijeva.



*Slika 6.32. Koncentracija naprezanja na listićima i kuglicama grafta u sivom i žilavom lijevu*

Odljevci od nodularnog lijeva najviše se koriste u automobilskoj industriji za dijelove motora (bregaste osovine, klipnjače, ispušne grane, dijelovi pogonskog i upravljačkog sustava, koljenasta vratila, te vrlo opterećeni zupčanici...). Žilavi lijev je praktički nezavarljiv zbog isparavanja magnezija prilikom taljenja.



*Slika 6.33. Odljevci iz žilavog lijeva*

### 6.7.7 Kovkasti lijev

Kovkasti lijev se dobiva žarenjem bijelog lijeva. Svojstvo bijelog lijeva je dobra livljivost, pa se od njega mogu izraditi tankostijeni komplikirani odljevci. Zbog krhkosti bijelog lijeva ovi odljevci su u sirovom stanju neupotrebljivi.

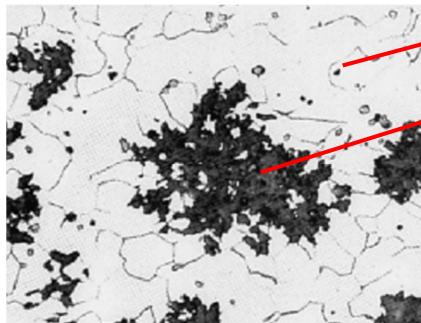
Žarenje se provodi na temperaturi oko  $900^{\circ}\text{C}$ , dakle u austenitnom području. Na toj se temperaturi difuzijskim procesom metastabilna cementitna faza razlaže na željezo i grafit. Nastali grafit je čvorastog oblika (*slika 6.34.*). Ovi čvorovi smanjuju koncentraciju naprezanja (slično kao kuglice kod žilavog lijeva), što daje kovkastom lijevu izvjesnu rastezljivost.

S obzirom na to da se žarenje odvija na temperaturama intenzivnog odvijanja difuzije, moguća je i promjena kemijskog sastava površinskog sloja odljevka.

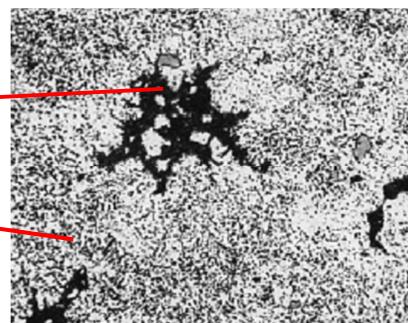
Ukoliko se žarenje provodi u pećima s neutralnom atmosferom utoliko nema nikakve promjene kemijskog sastava, tako da na kraju žarenja ostane feritna ili feritno-perlitna matrica s čvoricima grafita. Zbog tamne površine presjeka naziva se ovakav lijev crni kovkasti lijev.

Ako se žarenje odvija u oksidirajućoj atmosferi dolazi do razugljičenja površine odljevka. Ugljik se s kisikom vezuje u CO, ovaj dalje u  $\text{CO}_2$ . Uz površinu bogatu ugljikom dolazi do reakcije:  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ , pa se proces nastavlja dok ima ugljika na površini. Ugljik iz nutrine difundira prema površini, ali dubina razugljičenog sloja ne prelazi nekoliko milimetara. Nastala struktura je ferit sa smanjenim sadržajem ugljika izlučenog u grafitnim čvoricima. Bržim hlađenjem žarenih odljevaka ispod temperature  $A_1$  može se postići djelomični raspad austenita u perlit.

Zbog visokih troškova proizvodnje (energija potrebna za taljenje bijelog lijeva visokog tališta i naknadno dugotrajno visokotemperaturno žarenje) sve više ga zamjenjuje žilavi lijev kod većih odljevaka i visokolegirani čelici kod manjih.

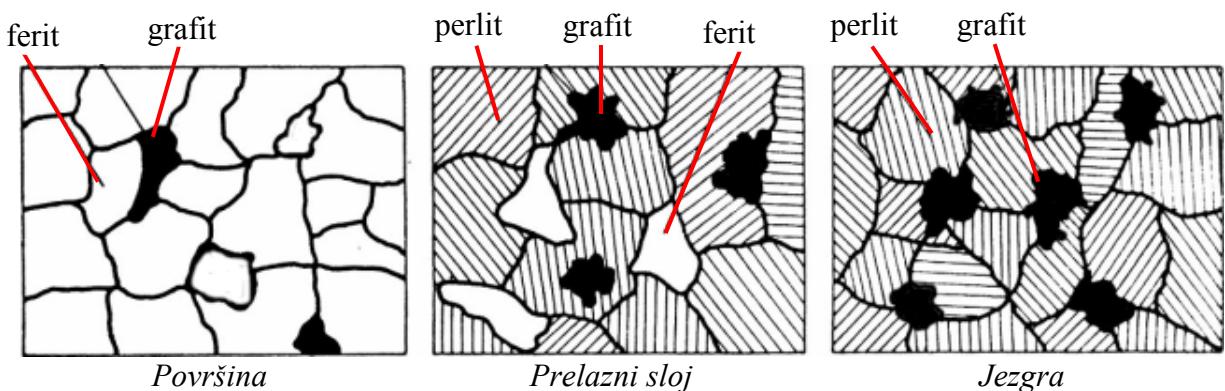


*Slika 6.34. Crni kovkasti lijev s feritnom osnovom*



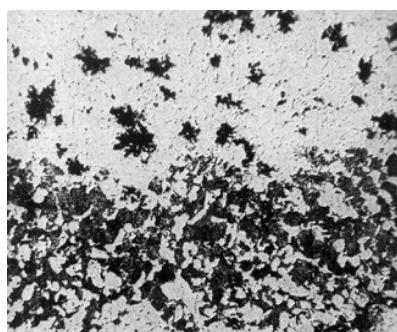
*Slika 6.35. Crni kovkasti lijev s perlitnom osnovom*

Kod tanjih presjeka, do 2 mm debljine, može doći do potpunog razugljičenja površine, pa se lijev naziva bijeli kovkasti lijev. Jezgra ima perlitu strukturu s čvorićima grafita. Prelazna zona ima feritno perlitu strukturu s čvorićima grafita (*slika 6.36. i 6.38.*).

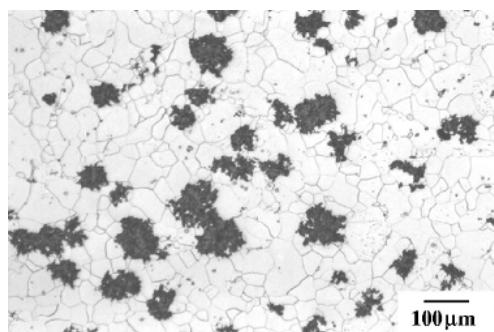


*Slika 6.36. Struktura bijelog kovkastog lijeva*

Presjeci deblji od 4 mm zadržavaju u jezgri nepromijenjeni sadržaj ugljika, što im daje crnu boju u presjeku jezgre, pa se takav lijev naziva crnojezgreni kovkasti lijev (*slika 6.37.*). Kovkasti lijev se često zove i temper lijev.

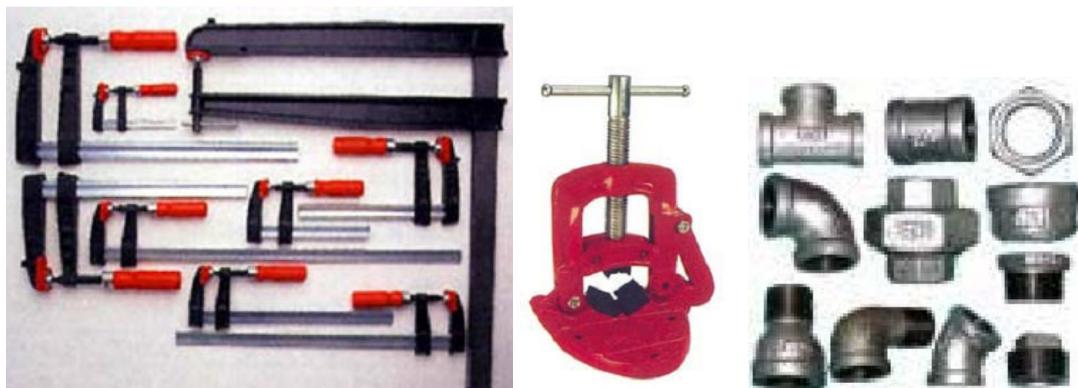


*Slika 6.37. Crnojezgreni kovkasti lijev*



*Slika 6.38. Bijeli kovkasti lijev*

Iz kovkastog lijeva izrađuju se serijski proizvodi manjih debljina stijenki koji podnose određenu deformaciju prilikom montaže. Ovaj lijev se dobro obraduje odvajanjem čestica. Koristi se i za izradu spojnih dijelova za cjevovode (koljena, redukcije, T-spojevi, čepovi, kućišta ventila i zasuna). Ako se kovkasti lijev zavaruje, dolazi do nastanka metastabilne strukture u protaljenom dijelu, što potpuno poništava prethodni učinak toplinske obrade kojim je postignuta grafitizacija cementita. Kovkasti se lijev upotrebljava za izradu fazonskih elemenata za vodovod, tijela alata ...



*Slika 6.39. Odljevci iz kovkastog lijeva*

## **6.8 Neželjezni metali i njihove legure (obojeni metali) (6.8.)**

Primjena željeznih materijala daleko je najrasprostranjenija u strojogradnji. Svjetska proizvodnja željeznih legura, je oko deset puta veća od proizvodnje svih neželjeznih metala zajedno. Međutim, legure željeza u pravilu brže propadaju zbog korozije od drugih metala. Izuzetak su visokolegirani čelici i legure željeza, koji su znatno skuplji od običnih legura željeza.

Neželjeni metali su svi ostali metali koji uopće ne sadrže željezo ili ga sadrže kao legirajući element. Pojedini obojeni metali i njihove legure imaju neka svojstva jednakom izražena kao i pojedine vrste legura željeza, ali je kod legura željeza nemoguće dostići kombinacije tih svojstava istodobno. Neka druga svojstva, koja nadmašuju slična svojstva kod legura željeza, jako su izražena, kao npr. električna vodljivost, rastezljivost, nemagnetičnost, mala ili velika gustoća, otpornost različitim vrstama korozije, prigušenje zračenja i slično.

Obojeni metali su u pravilu skuplji od legura željeza, pa se upotrebljavaju kada je to uistinu neophodno. Cijene obojenih metala su jako promjenljive, tako da konstruktor kod izbora mora paziti i na ekonomičnost primjene pojedinih metala u vrijeme izrade konstrukcije. U kratkom vremenskom intervalu cijene se na svjetskom tržištu mogu podvostručiti ili prepoloviti. Zanimljiv je slučaj nikla kojem cijena ponekad varira i do peterostrukog iznosa u kratkom vremenu. Ove oscilacije cijena utječu naravno na izbor materijala kada je moguće provesti izbor.

Obojeni metali predstavljaju skup vrlo različitih metala. Česta je raspodjela po gustoći na teške i lake obojene metale. Granica između lakih i teških je uvjetna na gustoći od  $3800[\text{kg/m}^3]$ . Naziv „obojeni“ dolazi najprije od bakra jer ima karakterističnu crvenkastu boju. Ostali obojeni metali većinom su metalno srebrnog do sivog sjaja.

Posebno će se prikazati neke skupine metala prema namjeni, i to one za izradu kliznih ležajeva (antifrikcijske legure), srasline prašaka i vlakana, lemove, vlknaste materijale i pjene. Materijali sastavljeni od raznorodnih faza nazivaju se kompozitni materijali.

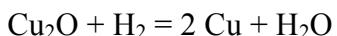
### **6.8.1 Bakar**

Bakar sa legurama je jedan od najstarijih metala koje čovjek koristi. Kristalna rešetka bakra je plošno centrirani kub. Temperatura taljenja je niža nego kod željeza i iznosi  $1083^\circ\text{C}$ . Danas se u strojogradnji čisti bakar rijetko upotrebljava kao konstrukcijski materijal. Najviše se koristi kao antikorozijijski materijal, u obliku cijevi i limova, ili nanesen na čeličnu podlogu. U elektrotehnici je još nezamjenljiv za proizvodnju žica za električne strojeve i dosta se koristi za vodiče za prijenos električne energije. Po električnoj vodljivosti je odmah iza srebra.

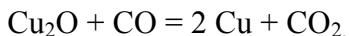
Bakar je postojan u mnogim agresivnim sredinama. Na atmosferi se prevlači slojem karbonata zelene boje. Zagrijavanjem na povišenim temperaturama oksidira i nastali oksidi se ljušte i neprestano stvaraju novi. U galvanskom članku sa mnogim metalima je pozitivan, pa izaziva njihovo elektrokemijsko razgrađivanje.

Mogućnost plastične deformacije bakra je velika, tako se mogu izvlačiti i vrlo tanke žice. Spaja se zavarivanjem taljenjem i lemljenjem, kako mekim, tako i tvrdim.

Čisti bakar se loše lijeva, jer rastaljen upija dosta plinova, što u odljevcima ostavlja brojne šupljine. Ljevački bakar sadrži u sebi i oksid  $\text{Cu}_2\text{O}$  (bakreni oksid) koji se u reakciji s vodikom ili ugljičnim monoksidom reducira na bakar i vodenu paru:



ili



Razvijeni plinovi izazivaju unutarnji tlak, mogu rastrgati materijal u obliku plikova. Ova pojava, kada je prouzročena vodikom, naziva se i vodikova bolest. Znatno čistiji, ali skuplji materijal je elektrolitički bakar, dobiven elektrolizom ljevačkog bakra.

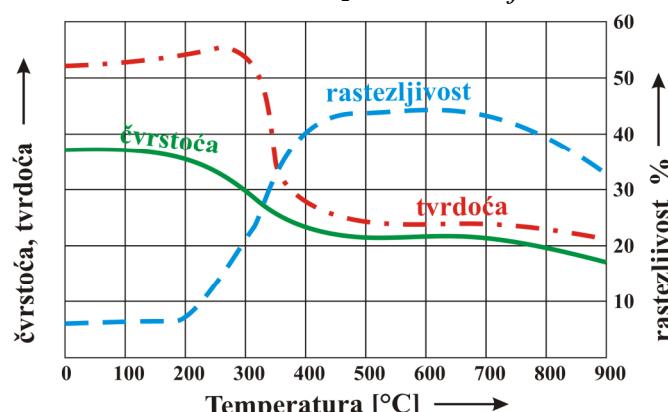
Struktura bakra prikazana je na *slici 6.40.* Oko primarnih kristala je krhki eutektikum, okruglaste čestice  $Cu_2O$  u bakru, koji smanjuje rasteznu čvrstoću (oko 200 MPa). Toplim gnječenjem ljevačke strukture iznad temperature rekristalizacije (oko 650°C), dobiva se usitnjena struktura s izdrobljenim eutektikumom, povećane čvrstoće i rastezljivosti. Hladnim gnječenjem povećava se čvrstoća na 400 MPa, ali rastezljivost pada.

Na *slici 6.41.* prikazana je ovisnost rastezljivosti bakra o temperaturi žarenja. Visoko žarenje iznad 700°C obnavlja eutektikum i bakar ponovno postaje krt.

Prilikom dobivanja bakra ostaje uvijek mala količina arsena. U primjenama gdje bakar dolazi u dodir s hransom ili vodom sadržaj arsena je strogo ograničen, dok u nekim primjenama, u kojima ne može trovati ljude, namjerno ostaje mala količina arsena radi poboljšanja mehaničkih svojstava.



*Slika 6.40. Strukture bakra, tamne čestice  $Cu_2O$  u bakrenoj matrici*



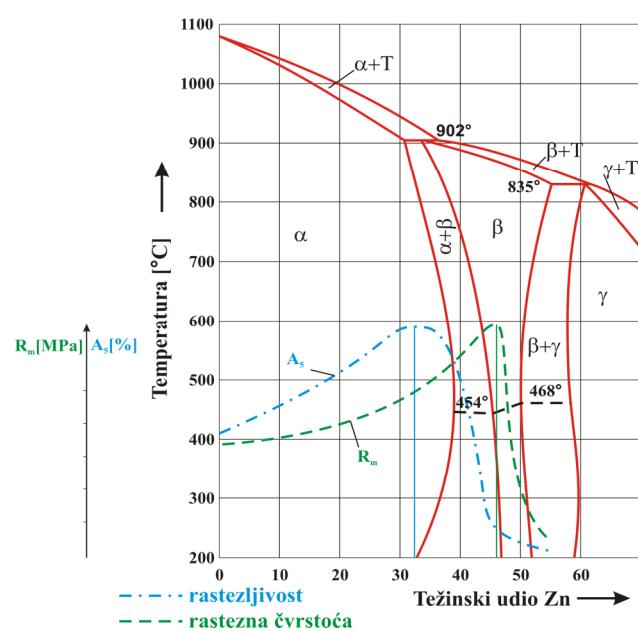
*Slika 6.41. Ovisnost svojstava bakra o temperaturi žarenja*

### 6.8.1.1 Mjed

Legure bakra i cinka nazivaju se mjedi. Cink ima temperaturu taljenja od 419.5°C, isparavanja od 906°C, a kristalizira u obliku heksagonske gusto pakirane rešetke (hep). Dijagram slijevanja bakar-cink je peritektičkog karaktera (*slika 6.42.*). Najviše se koriste mjedi sa 25-44% Zn.

Homogeno područje alfa mješanaca s plošno centriranom kubnom rešetkom je do 32,5% Zn. Za više koncentracije cinka dobiva se dvofazna  $\alpha + \beta$  struktura. Dalje područje homogene beta faze je krhko zbog komplikirane prostorno centrirane kubne rešetke. Područje dvofazne  $\beta + \gamma$  strukture se ne koristi zbog krhkog intermetalnog spoja  $\gamma$  mjedi.

Mehanička svojstva mjedi jako zavise



*Slika 6.42. Dijagram Cu-Zn*

od stupnja ugnječenja. Rastezna čvrstoća se kreće od 250 do 600 MPa, a produljenje  $A_{10}$  do 45%. Najveću rastezljivost imaju homogene mjeri s maksimalnim sadržajem cinka, dok se u heterogenoj, dvofaznoj mjeri postiže najveća čvrstoća. Stoga, ako želimo izrađivati predmete postupkom u kojem se predviđa visoki stupanj deformacije koristimo upravo mjer iz homogenog područja s maksimalnom koncentracijom Zn (oko 32,5%). Ovdje dolazi do odstupanja pravila da rastezljivost pada sa rastućim udjelom rastvorene komponente izvitoperenjem rešetke mješanca. Razlog ovoga odstupanja je u tome što je  $\alpha$  mješanac s velikom koncentracijom bakra šupljikav zbog sklonosti upijanja plinova pa dolazi do velike koncentracije naprezanja oko šupljina što znatno obara rastezljivost. Ako mjer nije potrebno obrađivati velikim stupnjem deformacije, uzimamo mjeri iz heterogenog područja zbog niže cijene (manja količina bakra) i veće čvrstoće. Mjeri iz heterogenog područja mogu se zagrijavanjem (iznad 320 °C) dovesti u homogeno područje u kojem su dobro gnječive.

Iz mjeri se izrađuju predmeti u velikim serijama obradom odvajanjem čestica. Kod rada na automatima je povoljno da se lako otkida čestica, pa se mjer namijenjena takvom radu naziva mjer za automate (ili prskava mjer). Odvajanje čestice postiže se dodavanjem male količine olova u mjer koja razbija homogenost metala jer se ne rastvara u leguri. Zagrijavanjem mjeri s olovom može doći do interkristalnog taljenja i pucanja na mjestima gdje se nalazi olov, što je posebno izraženo kod homogene mjeri. Kod dvofazne, heterogene mjeri, olov se pretvorbom alfa u beta može zadržati unutar novog zrna, pa grijanjem ne izaziva pukotine.

Boja mjeri postaje sve žuća s povećanim sadržajem cinka. Pregrijavanjem mjeri može ispariti dio cinka, pa takvo mjesto postaje crvenkasto. Slično se događa ako se cink izgubi zbog galvanske korozije.

Mjerima se osim cinka dodaju i drugi legirni elementi, kao što su Al, Mn, Fe, Ni, Si ili Sn koji poboljšavaju otpornost prema koroziji, povećavaju mehanički čvrstoću ili omogućavaju veću plastičnu deformaciju.

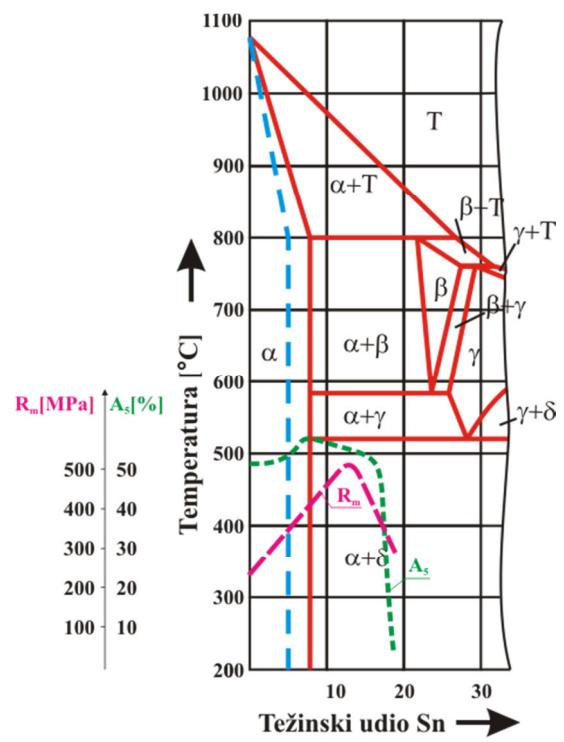
Dodavanjem Al do 2% povećava se čvrstoća i otpor lokalnoj koroziji, Mn do 3% povećava čvrstoću u toploj stanju te poboljšava klizna svojstva, a sa Fe, Si, Al, Mn ukupno do 4% raste čvrstoća na 600 MPa.

Velike količine mjeri sa cca 30% Zn koriste se za izradu čahura, metaka i granata.

### 6.8.1.2 Bronze

Legura bakra i kositra je bronca u klasičnom smislu. Danas se pod broncom u širem smislu podrazumijeva legure bakra i ostalih elemenata, ali bez cinka u značajnijoj količini. Kada se govorio o bronci misli se samo na kositrenu broncu, međutim kada ulogu kositra preuzimaju ostali elementi, onda se bronca naziva po njima (fosforna, berilijeva, silicijeva, manganska, aluminjiska bronca). Kositar se uglavnom proizvodi u Maleziji i predstavlja strateški materijal.

**Kositrena bronca - slika 6.43.** - Dijagram slijevanja bakar-kositar, kao i dijagrami slijevanja ostalih elemenata koji tvore bronce su peritektički dijagrami s nepotpunom rastvorivošću u krutnini i intermetalnim ili kemijskim spojevima. U praksi se koristi samo ograničeni dio koncentracija do najviše nekoliko desetaka postotaka legirnih elemenata. Na slici 6.43 je prikazan utjecaj

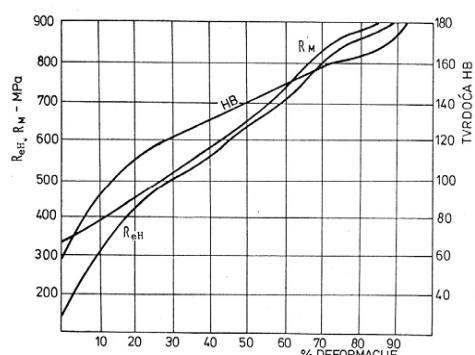


Slika 6.43. Dijagram Cu-Sn  
(metastabilni)

količinskog udjela Sn na čvrstoću  $R_m$  i rastezljivost  $A_5$ .

Kositar ima tetragonsku prostorno centriranu kubnu rešetku i u smjesi s bakrom stvara plošno centrirani kubni mješanac do koncentracija 5-8% Sn, zavisno od brzine hlađenja. Stabilni dijagram ima nešto različite granice rastvorivosti i faze, ali se u praksi ne javlja, pa se ovdje ne prikazuje. Na sobnoj temperaturi je dvofazna  $\alpha + \delta$  struktura za koncentracije iznad homogenog područja. Tvrdoću daje komplikirana  $\delta$  rešetka intermetalnog spoja. Legure iznad 20 % Sn se zbog tvrdoće praktički ne upotrebljavaju. Legure iz homogenog područja preradjuju se deformiranjem (gnječeњem), dok se heterogene legure s višim sadržajem kositra koriste za izradu odljevaka. Čvrstoća bronce iznosi do 300 MPa bez posebne toplinske ili mehaničke prerade.

Na slici 6.44. prikazan je dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava tvrdoće HB i čvrstoće materijala  $R_m$  i granice elastičnosti  $R_e$  u ovisnosti o stupnju ugnjećenja (deformiranja).



**Slika 6.44.** Tvrdoće HB i čvrstoća  $R_m$  i  $R_e$  u ovisnosti o stupnju deformacije

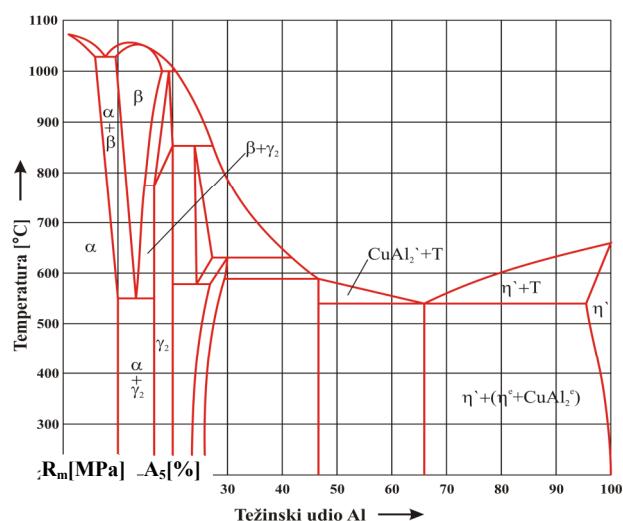
vodljivosti, do vrijednosti od 1500 MPa (radi usporedbe čelici normalne čvrstoće imaju čvrstoću oko 400 MPa). Naglim hlađenjem **berilijeve bronce** s oko 800°C zaostane meka, neravnotežna struktura. Podgrijavanjem na 300°C omogućava se difuzijsko izlučivanje sekundarne fino raspršene faze koja jako očvrsne berilijevu broncu.

**Silicijeva bronca** se koristi do oko 4% Si sa dodacima Zn, Sn, Mn ili Fe, i to u homogenom području. Dobro se zavaruje i vrlo je otporna na koroziju i trošenje.

**Manganska bronca** je vrlo žilav materijal, otporan na koroziju i kavitaciju, pa se koristi za izradu brodskih propelera i rotora pumpi i vodnih turbina. Dobro se zavaruje, pa je moguć popravak navarivanjem površina oštećenih kavitacijom.

**Aluminijkska bronca - slika 6.45,** sve se više koristi kao zamjena za kositrenu broncu, zbog niže cijene i mogućnosti nabave aluminija. Najčešće sadrži 8-11% Al. Aluminijkska bronca se koristi do najviše 15% Al jer za veće koncentracije nastaju krhke faze. Od aluminijiske bronce izrađuju se gnječilačke legure u homogenom području i ljevačke u heterogenom. Uz visoku čvrstoću, Al-bronca je jako otporna na koroziju u morskoj vodi i odlično se zavaruje.

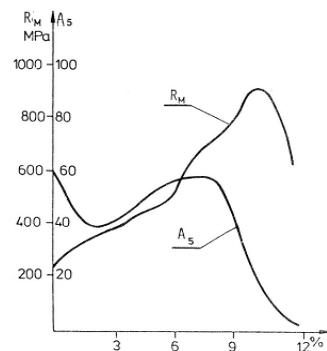
Bronce se mogu toplinski i mehanički obrađivati radi povećanja čvrstoće ili plastičnosti. Koristi se za jako opterećene dijelove u korozivnim sredinama i za



**Slika 6.45.** Dijagram slijevanja Cu-Al

izradu kovanih dijelova za rad na toplo pod pritiskom.

Na slici 6.46. prikazan je utjecaj sadržaja aluminija u aluminijskoj bronci na mehanička svojstava materijala.



Slika 6.46. Ovisnost mehaničkih svojstava aluminijске bronce o količinskom udjelu aluminija

### 6.8.1.3 Bakar-nikal

Legure bakra i nikla tvore sustav potpune rastvorivosti u krutnini, sa zamjenskim mješancima s plošno centriranom kubnom rešetkom. Za sadržaje nikla ispod 30% radi se o leguri sa svojstvima bližim bakru, a za sadržaje preko 70% Ni legure ubrajaju se u grupu niklovinih legura pod nazivom monel metal. Bakar-nikal legure su otporne na koroziju u morskoj vodi i kavitaciju. Čvrstoća iznosi do 450 MPa u gnječenjem otvrdnutom stanju. Odlično se zavaruju i otporne su na obraštanje morskih organizama.

### 6.8.1.4 Novo srebro

Legura bakra, nikla i cinka daju s većim sadržajem nikla (do 18% Ni) srebrnu boju površine. Koriste se u preciznoj mehanici, izradi posuđa i metalnog novca.

## 6.8.2 Krom

Krom ima talište od 1920°C. Kristalizira u prostorno centriranoj kubnoj rešetki. Najviše se koristi kao legirni element u legiranim željezima, a u čistom obliku za nanošenje ukrasnih, antikorozivnih i reflektirajućih površinskih slojeva.

Kao legirni element u legiranim željezima djeluje na povišenje otpornosti koroziji i sprečavanje hrđanja na atmosferi (preko 13%Cr), te je osnovni legirni element u nehrđajućim čelicima. Zamjenski se legira sa željezom i u većoj koncentraciji djeluje na stabilnost ferita tako da nakon skrućivanja uopće ne dođe do pretvorbe delta ferita u austenit.

Krom s ugljikom tvori tvrde karbide kao legirni element, ali se karbidi mogu nanositi i na metalne površine radi smanjenja trošenja.

### 6.8.3 Nikal i legure

Talište nikla je 1450°C i kristalizira u plošno centriranu kubnu rešetku. Ispod 360°C je slabo magnetičan. Čvrstoća gnječenog nikla ide do 850 MPa, a rastezljivost do 40%. Zadržava čvrstoću i na 400°C, otporan na oksidaciju i koroziju u brojnim agresivnim sredinama.

U čistom obliku koristi se za platiranje čelika tanjim, antikorozivnim slojevima, zatim za galvansko nanošenje ukrasnih i antikorozivnih prevlaka. Veliku primjenu nikal ima u svojim legurama i kao legirni element u legiranim željezima.

Nikal u legiranom željezu povećava otpornost koroziji, u većoj količini onemogućava transformaciju austenita u ferit, tako da na sobnoj temperaturi ostane stabilna austenitna faza. Zajedno sa kromom tvori nekoliko grupa nehrđajućih čelika, od kojih je čelik s homogenom austenitnom fazom nemagnetičan. Sa željezom tvori zamjenski mješanac.

Legure nikal-bakar nazivaju se moneli, sadrže do 30% Cu. Vrlo su otporne na koroziju u morskoj vodi i zbog prisutnosti bakra sprečavaju obraštanje brodskog trupa. Dobro se zavaruju i deformiraju. Čvrstoća doseže do 900 [Mpa] uz dobru rastezljivost. Sviljetle su boje.

Nikal-krom legure se koriste za elektrootporne grijace jer uz veliki električni otpor pokazuju i veliku otpornost oksidaciji na visokim temperaturama koje grijac poprima, kao i za dijelove izložene vatri i kiselinama.

Nikal-krom-željezo legure sadrže 20-45% Ni, 13-22% Cr, a ostatak je željezo. Otporne su na koroziju i oksidaciju.

Neke legure nikla mogu se očvrsnuti izlučivanjem sekundarnih faza. Odlika im je zadržavanje čvrstoće na visokim temperaturama i otpornost puzanju. Koriste se kao elementi plinskih turbina i raketnih motora.

#### 6.8.4 Kobalt

Legure kobalta, nikla i kroma su također visoko temperaturne legure, otporne na oksidaciju uz zadržavanje čvrstoće i na visokim temperaturama. Inače je kobalt legirni element u čeliku te matrica za zadržavanje tvrdih čestica karbida u kompozitima.

#### 6.8.5 Titan i legure

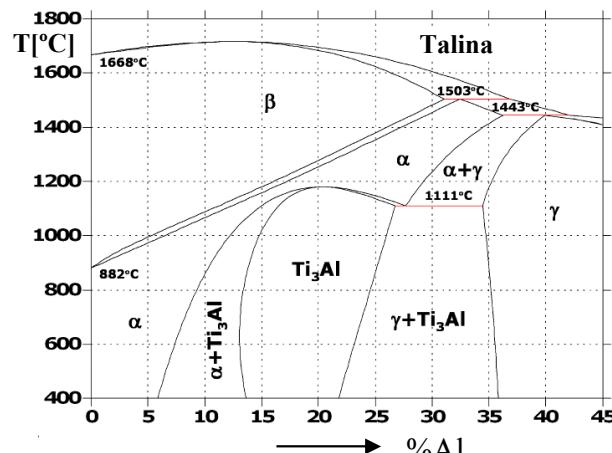
Titan je najlakši metal u skupini teških obojenih metala. Talište je na  $1730^{\circ}\text{C}$ , a kristalizira u  $\beta$  prostorno centriranoj kubnoj rešetki. Na  $880^{\circ}\text{C}$  prekristalizira u heksagonsko gusto pakiranu  $\alpha$  rešetku. Na površini se stvara sloj oksida  $\text{TiO}_2$ , koji dobro prijava uz površinu i daje mu odličnu zaštitu od korozije.

Čisti titan najviše se koristi kao antikorozivni materijal za platiranje posuda u prehrambenoj industriji. U legurama se koristi u avio-tehnici za izradu elemenata trupa, krila i dijelova motora za nadzvučne avione, podvrgnute visokim temperaturama u letu. Dobro se zavaruje u zaštiti argona.

Titan se legira zamjenski s aluminijem koji stabilizira  $\alpha$  fazu, zatim kromom, niobijem, bakrom, manganom, željezom koji stabiliziraju  $\beta$  fazu, te kositrom i cirkonijem koji nemaju utjecaja na modifikaciju rešetke. Uključinsko legiranje kisikom, dušikom i ugljikom također stimulira  $\alpha$ , a vodikom  $\beta$  fazu. Uključinski elementi također povećavaju čvrstoću i obaraju žilavost, a vodik uzrokuje zakašnjelo nastajanje pukotina.

Kombinacije različitih legirnih elemenata daju legure s  $\alpha$ ,  $(\alpha + \beta)$  i  $\beta$  fazom.  $(\alpha + \beta)$  i  $\beta$  legure se mogu očvrsnuti toplinskom obradom na čvrstoće do  $1200$  MPa.

Dobivanje titana iz minerala rutila je komplikirano i skupo, pa je i titan skup. Cijene dosta osciliraju, zavisno od potražnje vojne zrakoplovne industrije. Titanove legure se koriste i za sportske svrhe (okviri bicikli i motocikli, teniski reketi).



Slika 6.47. Dijagram slijevanja Ti - Al

#### 6.8.6 Olovo

Oovo ima nisko talište od  $327^{\circ}\text{C}$  i plošno centriranu kubnu rešetku. Odlično se plastično deformira i podnosi uzastopne deformacije, jer mu je temperatura rekristalizacije niska. Na zraku se prevlači slojem olovnog oksida,  $\text{PbO}_2$ , a u vodi slojem karbonata,  $\text{PbCO}_3$  uslijed djelovanja ugljične kiseline. Otporan je na mnoge korozivne sredine. Odlično apsorbira ionizirajuća zračenja. Visoka specifična težina je korisna gdje se u malom volumenu treba smjestiti velika masa. Oovo je otrovan metal ako se unosi u tijelo dodirom ili otopljeno u hrani.

Čisto olovo ili s primjesama koristi se za izradu sanitarnih cijevi, za oblaganje spremnika različitih kiselina, za brtve i zaštitu podzemnih kablova, za platiranje čelika za postizanje otpornosti atmosferskoj koroziji, za punjenje projektila i slično. Velike količine olova troše se za izradu akumulatora.

### 6.8.7 Cink i legure

Tehnički cink doseže čvrstoću od 350 MPa. Kristalizira u heksagonsko gusto pakiranoj rešetki. Skrutište je na  $419.5^{\circ}\text{C}$ . Sa željezom stvara intermetalni tvrdi spoj. U galvanskom nizu negativniji je od željeza, tako da u dodiru željezo-cink u elektrolitu dolazi do rastvaranja cinka, koji time štiti željezo. Cink se koristi za nanošenje antikorozivnih prevlaka na čeliku galvanskim načinom, umakanjem u talinu ili naštrecavanjem, te kao dodatak bojama. Upotrebljava se za anode - protektore čelika u morskoj vodi i vlažnim sredinama. Često se anode legiraju i aluminijem. U građevinarstvu se koristi u obliku pocinčanih limova za izradu građevinske limarije. Na površini se prevlači slojem cinkovog oksida, koji na povišenim temperaturama postaje bijela skrama.

Veliku primjenu imaju legure cinka za izradu precizno lijevanih dijelova koji ne zahtijevaju daljnju obradu (legira se aluminijem i bakrom).

Cink ima veliku primjenu kao legirni element u legurama bakra i aluminija, gdje obara talište, ali povećava čvrstoću stvaranjem intermetalnih spojeva.

### 6.8.8 Kositar i legure

Čisti kositar je spomenut kod alotropskih modifikacija metala. Vrlo je mekan i rastezljiv, otporan na mnoge korozivne sredine, neotrovan i pogodan za pakiranje hrane (staniol) i kositrenje bakrenog posuđa. Talište je nisko,  $232^{\circ}\text{C}$ , te je kositar osnova za niskotaljive legure.

Presvlačenjem čeličnog lima kositrom dobiva se bijeli lim, od kojeg se prave konzerve za hranu i pića. Moguće je recikliranje kositra iz odbačenih limenki.

Kositar je pogodan za izradu igračaka (kositreni vojnici i druge sitne igračke jer je neotrovan, pa nema štete ako djeca grizu igračke).

Važan je legirni element u broncama, ležajnim legurama, lemovima.

### 6.8.9 Ostali teški metali

Ostali teški metali koriste se u čistom stanju za specifične namjene ili kao legirni elementi. Detaljniji podaci o njima mogu se naći u priručnicima.

Većinom su skupi i dosta rijetki, tako da se dobivaju na manjem broju mesta u svijetu, često i samo jedna do dvije kompanije proizvode neki metal.

Niskotaljivi teški metali imaju u pravilu malu čvrstoću (mala energija vezivanja, pa se lakše i tale). Teško taljivi metali imaju visoko talište, vrlo su čvrsti i obično i tvrdi, zadržavaju čvrstoću i na visokim temperaturama.

**Kadmij**, talište  $321^{\circ}\text{C}$ , sličan je cinku, ali je jako otrovan. Isparava na  $785^{\circ}\text{C}$ , tako da je potrebna dobra ventilacija kod taljenja kadmija ili legura s kadmijem. Najviše se koristi za antikorozivne prevlake na čeliku i niskotaljive lemove.

**Živa**, jedini rastaljeni metal na sobnoj temperaturi, skrućuje se na temperaturi od  $-39^{\circ}\text{C}$ . Koristi se u elektrotehnici kao tekući prekidač, za punjenje lampi sa živinim parom, punjenje manometara, termometara, te za izradu legura s mnogim metalima. Rastvara praktički sve metale osim željeza i volframa. Žvine pare su otrovne i izazivaju trajna oštećenja organizma.

**Volfram** je metal najvišeg tališta od svih metala i legura ( $3400^{\circ}\text{C}$ ). Ova osobina omogućava primjenu čistog volframa za žarne niti u žaruljama i elektrode za elektrolučno zavarivanje. Kao legirni element koristi se u alatnim čelicima. Volframov karbid, WC, je najtvrdi karbid i

uspješno zamjenjuje dijamant u mnogim primjenama. Na povišenim temperaturama volfram jako oksidira, pa ga treba štiti od kisika inertnim ili neutralnim plinovima.

**Tantal** je drugi metal po redu s obzirom na temperaturu taljenja, 3030°C. Vrlo tvrd, čvrst i otporan gotovo na sve korozivne sredine (odatle mu i ime, jer podnosi sve muke). Koristi se za izradu dijelova instrumenata i implatante u kirurgiji (jer ne korodira u krvi i tjelesnim sokovima) te u vrlo agresivnim sredinama u kemijskoj industriji. Tantalov karbid je također vrlo tvrd.

**Molibden** je otporan na oksidaciju i koristi se za izradu dijelova električnih prekidača, zatim za nosače žarnih tijela. Tali se na 2630°C. Važan je legirni element u čeliku za povišenje čvrstoće, žilavosti, otpornosti puzanju i koroziji.

**Cirkonij** ima talište od 1750°C, otporan je na visokim temperaturama jer stvara prevlaku otpornog oksida. Najmanje se degradira neutronskim zračenjem, pa se koristi za kapsule nuklearnog goriva.

**Uran** ima talište od 1130°C. Bez radioaktivnih izotopa koristi se za zaštitu od zračenja jer najbolje apsorbira ionizirajuća zračenja. Lako oksidira na povišenim temperaturama, pa je kod zavarivanja potrebna zaštita inertnim plinovima.

**Plemeniti metali**, srebro, zlato, platina, rodij, iridij, imaju zajedničko svojstvo: visoku cijenu i pojedinačna izuzetna fizikalna ili kemijska svojstva. Osim za nakit, ukrase i novac, koriste se za izradu instrumenata, lemovima, katalizatora.

**Srebro** je najjeftiniji plemeniti metal, odličan je vodič električne energije i izuzetno otporno na neke vrlo agresivne sredine. Srebrne presvlake nanose se za postizanje reflektirajućih ploha i za ukrašavanje posuđa. Na zraku u kojem ima sumporovodika dobiva crnu presvlaku sulfida. Srebro se koristi kao dodatak u lemovima i za izradu nakita i novca, te u zubarstvu za popunjavanje šupljina u zubima.

**Zlato** je vrlo mekani metal, korišten od davnine za izradu nakita, posuđa i novca. Talište mu je na 1064,76°C. Praktički ne korodira. Nalazi se samorodan u obliku grumenja, zrna, pijeska. U tehnici ima vrlo važnih primjena, u izradi mjernih instrumenata, u električnim kontaktima koji ne mijenjaju otpor (nema oksidacije), nanošenju zlatnih reflektirajućih prevlaka na staklima (čime se bitno smanjuje apsorpcija sunčevog zračenja u zgradama i troškovi klimatizacije). Koristi se u zubarstvu za izradu proteza te za izradu umjetničkih predmeta. Zlato se legira bakrom radi povećanja čvrstoće. S obzirom na specifičnu primjenu i vrijednost, promet zlata je pod državnom kontrolom. Finoča zlata se još uvijek mjeri u izvansustavnim, tradicionalnim jedinicama, karatima. Dvadesetčetiri karata predstavlja čisto zlato. Maseni udio zlata možemo preračunati iz poznatog broja karata (kt):

$$\% \text{Au} = \text{kt} \cdot \frac{1}{24} \cdot 100 [\%]$$

**Platina** je vrlo otporna na koroziju, ima visoko talište i ubrzava neke kemijske procese na nižim temperaturama (katalizator). Također se koristi u elektrotehnici, za mjerne instrumente, u katalizatorima ispušnih plinova automobila, za postizanje tvrdih površinskih slojeva na čeliku, zajedno s iridijem (vršci nalivpera, nožići za brijanje).

Zlato, platina, rodij predstavljaju osnovu visokotemperurnih lemov za instrumente koji su izloženi visokim temperaturama.

Ovim je završen pregled teških obojenih metala, a slijedi prikaz najviše korištenih lakih obojenih metala.

## 6.8.10 Aluminij i legure

Aluminij je metal koji se u strojarstvu troši odmah poslije čelika. Godišnja proizvodnja u razdoblju od 2000 do 2004. g. bila je oko 40 milijuna tona. Cijene aluminija dosta osciliraju zavisno od cijena energije. Dobiva se procesom elektrolize rastaljenih soli fluora, klora i aluminijevog oksida (glinice). Kisik iz glinice odlazi na ugljenu anodu (koja tijekom elektrolize odgara), a rastaljeni aluminij ostaje na dnu posude, koja je ujedno i katoda. Nakupljeni aluminij se periodički odlijeva iz kade i šalje na preradu. Glinica se dobiva iz boksitne rudače koja sadrži dosta silicija i željeza redukcijom pomoću natrijeve lužine.

Čisti aluminij ima talište na  $660^{\circ}\text{C}$ , kristalizira u plošno centriranoj kubnoj rešetki i nema modifikacija rešetke. Gustoća je  $2700 \text{ kg/m}^3$ . Dobar je vodič električne struje. Legira se s nekoliko grupe legirnih elemenata i tvori niz legura specifičnih svojstava. Cijena mu je obično nekoliko puta veća nego ugljičnom čeliku. Moguće ga je reciklirati pretaljivanjem otpadnog aluminija, ali se tada dobivaju legure niže čistoće. Neotrovan je i primjenjuje se za izradu posuđa i spremanje i konzerviranje hrane.

Aluminij i legure sistematiziraju se gotovo u svim svjetskim standardima u 8 sustava slijevanja, a to su:

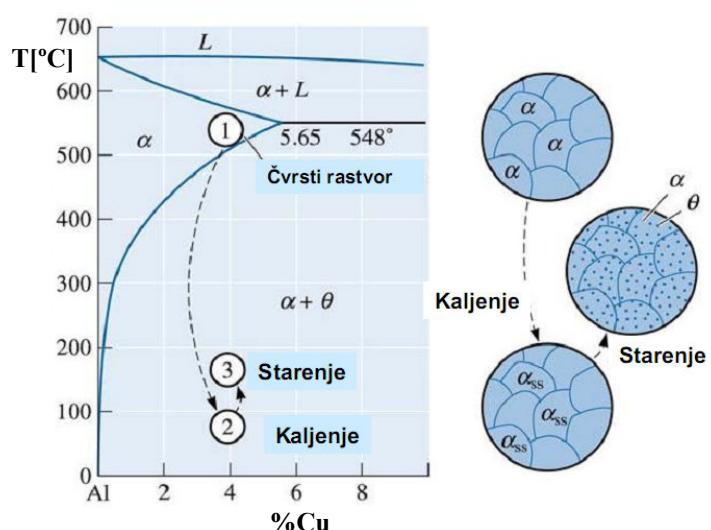
Legura	Oznaka serije
1. Tehnički čisti aluminij 99.5%	1 x x x
2. Binarni sustav aluminij-bakar	2 x x x
3. Binarni sustav aluminij-mangan	3 x x x
4. Binarni sustav aluminij-silicij	4 x x x
5. Binarni sustav aluminij-magnezij	5 x x x
6. Sustav aluminij-magnezij-silicij	6 x x x
7. Sustav aluminij-cink	7 x x x
8. Ostalo	8 x x x

### 1. Tehnički čisti aluminij

Tehnički čisti aluminij ima čistoću 99.5%. Čvrstoća je niska i može se povećati gnjećenjem (od 80 na 180 MPa). Zagrijavanjem čvrstoća pada zbog rekristalizacije. Zbog dobre električne vodljivosti koristi se za izradu kablova za prijenos električne energije i za različitu ambalažu. Dobro se lijeva i spaja zavarivanjem. Aluminij rastvara vodik uključinski, ali to ne kvari mehanička svojstva, nego jedino izaziva poroznost.

### 2. Binarni sustav aluminij-bakar

Rastvorivost bakra u mješancu aluminija je znatno manja nego obrnuto - rastvorivost aluminija u bakru. Na slici 6.48. prikazan je dio dijagrama Al-Cu. Legure sustava Al-Cu mogu se očvrsnuti toplinskom obradom zahvaljujući smanjenju rastvorivosti bakra u aluminiju prilikom hlađenja, od skoro 6% na eutektičkoj temperaturi na praktički potpunu nerastvorivost na sobnoj temperaturi. Naglim hlađenjem legure s homogenom fazom do sobne temperature bakar ostane rastvoren u rešetki aluminija, što predstavlja nestabilnu strukturu. Difuzijom (tijekom



Slika 6.48. Dijagram slijevanja Al-Cu

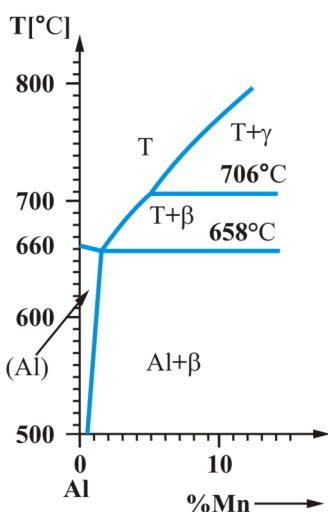
vremena, dakle prirodno, ili zagrijavanjem, umjetno) dolazi do izlučivanja  $\theta$  intermetalnog spoja CuAl<sub>2</sub> koji jako očvrstne materijal. U očvrstnom stanju legura ima vlačnu čvrstoću 400 [MPa], što odgovara čvrstoći nelegiranog niskougljičnog čelika. Ukoliko se difuzijom pretjera dolazi do koagulacije izlučenih struktura i pada čvrstoće. Legure ovog sustava nazvane su dural još početkom XX. stoljeća, kada su posebno korištene za potrebe zrakoplovne industrije. Mogu se dobro formirati u mekom stanju, nakon čega konstrukcija difuzijom očvrstne. Durali se dobro zavaruju osim nekih legura s povišenim sadržajem bakra. Potrebno je naglasiti da zagrijavanje izaziva starenje legure i pad mehaničkih svojstava.

### 3. Binarni sustav aluminij-mangan

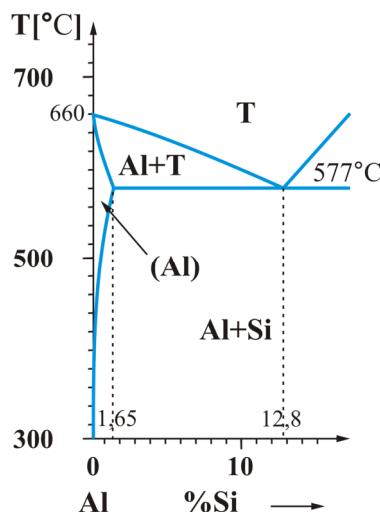
Ove legure mogu se očvrstnuti hladnom deformacijom, jer se koriste u homogenom području. Pokazuju dobru mogućnost oblikovanja deformiranjem. Najviše se koriste za izradu posuđa i ambalaža u prehrambenoj industriji. Na *slici 6.49.* prikazan je dijagram Al-Mn.

### 4. Legure sustava aluminij-silicij

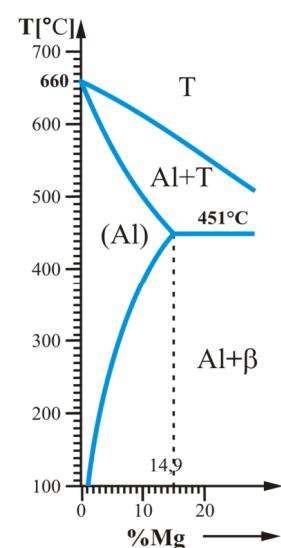
Ove su eutektičke legure s alfa mješancima aluminija i raspršenim kristalima silicija u matrici. Slabo su očvrstive. Legure eutektičke koncentracije sa 12,8% Si koriste se kao ljevovi, a kao gnječilačke legure do 5% Si. Na *slici 6.50.* prikazan je dijagram slijevanja Al-Si. Otpornost na koroziju je povećana zbog nastajanja silicijevog oksida na površini, što daje i tipičnu sivkastu boju površinske kore. Kod ljevova, naročito iz recikliranog aluminija, moguće je nastajanje tvrdih silicijevih spojeva s nečistoćama u otpadu, tako da je obrada rezanjem otežana.



*Slika 6.49. Dijagram Al-Mn*



*Slika 6.50. Dijagram Al-Si*



*Slika 6.51. Dijagram Al-Mg*

### 5. Sustav aluminij - magnezij

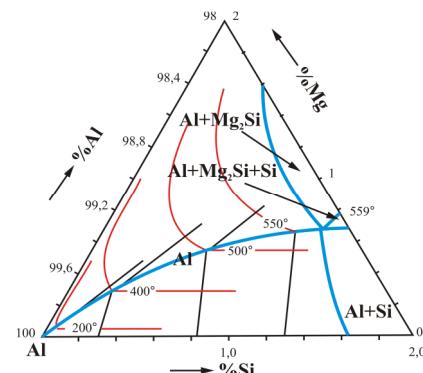
Ovo je također legura s eutektikumom i djelomičnom rastvorivošću u krutnini. Uglavnom se koriste legure s malim sadržajem magnezija, do 5%, tj. iz homogenog područja aluminijevih alfa mješanaca (*slika 6.51.*) Ove se legure očvršćuju hladnim gnječenjem i pokazuju visoku otpornost koroziji u morskoj vodi, tako da se koriste u brodogradnji za izradu trupa i nadgrađa broda.

Čvrstoća raste s povišenjem sadržaja Mg, jer se radi o zamjenskim mješancima, i doseže do 400 MPa. Zagrijavanjem čvrstoća pada zbog rekristalizacije ugnječene strukture.

## 6. Legura aluminij-magnezij-silicij

Trojne legure Al-Mg-Si danas se najviše koriste zbog mogućnosti očvršćenja toplinskom obradom, antikorozivnosti, dobre zavarljivosti i električne vodljivosti. Koriste se legure do najviše 2% ukupnih dodataka.

Struktura se sastoji od aluminija i intermetalnog spoja  $Mg_2Si$  koji očvršćuje matricu. Na slici 6.52. prikazan je trojni dijagram Al-Mg-Si.



Slika 6.52. Dijagram Al-Mg-Si

## 7. Legure aluminij-cink-magnezij

Ovo su također toplinski očvrstive legure s komplikiranim strukturom u kojoj je izlučeno nekoliko intermetalnih spojeva aluminija i magnezija, te aluminija, magnezija i cinka. Slabije su otporne na koroziju od legura grupe 8 x x x. Postižu visoku čvrstoću i koriste se kao konstruktivni elementi.

## 8. Legure s litijem i cirkonijem

Legure aluminija s litijem razvijene su nedavno. Legira se malom količinom litija (oko 2-3%) ili se pravi ternarna legura s malom količinom cirkonija. Ovim se postiže ušteda na težini do 10% čime se kod zrakoplova smanjuje potrošnja goriva ili povećava korisna nosivost. Ove legure imaju i oko 10% veći modul elastičnosti što povećava krutost konstrukcije. Očvršće se toplinskom obradom dozrijevanja. Očvršćenje se postiže izlučivanjem intermetalne faze  $Al_3Li$  i  $Al_3Zr$ . Na taj način rastezna čvrstoća poraste do 630 MPa. Dalnjim dozrijevanjem metastabilna faza  $Al_3Li$  prelazi u stabilnu  $AlLi$ . Nedostatak ove legure u odnosu na ostale legure aluminija je smanjena žilavost i neotpornost prema napetosnoj koroziji. Ove legure su prije svega namijenjene avioindustriji.

### 6.8.11 Magnezij i legure

Magnazij je ultralaki metal. Koristi se u legurama s dodatkom aluminija i cinka. Kristalizira u heksagonskoj gusto pakiranoj rešetki, talište mu je blisko talištu aluminija.

Iz magnezija se izrađuju lake konstrukcije vozila i motora, posebice za sportske svrhe i avionsku industriju. Čisti magnezijev prah koristi se u pirotehnici i metalurgiji za dezoksidaciju.

Magnezij burno izgara na zraku ako se upali, tako da je potrebna posebna zaštita kod lijevanja i zavarivanja, a kod strojne obrade prilikom hlađenja čestice i reza. Požar se gasi suhim pijeskom i prahom za gašenje. Voda se ne smije koristiti.

### 6.8.12 Berilij

Berilij pokazuje najveći modul elastičnosti među lakinim metalima i najmanju gustoću. Superioran je u odnosu na sve ostale metale u pogledu specifičnog modula elastičnosti E/p. Koristi se za izradu manjih konstrukcija u svemirskim letjelicama. Najčešće je dodatak u legurama. Ima vrlo visoko talište za laki metal, 1390°C.

Berilij je izuzetno otrovan metal, pa je kod obrade berilija i legura s berilijem potrebna posebna zaštita.

### 6.8.13 Kalcij i litij

Kalcij i litij dodaju se kao legirni elementi i u čistom stanju se ne koriste. Kalcij s olovom daje tvrdi spoj u ležajnim legurama.

## 7 Srasline

Srasline nisu posebne legure ili metali nego samo aglomerati (skupovi raznorodnih sastojaka) različitih metala, nemetala, kemijskih i intermetalnih spojeva, sraštenih u čvrstu masu difuzijskim vezivanjem.

Oblik čestica srasline može biti različit, od sferičnih do zrnatih, od jednolikih do različitih dimenzija, vrlo sitnih ili krupnih ili miješanih.

Homogenost sraslina mjeri se udjelom popunjenoosti jediničnog volumena materijalom, i može biti skoro potpuna do skoro potpune poroznosti. Ovim se namjena sraslina širi na najrazličitije grane života i ovdje se naravno ne može sve obuhvatiti.

Prema dominirajućem materijalu razlikujemo:

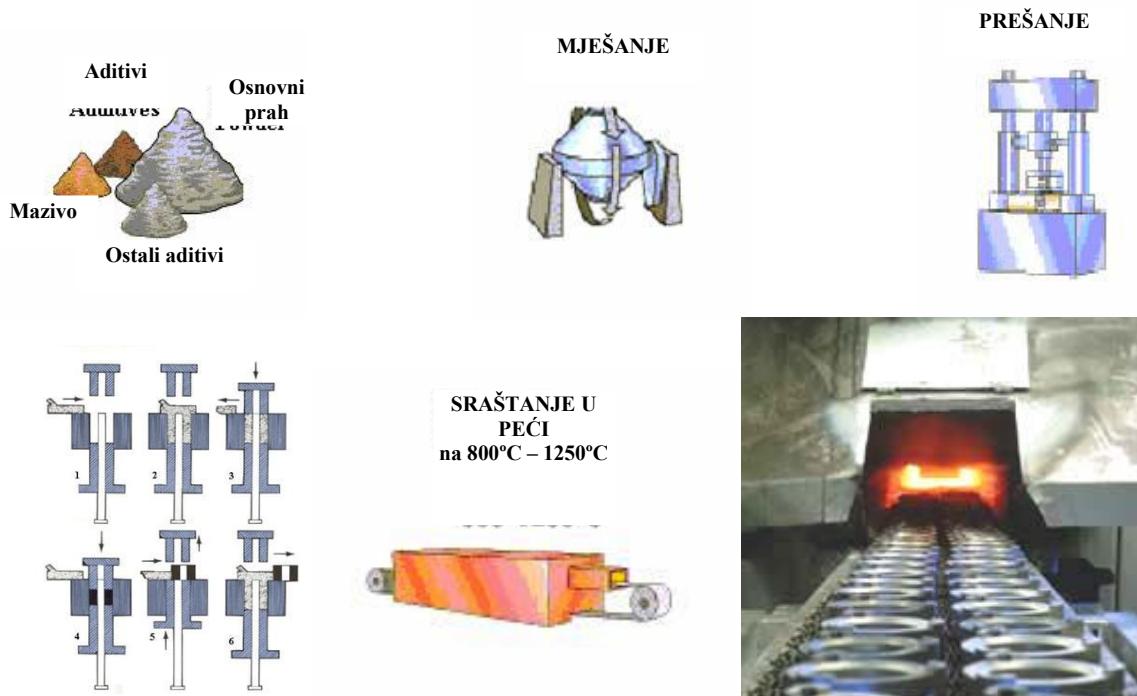
- srasline legura željeza
- srasline bakra
- srasline aluminija
- srasline keramika.



Postupkom sraštanja mogu se izraditi proizvodi od elemenata koji:

- nisu rastvorivi ni u talini, niti u krutnini
- ne tvore uobičajene legure
- se ne mogu lijevati zbog visokog tališta (Mo, W).

Ovim postupkom postiže se velika dimenzionalna točnost pa nije potrebna naknadna obrada izratka. Kako su ovi materijali porozni, dobro upijaju mazivo u šupljine te se koriste kao samopodmazivi ležajni materijali.



Iz slijedećih nekoliko primjera vidljiva je širina primjene:

*Srasline s volframovim karbidom*, WC, pokazuju visoku tvrdoću i na visokim temperaturama rezanja, pa se koriste kao rezne oštice alata. Mogu se koristiti umjesto dijamanta za rezanje kamena i tvrdih minerala.

*Srasline bronce*, koriste se za male klizne ležajeve s dvostrukim podmazivanjem, jer u šupljinama zadržavaju mazivo.

*Srasline prašaka ili vlakana* u različitim gradacijama poroznosti koriste se kao filtri (*slika 7.1.*). Zavisno od vrste medija koji filtriraju izabire se i metal otporan na koroziju u tom mediju.

Kućišta satova izrađuju se sraštanjem antikorozivnih legura i posve su nepropusna.

*Implantanti u medicini* izrađuju se od sraslina nehrđajućeg čelika ili tantala. Usađivanjem u kosti, koštano tkivo impregnira poroznu sraslinu i bolje sidri implantant, nego uobičajeni način cementiranja implantanta u kosti (*slika 7.2.*)

Proizvodnja sraslina odvija se u tri faze (metalurgija praha):

1. miješanje praškaste smjese;
2. oblikovanje smjese u kalupima i prešanje do postizanja željene gustoće;
3. sraštanje (žarenje na temperaturi koja omogućava difuziju).



*Slika 7.1. Filtri*

Praškasti metali za izradu sraslina se dobivaju:

- taloženjem mulja nakon kemijskih reakcija;
- štrcanjem taline u hladni prostor;
- raspršivanjem u visoko temperaturnoj plazmi.

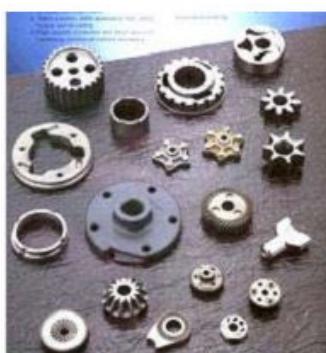
Postupci dobivanja vlakana:

- cijeđenjem taline kroz sapnice, pri čemu nastaju dugačke niti;
- centrifugalnim ištrcavanjem taline s rotirajućih diskova;
- kristalizacijom iz plinovitih spojeva dobivaju se vlakna vrlo pravilne kristalne strukture.



*Slika 7.2. Primjena u medicini – umjetni kuk*

Ovim postupkom izrađuje se veliki broj različitih dijelova u automobilskoj industriji.



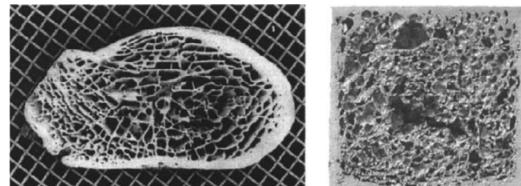
*Slika 7.3. Dijelovi dobiveni sraštanjem*

## 8 Metalne pjene

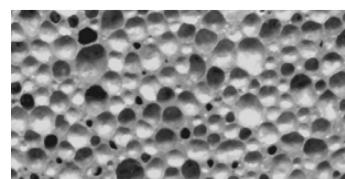
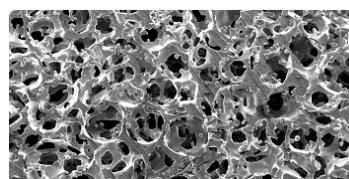
Prirodni materijali su u pravilu porozni (kamen, kost, koralji...). Metalnim pjenama pokušavamo se približiti strukturama koje nastaju u prirodi (*slika 8.1*). Intenzivan razvoj metalnih pjena započeo je koncem 20. stoljeća.

Osnovna svojstva metalnih pjena u usporedbi sa metalima su:

- visoka poroznost (40% - 90%);
- dobro prigušuju zvuk i vibracije;
- mala specifična težina;
- relativno visoka krutost;
- visok stupanj apsorpcije udarne energije;
- dobra toplinsko izolacijska svojstva.



*Slika 8.1. Struktura kosti (lijevo) i metalne pjene (desno)*

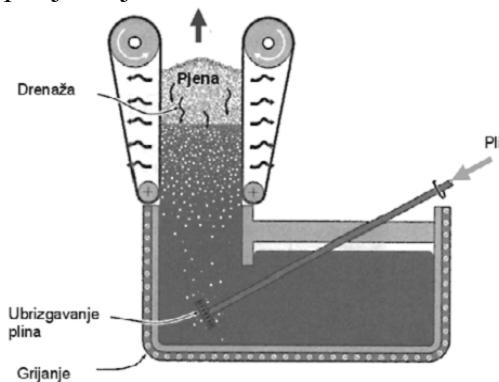


*Slika 8.2. Metalne pjene s otvorenim i zatvorenim šupljinama*

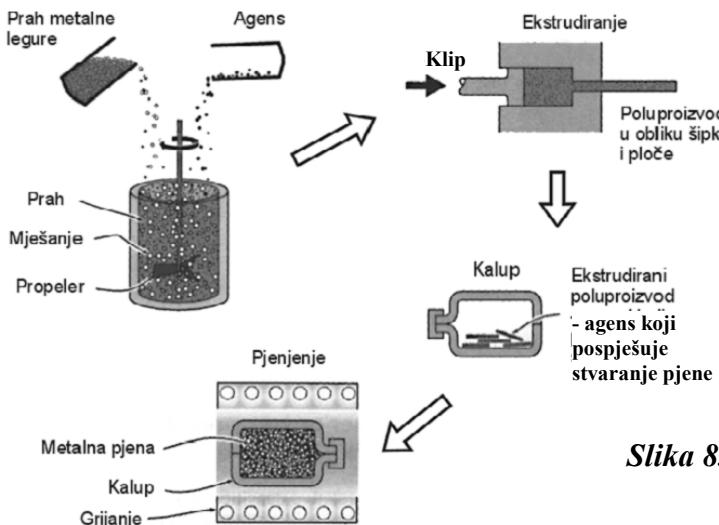
Specifična težina pjenastih materijala je ovisna o homogenosti materijala, odnosno o volumenskom udjelu šupljina. Pjene mogu biti otvorenih ili zatvorenih šupljina (*slika 8.2.*).

Pjene otvorenih šupljina predstavljaju spužvaste tvari jer lako upijaju tekućine i porozne su. Pod opterećenjem se jako zbijaju. Pjene zatvorenih šupljina se manje deformiraju pod opterećenjem i vraćaju u prvobitni oblik. Nepropusne su za plinove i tekućine.

Metalne pjene se dobivaju iz taline ili iz praha. Poroznost nastaje iz tekućeg stanja tako da se i prah u procesu proizvodnje tali. Nužan preduvjet za stvaranje poroznosti je izvor plina (*slika 8.3 i 8.4*), koji može biti vanjski ili se u talinu dodaje raspršujući agens koji pospješuje uplinjavanje.

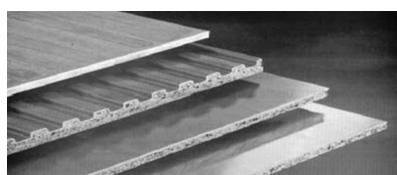


*Slika 8.3. Proces nastajanja metalne pjene ubrizgavanjem plina*

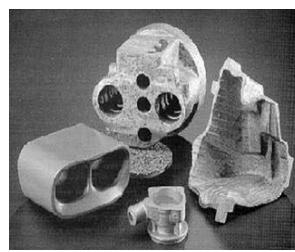


**Slika 8.4.** Proces nastajanja metalne pjene pomoću agensa

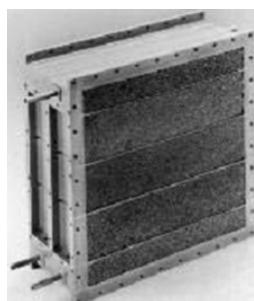
Najčešće dostupne metalne pjene su na bazi aluminija i nikla. Mogu biti i na bazi magnezija, olova, bakra, cinka, bronce, titana ili zlata. Kombinacijom raznih materijala dobiva se širok raspon svojstava.



Sendvič paneli napravljeni iz metalnih pjena



Lijevani proizvodi iz Al metalne pjene



Izmjenjivač topline iz Al metalne pjene



Automobilski branik napravljen iz metalne pjene

**Slika 8.5.** Proizvodi izrađeni iz metalnih pjena

Metalne pjene mogu se dobiti i reakcijom u talini koja oslobada plinove, zatim zasićenjem taline plinovima i kasnijom ekspanzijom na nižem tlaku, te nanošenjem metala na lake kuglice mineralnih ili polimernih pjena ili na srasline vlakana.

## 9 Kompozitni materijali

Kompozitni materijali predstavljaju strukture kod kojih se jako razlikuju pojedine faze, koje mogu biti metali, nemetali, kemijski i intermetalni spojevi.

Osnovna odlika kompozita da u principu postoje dvije faze:

- matrica
- dodatak.

Ove faze imaju bitno različita mehanička svojstava. **Matrica** je mekša i služi kao punilo za postizanje stabilnosti oblika tvrde faze. **Dodatak** u manjoj količini je čvrsta i tvrda faza.

Prema matrici dijelimo ih na:

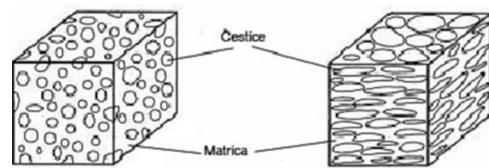
- metalne

- keramičke
- polimerne.

Prema dodatku mogu se sistematizirati u nekoliko skupina:

- s dodatkom čestica (*slika 9.1.*)
- s dodatkom vlakana (*slika 9.2.*)
- strukturni kompoziti (slojeviti ili lamelarni) (*slika 9.3.*).

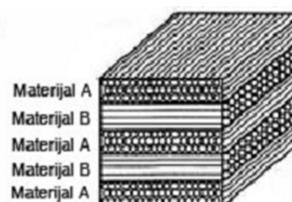
Kompoziti mogu biti u obliku mase s nepravilno izmiješanom tvrdom fazom u mekoj matrici, *slika 9.1.* U tom slučaju kompozit pokazuje svojstvo kvazi izotropnosti. Kompoziti s usmjerenim vlaknima, nitima ili slojevima tvrde faze u matrici pokazuju veliku anizotropiju svojstava, *slika 9.2.*



*Slika 9.1. Kompoziti s česticama*



*Slika 9.2. Kompoziti s vlaknima*



*Slika 9.3. Strukturni kompoziti*

Primjeri često korištenih kompozita:

- s dodatkom čestica - brusne ploče s tvrdim česticama aluminijevog oksida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ili silicijeva karbida  $\text{SiC}$  povezanih staklenom ili polimernom matricom u krutu ploču;
- s dodatkom vlakna - plastika (epoksidna ili poliesterska smola) ojačana staklenim vlaknima;
- strukturni kompozit - izmjenični slojevi kod "šperploče" tankih slojeva drveta i ljepila za drvo (polimer).

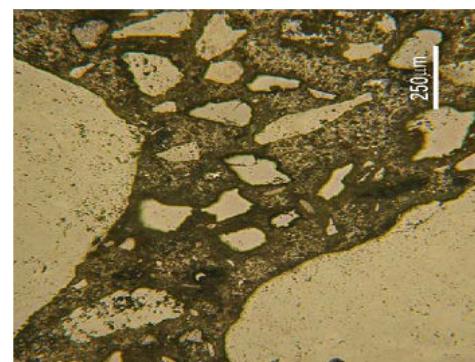
Kompoziti sa slojasto nanesenim različitim materijalima također pokazuju anizotropiju svojstava (*slika 9.3.*).

Veza između tvrdih faza i matrice zavisi od vrsta materijala. Kod metala je vezivanje moguće difuzijom na dodirnim površinama tvrdih faza s matricom, stvaranjem mješanaca, intermetalnih ili kemijskih spojeva. Zavisno od trajanja procesa dobiva se i odgovarajuća debljina spoja. Kod polimera vezivanje je uglavnom adhezijom (lijepljenjem) površina. Kod slojastih kompozita

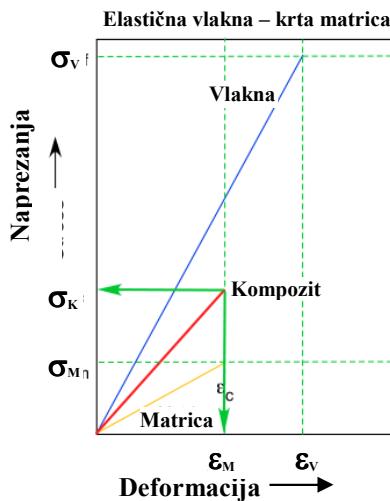
lijepe se slojevi različitih materijala. Ukoliko se radi o slojevima različitih metala ili metalnih saća, utoliko se površine mogu vezivati lemljenjem.

Čvrstoća kompozita najviše ovisi o čvrstoći i udjelu tvrde faze u matrici. Na *slici 9.5.* predočen je dijagram naprezanje - deformacija za kompozitni materijal i za materijal vlakna odnosno matrice. Prigušenje vibracija je također veće nego kod homogenih materijala.

Spajanje kompozitnih poluproizvoda se uglavnom provodi mehaničkim vezama, lijepljenjem i lemljenjem. Kod ultračvrstih kompozita izrađuje se cijeli konstruktivni dio odjednom da se izbjegne spajanje sklopova.



*Slika 9.4. Beton – smjesa cementa i šljunka*



*Slika 9.5. Dijagram  $\sigma - \varepsilon$  za kompozitni materijal s čvrstim vlaknima u mekoj matrici*

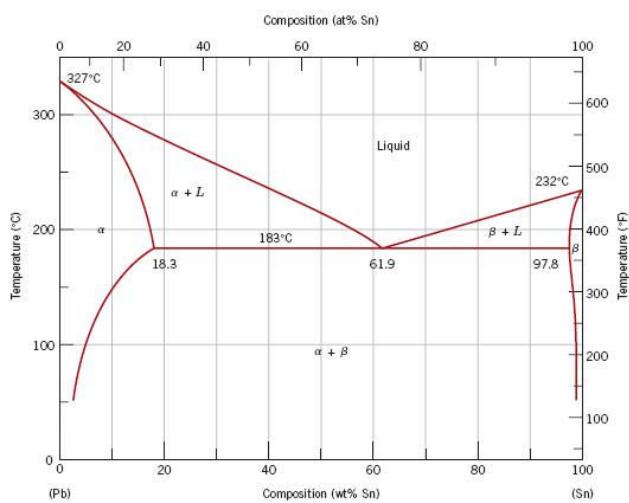
## 10 Lemovi

Lemovi su grupa legura koji služe spajanju metala, keramike i stakla lemljenjem. Obično su eutektičkog sastava za niže temperature lemljenja, ali se kao lemovi mogu koristiti i čisti metali. Osnovna odlika lema je da treba imati nižu temperaturu taljenja od metala koji se lemi. Vezivanje lema odvija se difuzijom s lemljenim metalom. Lemu se dodaju i primjese radi snižavanja površinske napetosti taline jer treba dobro vlažiti lemljene površine i popunjavati kapilare u spoju.

Osim za spajanje, lemovi se mogu koristiti i za nanošenje tvrdih slojeva na površine izložene velikom trošenju. U mekoj matrici lema usađene su tvrde čestice odgovarajuće granulacije. Izbor lema provodi se prema metalu kojeg se lemi i prema maksimalnoj temperaturi koju se kod lemljenja smije postići da ne dođe oštećenja ili deformiranja lemljenih dijelova.

Dvije su osnovne skupine lemova - meki i tvrdi. Meki lemovi imaju nisku čvrstoću i temperaturu taljenja, a tvrdi imaju više temperature taljenja i čvrstoću. Granična temperatura između mekog i tvrdog lema je oko  $400^{\circ}\text{C}$ , naravno uvjetna.

Meki lemovi su najčešće legure olova i kositra s različitim dodacima radi snižavanja temperature tališta (*slika 10.1.*). Lemiti se može i čistim kositrom, ali je jeftinije dodavati olovu. Lemovi s kadmijem su otrovni, ali imaju nisku temperaturu taljenja. Ovim lemovima dobro se lemi ugljični čelik, bakar i legure bakra.



*Slika 10.1. Dijagram slijevanja Sn-Pb*

Aluminij se meko lemi legurom kositra i cinka, uz organsku kiselinu za rastvaranje aluminijevog oksida na površini.

Tvrdo se lemi najčešće mjedenim lemom. Sniženje tališta i povećanje čvrstoće postiže se dodavanjem srebra mjeđi, pa se takav lem naziva srebrni lem. Čvrstoća lema je dosta visoka.

Ovim lemovima se lemi ugljični čelik, bakar i legure bakra. Visokolegirani čelici se leme srebrnim lemom.

Aluminijске legure se tvrdo leme eutektičkom legurom Al-Si, koja ima malu razliku temperature taljenja u odnosu na temperaturu taljenja aluminijskih legura, tako da je potrebna dobra regulacija temperature lemljenja da se ne rastali lemljeni metal. Lemovi za visoke temperature su na bazi zlata, platine, paladija i nikla. Odlikuju se velikom otpornošću na oksidaciju na visokim temperaturama. Lemovi plemenitih metala su vrlo skupi, ali se troše u malim količinama, jer su zračnosti spoja, a time i debljina lema vrlo male, oko 0.1 mm.

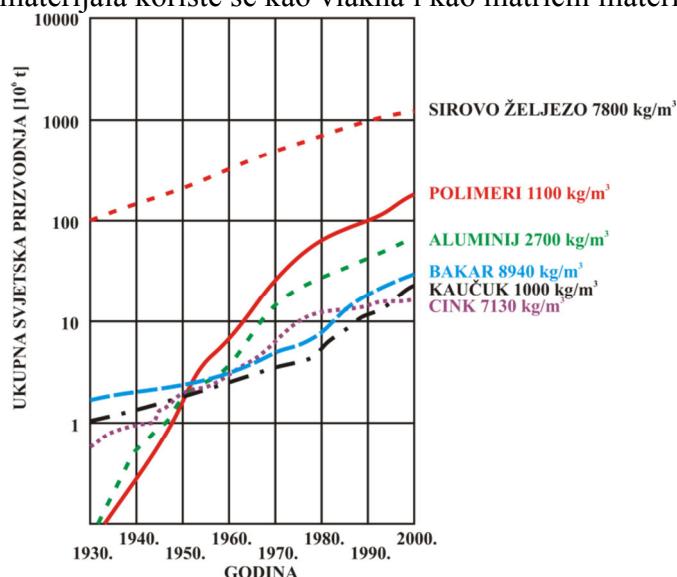
Lemljenje se u pravilu provodi uz dodatak talila, sredstva koje tali površinske okside i time omogućava vlaženje metalno čistih površina i smanjuje površinsku napetost lema, što omogućava bolje popunjavanje spoja. Talila u vlažnoj sredini mogu biti agresivna, pa ih treba isprati nakon lemljenja.

Kao lemovi se koriste i amorfni metali s rastvorenim komponentama koje inače segregiraju prilikom kristalizacije. Amorfno skrućivanje nastaje ekstremno brzim hlađenjem naštrcavanjem taline na rotirajući hladni disk. Dobivaju se tanke folije, jer za veće debljine brzina hlađenja u jezgri je premala. Inače, brzine hlađenja prelaze  $10^6$  °C/s za izostanak kristalizacije. Lemovi se često kombiniraju zajedno s talilom, bilo da se oblaže ili da se puni žice i šipke lema. Lem se može pripremati i u obliku paste s izmiješanim metalnim prahom i talilom.

Čvrstoća mekog lema iznosi nekoliko desetaka MPa, dok tvrdi lemovi postižu čvrstoće od nekoliko stotina MPa. Lemljeni spoj se u pravilu opterećuje na smicanje, jer je vezivanje ploha difuzijsko. Postoji obostrana difuzija elemenata iz lema i osnovnog materijala.

## 11 Polimeri

Kao što smo u uvodu vidjeli, polimerni materijali kao organske materije koristili su se u konstrukcijama još u prapovijesti i prije metala. U današnje vrijeme, polimeri se opet sve više koriste kao konstrukcijski materijali. Riječ polimer u osnovi je sastavljena od grčkih riječi: *Poli* (mnogo) + *meros*(dio) = polimer → «od mnogo dijelova». Polimeri obuhvaćaju vrlo široku skupinu materijala kao što su plastike, gume i ljepila. Sastoje se od puno malih molekula vezanih u dugačke lance (makromolekule). U jednoj fazi prerade polimeri su plastični i mogu se oblikovati, a po završetku prerade su kruti. Iz polimera se izrađuju konstrukcijski dijelovi, automobiličke gume, ljepila, igračke, ambalaža. Kod kompozitnih materijala koriste se kao vlakna i kao matrični materijali.

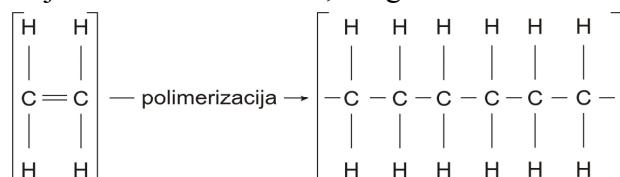


Ukupna svjetska proizvodnja materijala

### 11.1 Građa polimera

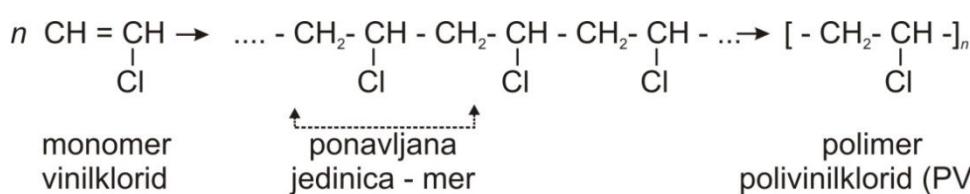
Proizvodnja organskih sintetičkih polimera razvija se početkom XX. Stoljeća, kada je od reakcije acetilena i vodika dobivena je molekula etilena  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Procesom polimerizacije kemijskom reakcijom otvore se dvostruke veze između atoma C čime se dobiva makromolekula polietilen (PE), prema *slici 11.1*.

Osim polietilena koji uključuje samo atome C i H, mogu se ostvariti i druge sinteze, npr. s



Slika 11.1. a) Molekula etilena b) Struktorna formula polietilena (PE)

atomima Cl, F, S, N čime se može ostvariti veći broj polimera različitih svojstava. Tako monomer vinil klorida ostvaruje polimer polivinilklorid (PVC) prema *slici 11.2*.

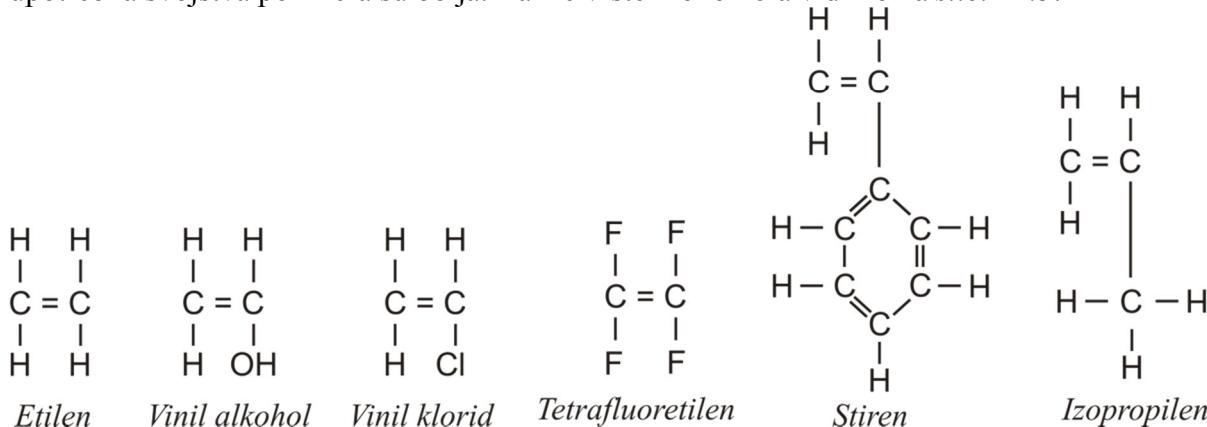


Slika 11.2. a) Molekula vinilklorida b) Struktorna formula polivinilklorida (PVC)

$n$  = broj istovrsnih molekula ili makromolekula

Dakle, polimerne molekule sintetiziraju se od odgovarajućih monomera u procesu koji se naziva polimerizacija: monomeri (jednostavniji niskomolekulni spojevi, najčešće nezasićeni) se vezuju u polimernu molekulu kao složeniju strukturu. Veličina  $n$  = stupanj polimerizacije predstavlja broj mera u polimernoj molekuli.

Stupanj polimerizacije  $n$  ima veliki utjecaj na svojstva nastalih polimera: što je  $n$  veći upotrebljiva svojstva polimera su bolja. Razne vrste monomera vidimo na *slici 11.3.*

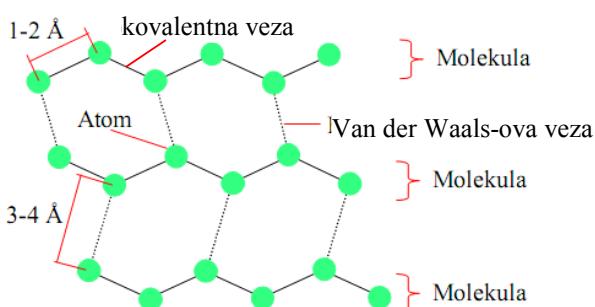


Slika 11.3. Razne vrste monomera

## 11.2 Veze u molekularnom lancu

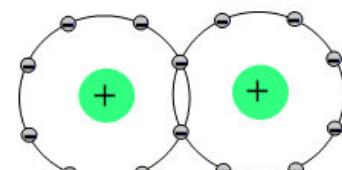
Molekule polimernih materijala (monomeri) međusobno se povezuju stvarajući dugačke lance. Ako su svi monomeri istog tipa, dobivamo *homopolimere*, a ako u lancu imamo dvije ili više vrsta monomera dobijemo *kopolimere*. Unutar lanaca polimeri su povezani snažnim kovalentnim vezama (*slika 11.4.*) Atome se međusobno mogu vezati sa jednim ili više elektronskih parova pa tako razlikujemo:

- jednostavnu kovalentnu vezu, npr.  $\text{C}-\text{C}$ ;
- dvostruku kovalentnu vezu, npr.  $\text{C}=\text{C}$ ;
- trostruku kovalentnu vezu, npr.  $\text{C}\equiv\text{C}$ .



Slika 11.5. Kovalentne i Van der Waals-ove veze

povezuju dipole su slabe i polimer se lako može deformirati pri umjereno visokim temperaturama: diplone (sekundarne) veze postupno oslabe, a primarne kovalentne veze još ostanu čvrste.



Slika 11.4. Kovalentna veza

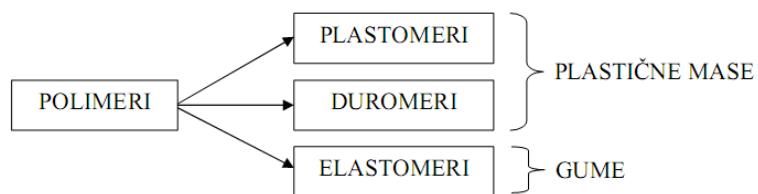
Veze između atoma u jednoj molekuli su primarne veze i nazivaju se *kovalentne*. Molekule se međusobno povezuju slabim sekundarnim *Van Der Waalsovim* vezama. Ove su veze ostvarene električnim dipolima različitih naboja susjednih molekula (vidi *sliku 11.5.*). Razmak između centara atoma kod glavnih kovalentnih veza je 1-2 Å, a kod sekundarnih veza 3-4 Å.

Glavne Van der Waalsove sile koje

## 11.3 Vrste polimera

Zavisno o prirodi veze među makromolekularnim lancima (sekundarne veze) i njihovoj učestalosti mogu se dobiti tri osnovne skupine polimera, prema *slici 11.6.*

Ako među susjednim lancima polimera nema jakih poprečnih kovalentnih veza, onda se poprečne veze ostvare samo slabim dipolnim Van der Waalsovim silama.



*Slika 11.6. Osnovna podjela polimera*

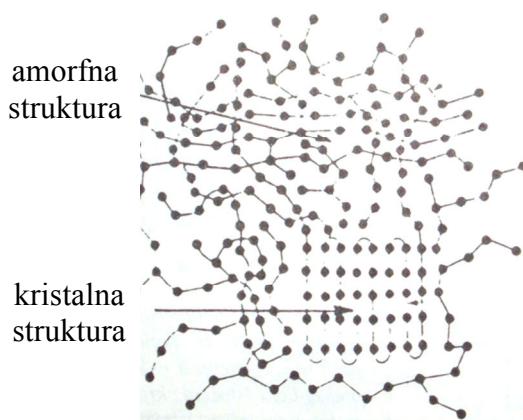
**Kopolimeri** su polimeri koji u svojim lancima sadrže više vrsta monomera.

### 11.3.1 TERMOPLASTI (PLASTOMERI)

Sekundarne veze između vrlo dugih lanaca ili dijelova lanaca su slabe Van der Waals-ove veze → TERMOPLASTI (plastomeri). Vidi *sliku 11.7.* Struktura im je amorfna ili djelomično kristalična (*slika 11.8.*). Kristali/ličnost se može u polimerima ostvariti utjecajem na sintezu ili deformacijom za vrijeme prerade. U takvom polimeru imamo dvije faze: kristalnu i amorfnu. Količina kristalne faze može se kontrolirati procesom hlađenja i može se postići maksimalno 95% volumena kod polietilena (PE), a vrlo malo kod amorfnih polimera. Na ovaj se način mogu podešiti tražena svojstva.



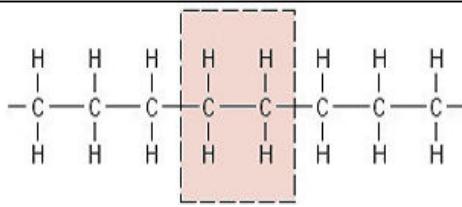
*Slika 11.7. Struktura termoplasta*



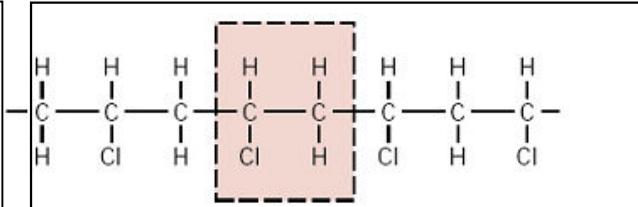
*Slika 11.8. Amorfno i kristalično područje u polimeru*

Vrlo čvrste primarne veze unutar svakog molekularnog lanca su kovalentne. Sekundarne veze između lanaca i dijelova lanaca koji se preklapaju ostvarene su slabim Van der Waalsovim

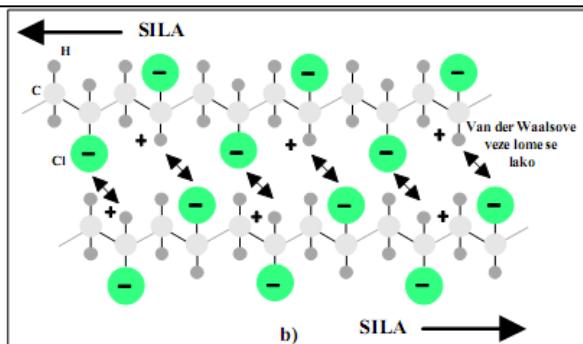
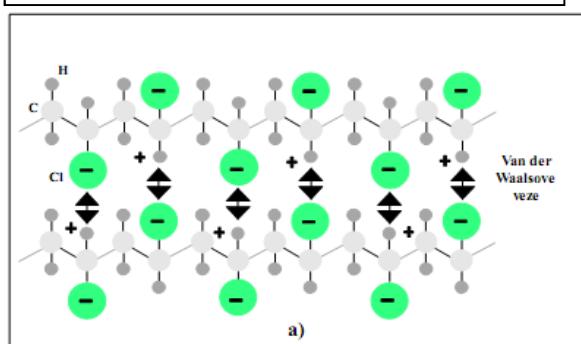
vezama. Spominjana svojstva zavise od stupnja kristaličnosti → povećava se tvrdoća i gustoća, a opadaju rastezljivost i otpornost na toplinu (tzv. gumaste karakteristike). U ovu skupinu spadaju: PE = polietilen i PVC = polivinilklorid, koji su djelomično kristalični.



*Slika 11.9. Polietilen PE*



*Slika 11.10. Polivinilklorid PVC*

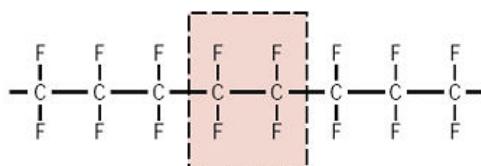


*Slika 11.11. Kod PVC klorovi atomi imaju negativan, a vodikovi pozitivan naboј. Lanci su međusobno povezani slabim Van der Waalsovim vezama (a) koje se lako kidaju pod djelovanjem sile (b)*

PTFE = politetrafluoretilen, tvornički nazvan TEFLON je polimer u koji je dobiven tako da je fluor (F) zamjenio vodik (H) u polietilenu (PE). Potpuno je kristaličan i ne dade se lako termoplastički prerađivati. Talište mu je približno 327°C, a termičko razlaganje na cca 400°C. Optimalna temperatura za oblikovanje je 350 - 380°C.

Bržim hlađenjem može se ostvariti i djelomično kristalično stanje, tj. manji modul elastičnosti i veća rastezljivost u odnosu na potpuno kristalično stanje. Najznačajnije svojstvo ovog materijala je njegova vrlo dobra temperaturna postojanost (izdržljivost) na temelju čvršće veze u molekuli (veliki F atomi su jače polarizirani negoli H atomi u polietilenu). Stoga se može upotrebljavati na relativno višim temperaturama. Zbog vrlo niskog koeficijenta trenja upotrebljava se za oblaganje kliznih ležaja.

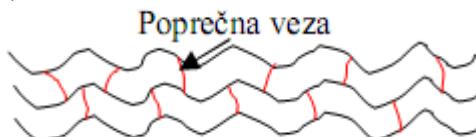
ARAMID = rastvoreni aromatski amid (organski spoj nastao zamjenom H atoma u amonijaku NH<sub>3</sub> ugljikovodikovim radikalima). Proizvodi se rastvaranjem u sumpornoj kiselini pod tvorničkim nazivom KEVLAR. To je polimer izrazito visoke čvrstoće i modula elastičnosti i najprije se koristi u obliku niti za očvršćivanje kompozita. Naročita mu je prednost otpornost na udarce i sposobnost apsorbiranja energije. Stoga se upotrebljava za izradu zaštitne opreme od udarca, od metka te za izradu dinamički napregnutih proizvoda (npr. karoserije specijalnih automobila). Ponašanje aramidnog vlakna u matici kod kompozitnih materijala analogno je čeličnom užetu. Temperatura raspadanja iznosi 420°C, vlakna su otporna plamenu (sama od sebe se ugase) i mnogim kemikalijama. Cijena mu je visoka.



*Slika 11.12. Politetrafluoretlen  
PTFE - Teflon*

### 11.3.2 DUROPLASTI (DUROMERI, TERMOSTABILI)

Umreženi polimeri imaju prostorne veze među makromolekulama ostvarene kovalentnim vezama u sve tri dimenzije, koje su općenito ostvarene na velikom broju mesta. To daje materijalu opet izrazito veću tvrdoću, čvrstoću, krhkost i veću dimenzionalnu stabilnost → DUROPLASTI (termostabili). Vidi sliku 11.13.



Slika 11.13. Poprečne veze kod duroplasta

Dugi se molekularni lanci kod duroplasta još više međusobno povezuju, tj. umrežavaju jakim kovalentnim vezama i ionskim vezama → nastaje divovska molekula. Za vrijeme polimerizacije umrežavanje završava i oblik se više ne može mijenjati (osim odvajanjem čestica). Stoga se oblikuju lijevanjem u neumreženom stanju, a proces polimerizacije odvija se u prvoj fazi proizvodnje oblikovanjem dugih lančanih makromolekula koje se završno križno povezuju u konačno oblikovanom proizvodu pomoću topline i pritiska (tlačni lijev). Osim za lijevanje predmeta, mogu se koristiti i kao matica u kompozitima ojačanim sa staklenim ili tekstilnim vlaknima. U ovu skupinu spadaju:

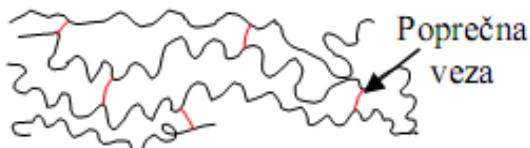
*Alkidi* s dobrim elektro-izolacijskim svojstvima.

*Epoksiđi* isporučeni kao smola otvrđuju adicijskom reakcijom na sobnoj ili povišenoj temperaturi zavisno o aditivima i njihovoj količini. Zbog malog stezanja pri otvrđivanju dobro prijanjaju uz metal i silikatno staklo. Uz anorganska punila (npr. kaolin, kvarcno brašno, grafit) epoksidnom smolom može se dobiti kompozit većeg modula elastičnosti u odnosu na čistu smolu. Uz dobra mehanička svojstva (i na povišenoj temperaturi) otporni su na kemikalije, a dobra su im i elektro-izolacijska svojstva. Dimenzionalno su stabilni.

*Poliesteri, poliamidi i silikoni* imaju slična mehanička, fizikalna i elektro-izolacijska svojstva kao i prednji. Poliesteri se naročito puno koriste kao matica kompozita pojačanih nitima (npr. staklena vuna + poliesterska smola = stakloplastika za proizvodnju plastičnih brodova, autodijelova i sl.). Poliamidi imaju niski koeficijent trenja  $\mu$  i veliku otpornost prema trošenju. Silikoni se lako elastično deformiraju. Neki polimeri iz skupine duroplasta se dadu i plastično deformirati, ali pri znatno višoj temperaturi i pritiscima negoli je to uobičajeno kod termoplasta.

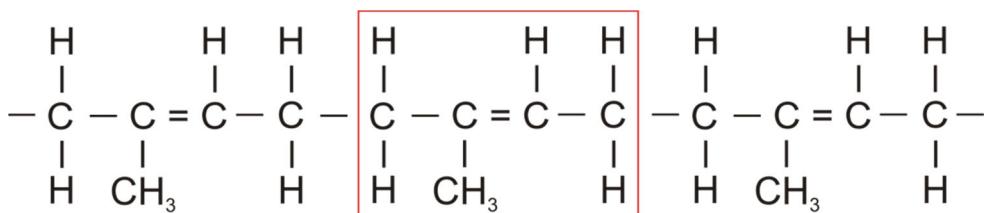
### 11.3.3 ELASTOMERI (GUME)

Poprečno povezani polimeri imaju susjedne lance povezane kovalentnim vezama prema slici 11.8. Ako je ova veza ostvarena na manjem broju mesta, radi se o materijalima izrazitim elastičnim karakteristikama → ELASTOMERI (gume). Brojnije poprečne veze povisuju znatno tvrdoću, čvrstoću, krhkost i dimenzionalnu stabilnost.



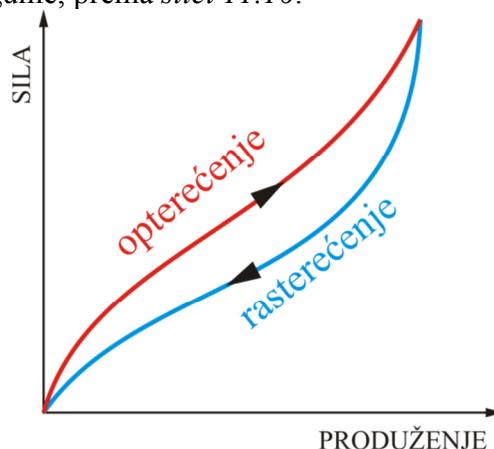
Slika 11.14. Poprečne veze kod elastomera

Struktura im je vrlo slična strukturi duroplasta: umreženost je kod elastomera manja, ali su molekularni lanci jako nesređeni (sklupčani). Za kidanje ovih labavih molekularnih struktura potrebne su manje sile, pa je omogućeno i ispravljanje, tj. sređivanje molekula. Međutim, pri rasterećenju ponovno se uspostavlja izvorno nesređeno stanje. Ovo gumasto-elastično ponašanje pri niskom modulu elastičnosti kod elastomera se zbiva u daleko širem temperaturnom intervalu negoli kod drugih umjetnih materijala. U gumarskoj industriji proces vulkanizacije (koji je dobio ime po rimskom bogu vatre Vulkanu) predstavlja kemijsko umrežavanje polimera, tj. stvaranje poprečnih veza između molekularnih lanaca i to pomoću sumpora na mjestu gdje su prethodno bile duple veze. Proces se vulkanizacije odvija pod tlakom na temperaturi od  $150^{\circ}\text{C}$ , tako da se gumeni proizvodi istodobno oblikuju u pogodnim kalupima (npr. proizvodnja automobilskih guma). Za vrijeme vulkanizacije sumpor reagira s lancima molekula i na pojedinim mjestima ih spaja s poprečnim vezama ili sumpornim mostovima. Kod tvrde gume (npr. ebonit) sve duple veze postanu zasićene, dok je meka guma slabije vulkanizirana, tj. ostvarila je tu vezu preko sumpora na svakih nekoliko tisuća mera. Neumreženi elastomer naziva se sirovi kaučuk ili lateks. To je zapravo sok tropskog drveta kaučukovca. Struktura važnog sastojka prirodnog kaučuka prikazana je na *slici 11.15.*



*Slika 11.15. Molekularna struktura prirodne gume (kaučuka)*

U tehnologiji gumarstva za proizvodnju crnih guma kao punilo upotrebljava se hrđa, a za bijele gume SiO radi pojačavanja gume, a dodaju se prije vulkaniziranja. Svojstva malog modula elastičnosti i velike sposobnosti prigušivanja vibracija omogućuju široku primjenu gume. Sposobnost prigušenja vibracija proizlazi iz histereze što se dobiva prigodom opterećenja i rasterećenja gume, prema *slici 11.16.*



*Slika 11.16. Tipična krivulja promjene produženja i skraćenja u zavisnosti o sili za gumu*

Histereza pokazuje sposobnost gume da rasipa energiju, što se pretvara u toplinu. Za automobiličke gume koristi se guma kao matica kompozita s pridodanim metalnim i tekstilnim nitima.

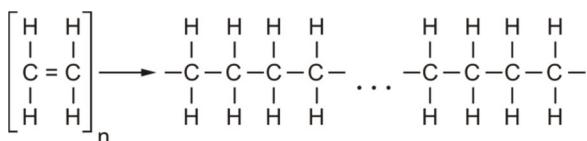
#### 11.3.4 POSTUPCI IZRADE PROIZVODA OD POLIMERA

Osnovica proizvodnje polimernih materijala je u sintezi makromolekula koja se provodi slijedećim postupcima:

- poliadicija
- polikondenzacija
- kopolimerizacija.

##### **Poliadicija**

Adicijska polimerizacija je kemijski proces spajanja velikog broja istovrsnih nezasićenih molekula (monomera) kovalentnim vezama u velike makromolekule uz djelovanje topline, pritiska i katalizatora. Polimerizacija počinje nastanjem kovalentnih veza među monomerima stvarajući dugačke lanci. Ovim reakcijom ne nastaju sekundarni produkti reakcije. Ako se reakcija prekine ne može se nastaviti. Ovim postupkom se proizvodi npr. polietilen.



*Slika 11.17. Polimerizacija polietilena*

Poliadicija općenito:  $nA \rightarrow A - A - A - A - \dots - A - A$ .

##### **Polikondenzacija**

Polikondenzacija je postupak spajanja najmanje dviju različitih molekula (monomera) u polimerni lanac uz dodatno nastajanje sekundarnih jednostavnih spojeva (voda, alkohol i sl.). Reakcija je spora i odvija se stupnjevito. Može se prekidati i nastavljati. Ovim postupkom se izrađuju termoplasti, na primjer poliamid i duroplasti, na primjer aminoplasti i fenoplasti.

Polikondenzacija općenito:  $nA + nB \rightarrow A - B - A - B - A \dots - B + H_2O$ .

##### **Kopolimerizacija**

To je kemijski proces adicijske polimerizacije, u kojem se veliki broj dvije ili više vrsta molekula (monomera) povezuje u polimer bez stvaranja novih materijala. Nema nastajanja sekundarnih spojeva. Ova se reakcija može odvijati samo kod monomera koji sadržavaju nezasićene veze, kao što su to na primjer dvostrukе veze. Polimerne molekule imaju isti sastav kao male molekule (monomeri). S tom razlikom da se značajno povećava dužina lanca i masa molekule. Primjer je poliadicija poliuretana.

Kopolimerizacija općenito:  $nA + nB \rightarrow A - B - A - B - A \dots - B$ .

Proizvodni postupci za plastomere su:

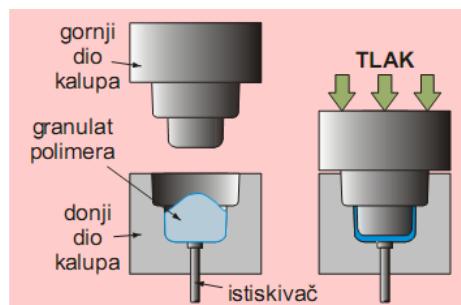
- injekcijsko prešanje
- puhanje
- rotacijsko lijevanje
- toplo oblikovanje
- ekstrudiranje.

Proizvodni postupci za duromere su:

- injekcijsko prešanje
- prešanje
- rotacijsko lijevanje.

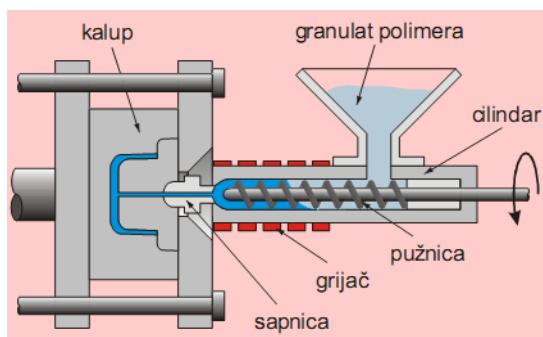
## Postupak proizvodnje prešanjem

Na slici 11.18. pokazan je postupak proizvodnje prešanjem koji se većinom koristi kod duroplasta. Određena količina granulata polimera ubacuje se u zagrijani donji dio kalupa. Nakon toga, gornji dio kalupa djeluje određenim pritiskom na granulat do ispunjavanja šupljina kalupa polimerom. Po završenom procesu istiskivač izbacuje gotov proizvod iz kalupa.



Slika 11.18. Prešanje

## Postupak proizvodnje injekcijskim prešanjem



Slika 11.19. Injekcijsko prešanje

Postupak proizvodnje injekcijskim prešanjem pokazan je na slici 11.19. Postupak se koristi za proizvodnju duromera i plastomera. Granulat se nasipa u lijevak, odakle se uvodi u cilindar i pužnicom potiskuje u dio cilindra s grijaćima gdje se granulat tali. Nadalje, pužnica injektira rastaljeni polimer u hladni kalup gdje se polimer skruti. Nakon toga, kalup se otvara a proizvod se istiskivačem izbacuje van. Kako se radi o skupoj opremi postupak se koristi za proizvodnju većih serija.

Na slici 11.20. dan je pregled najčešće korištenih polimera s njihovim oznakama.

Oznaka	Naziv na hrvatskom	Vrsta <sup>1</sup>	Oznaka	Naziv na hrvatskom	Vrsta <sup>1</sup>
ABS	akrilnitril/butadien/stiren	P, K	PIB	poliizobutilen	P
BR	butadienski kaučuk	E	PMMA	poli(metil-metakrilat) (plexiglas)	P
CA	celulozni acetat	P	POM	poli(oksimetilen)	P
CN	celulozni nitrat (celuloid)	P	PP	polipropilen	P
CR	polikloroprenski kaučuk	E	PPO	poli(fenilen oksid)	P
EP	epoksidna smola	D	PPS	poli(fenil-sulfid)	P
NBR	akrilonitril/butadien kaučuk	E, K	PS	polistiren (polistirol)	P
NR	prirodni kaučuk	E	PSU	polisulfon	P
PA	poliamid (najlon)	P	PTFE	poli(tetrafluor-etenilen) (teflon)	P
PBT	poli(butilen-tereftalat)	P	PUR	poliuretan (lineami)	EP
PC	polikarbonat	P	PVC	poli(vinil-klorid)	P
PE	polietilen	P	PVDF	poli(viniliden-fluorid)	P
PEEK	poli(eter-eter-keton)	P	SAN	poli(stiren/akrilonitril)	P, K
PET	poli(etilen-tereftalat)	P	SBR	stiren-butadien kaučuk	E, K
PF	fenol-formaldehidna smola (bakelit)	D	TPUR	poliuretan (elastoplastomeri)	EP
PI	poliimid	P	UP	nezasićena poliesterska smola	D

\*P – plastomer, D – duromer, E – elastomer, EP – elastoplastomer, K – kopolimer

Slika 11.20. Najčešće korišteni polimeri

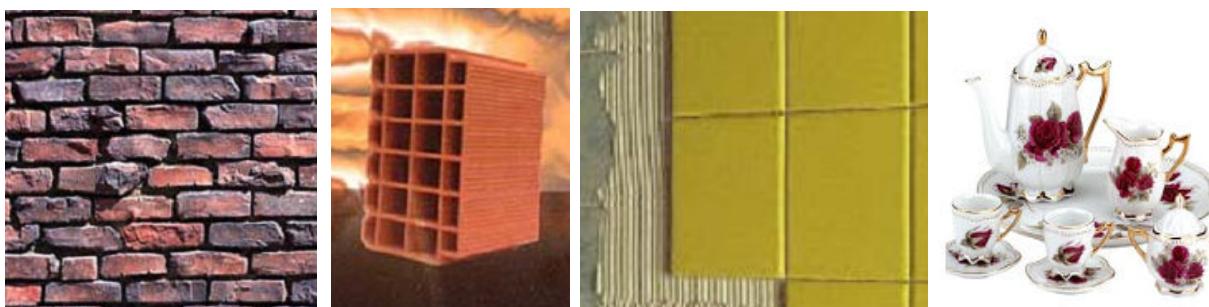
## 12 Keramike

Keramički materijali dobili su naziv od grčkih riječi: *keramos* = lončarska glina, odnosno: *keramikos* = proizvod od gline. To su nemetalni anorganski materijali.

Prema namjeni, keramičke proizvode možemo svrstati u dvije osnovne skupine:

- tradicionalna (obična)
- industrijska (tehnička, fina, visokoučinkovita) keramika.

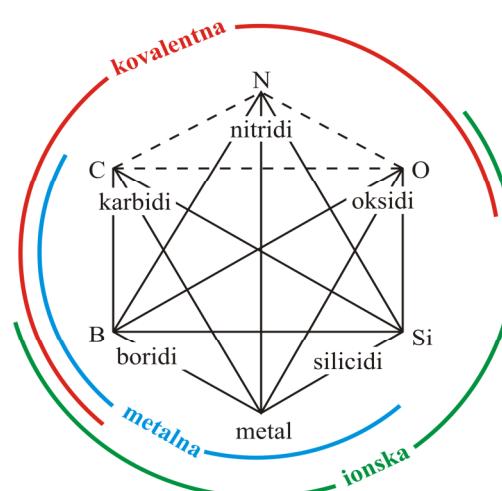
U tradicionalnu keramiku ubrajamo kamen, proizvode od gline (lonci, posuđe...), konstrukcijske poluproizvode koji se koriste u građevinarstvu (opeke, crijepljeni beton...), stakla (boce, laboratorijska oprema...), vatrootporni proizvodi (kuhinjsko posuđe, opeke u pećima...) i bijelu keramiku (sanitarije, emajl...).



Slika 12.1. Tradicionalna keramika

U industrijsku se keramiku prema porijeklu ubrajaju:

- **monokomponentna keramika** (npr. razni poluvodiči, razne vrste grafita i dijamant);
- **neoksidna keramika** (npr. karbidi: WC, TiC, SiC; nitridi:  $\text{Si}_3\text{N}_4$  keramika, CBN = kubični bor nitrid po tvrdoći odmah iza dijamanta, TiN = titan nitrid - prevlaka na reznim oštricama, AlN = aluminijev nitrid - materijal lonaca za lijevanje aluminija i mnogih drugih legura);
- **kristalična oksidna keramika** (npr.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - korund koji se može poboljšati eventualnim dodacima drugih keramika - ima široku primjenu: površine elemenata strojeva podložne trošenju, ortopedski ulošci, lonci u metalurgiji, rezne oštice za obradu odvajanjem čestica;  $\text{ZrO}_2$  = cirkonijev oksid - zbog dobre žilavosti, otpornosti spram temperaturnim šokovima, trošenju, koroziji, uz slabu toplinsku vodljivost i mali koeficijent trenja ima široku primjenu u toplinskim strojevima za cilindarske košuljice, sjedišta ventila, itd.);
- **anorganska nemetalna stakla** (npr. E staklo - elektrotehničko staklo; R staklo = otporno - Resistance; S staklo = visoko čvrsto - Strength; C staklo = otporno na kemikalije - Chemistry).



Slika 12.2. Osnovne skupine keramičkih materijala i njihove kombinacije (crtama su prikazane ostvarive veze u osnovnim skupinama keramike)

Osnovna svojstva keramičkih materijala su:

- kristalna ili amorfna struktura;
- tvrd (2000-8000HV), krhak i nedeformabilan materijal;
- dobri električni izolatori;
- dobri izolatori topline;
- visoka temperatura tališta ( $1930^{\circ}$ - $3870^{\circ}\text{C}$ );
- vatrootporni;
- otporni na kemikalije;
- neke keramike su prozirne.

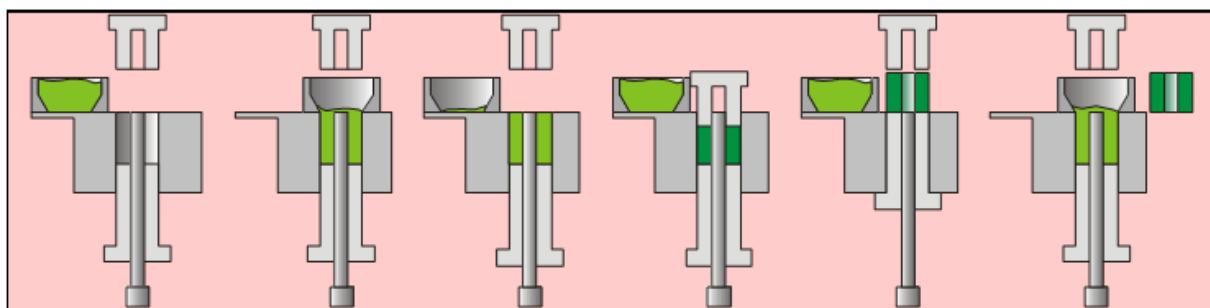
Vrlo velika tvrdoća (2000 - 8000 HV) daje veliku otpornost trošenju elemenata od keramike. Pri izradi tradicionalnih keramičkih proizvoda u građevinarstvu i sanitarijama mogu se koristiti jeftinije prirodne sirovine. To isto vrijedi i za proizvode velikih dimenzija, kao što su npr. visokonaponski izolatori i kade za kupanje.

Međutim, pri korištenju tehničkih keramika, pogotovo onih visokog učinka, u obzir dolaze sintetički proizvedeni skupi osnovni materijali. Zato se korištenje ovih keramika reducira na upotrebu samo za one elemente čije eksploracijske zahtjeve može zadovoljiti jedino keramika.

Pri ugradnji konstrukcijskih keramičkih komponenata, posebnu pažnju treba posvetiti konstrukcijskom rješenju spoja tog elementa s nekeramičkim materijalima. Također treba imati na umu da je keramika sklona krtom lomu i nema sposobnost plastične deformacije niti puzanja do vrlo visokih temperatura. Tako je čvrstoća keramike na temperaturama iznad  $1000^{\circ}\text{C}$  veća negoli kod superlegura.

Za konstruktivne elemente podvrgnute visokim radnim temperaturama i naprezanjima koriste se vrlo fino usitnjeni praškovi koji se prešaju na visokim temperaturama sraštanja. Osnovna sirovinu za proizvodnju tehničkih keramika je prah. Keramički proizvodi se od praha izrađuju u četiri koraka:

1. priprava sirovine za oblikovanje
2. oblikovanje poluproizvoda u kalupu
3. pečenje/sinteriranje
4. završna obrada.



**Slika 12.3. Principijelna shema proizvodnje keramičkih proizvoda**

Keramički se proizvodi u pravilu izrađuju kao jednodijelni zbog problematičnog sklapanja višedijelnih.

Primjena visokotemperaturnih keramika u motorima s unutarnjim izgaranjem i plinskim turbinama omogućava povišenje radne temperature, a tako i stupnja djelovanja motora, što utječe na smanjenje potrošnje goriva i bolje izgaranje smjese goriva i zraka. Opisane keramike su za 30-40% lakše od legura nikla otpornih na visoke temperature.



*Slika 12.4. Keramički proizvodi koje susrećemo u svakodnevnoj upotrebi*

# 13 DRVO

## 13.1 Uvod

U Hrvatskoj je drvna industrija imala veliku važnost. Danas u ovoj industriji nije nimalo zavidna situacija, jer je prepuštena stihiji i teško da se takvo stanje može popraviti bez sustavnog pristupa, kako modernizaciji pogona i školovanju kadrova tako i obnovi šumskog fonda.

Računa se da je u Hrvatskoj šumama pokriveno cca 2,5 mil. ha ( $1 \text{ ha} = 10000 \text{ m}^2$ ), od čega su cca 75% čiste lišćare (bukva, hrast, jasen, breza itd.), a 15% čiste četinjare (jela, smreka, bor, ariš, omorika itd.). Ostalo su mješovite šume.

Vidi se da ima znatno više lišćara nego četinjara. Zato se već pri projektiranju tvornica to uzima u obzir.

- Četinjare su danas potrebne za izradu raznih ploča, drvne i krovne konstrukcije u građevinarstvu.
- Lišćare su dobre za pokućstvo; teške su i nisu podesne za krovove i sl.

Brodogradnja za određene dijelove (npr. vanjsku oplatu), može koristiti samo četinjare, a za unutarnje uređaje uzima lišćare.

Ako se promatra u  $\text{m}^3$ , onda je u Hrvatskoj sljedeća situacija:

	Naziv	Zapremina [ $\text{m}^3$ ]
1.	Bukva	102.000.000
2.	Hrast kitnjak	27.000.000
3.	Hrast lužnjak	43.500.000
4.	Grab	21.000.000
5.	Smreka i jela	5.500.000
6.	Crni bor	2.700.000

navedeni kubici su u vidu golog stabla, a ne daske, a tu su uračunani i deblo i krošnja. Deblo je dakako najvrjednije, a grane krošnje služe za ogrjev ili za dobivanje celuloze.

Važno je znati i starost stabla. Npr.  $1 \text{ m}^3$  bukovine star 80 god. puno je vrjedniji od npr. 20 godišnjeg.

Kod mlađeg stabla je deblo malog promjera i nije baš korisno. Prava zrelost za sjeću nije ispod 80 godina. Pred 70-ak godina u naše pilane nisu dolazile bukve ispod promjera  $\varnothing 50 \text{ cm}$ . Danas to iznosi ispod  $\varnothing 40 \text{ cm}$ . Znači iskorištenje je slabije i sijeku se razmjerno mlada stabla. Međutim ni stare šume nisu dobre, npr. iznad cca 100 god. starosti. To stablo iznutra propadne i samo se određeni postotak može iskoristiti. Kod nas danas nema baš tako velikih «staraca».

Da bi šuma bila uravnotežena, treba znati koliki je i prirast drvnog materijala u šumi. Stoga treba nastojati očuvati taj šumski fond.

Drvo u prirodi predstavlja veliku jedinicu: u biljnom je carstvu to najveća jedinica. Kao što su u životinjskom carstvu izumrli dinosauri, tako će i u biljnom carstvu ovih velikih jedinki biti sve manje.

U Europi je u srednjem vijeku bilo mnogo prašuma, sa cca 60 mil. stanovnika. Broj stanovnika je rastao, a šumski fond se smanjivao. Od ukupno godišnje isječene drvne mase kod nas, može se reći da se samo 2/3 iskoriste, a 1/3 se odbaci pri piljenju i sl.

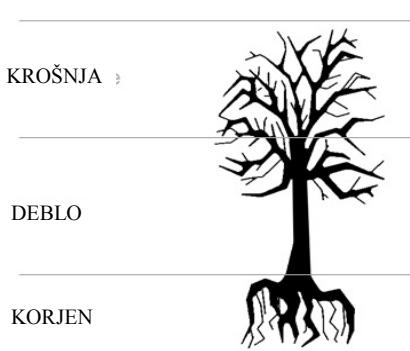
U pilanama se postigne 50-55% kubika daske od 100% kubika trupaca. Jedan je razlog i konični oblik trupca od korijena prema vrhu. Zato dolazi do velikog otpada koji se doduše može još iskoristiti, bilo za celulozu ili za loženje.

Drvo u svom živom stanju ima priličan postotak vode, a pri sušenju se volumen smanjuje. Zato od ukupne zapremine žive drvne mase, ne možemo nikad dobiti istu toliku zapreminu suhog drva.

Pila također sama stvara otpad u vidu drvne čestice, koji se danas koristi za prešanje (npr. za proizvodnju iverica).

## 13.2 Drvo kao sirovina

### 13.2.1 Obilježja drvne materije



Prema *slici 13.1.* stablo se sastoji od tri osnovna dijela.

- Najvrjednije je deblo.

- Korijen služi za upijanje sokova koje šalje u «kemijsku tvornicu», tj. preko krošnje u lišće, koje prerađuje sokove i vraća hranjive produkte u stablo te služe za rast stabla.

- Putovanje upijenih sokova izvodi se preko «najmladeg» dijela stabla, tj. preko sloja neposredno ispod same kore. To je jedan sasvim uski pojas.

**Slika 13.1 Prikaz stabla**

- Koncentrični krugovi oko centra (*slika 13.2*) su tzv. godovi. Oni daju radikalni prirast stabla u jednoj vegetacijskoj godini, koja je kod nas jednaka kalendarskoj godini.  
U toplijim krajevima postoje često dvije vegetacijske godine u jednoj kalendarskoj; to su tzv. proljetna i jesenska vegetacijska godina.
- Kod nas je taj prirast po nekoliko milimetara, što ovisi o klimi u dotičnoj godini.
- U sjevernim krajevima (npr. u Norveškoj), taj je prirast bitno manji, jer su slabiji uvjeti rasta. Vegetacijska godina tamo traje svega nekoliko mjeseci. Stoga tamo i stablo malog promjera može imati veliku starost. Međutim ovo utječe na mehanička svojstva dotičnog drva: što su godovi sitniji i mnogobrojniji, daju bolju ispunjenost i homogeniju strukturu, a time i bolja mehanička svojstva. Tako npr. naš bor ili smreka ima vlačnu čvrstoću cca 100 N/mm<sup>2</sup>, a u skandinaviji cca 150 N/mm<sup>2</sup>



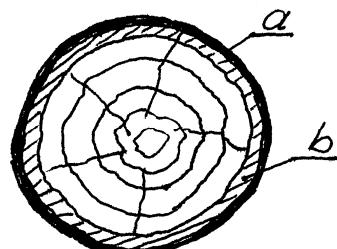
**Slika 13.2 Presjek debla**

## 13.3 Struktura drvne materije

### 13.3.1 Makrostruktura

Ako promatramo drvo prostim okom, onda pod MAKROSTRUKTUROM podrazumijevamo ono što čovjek može okom zapaziti.

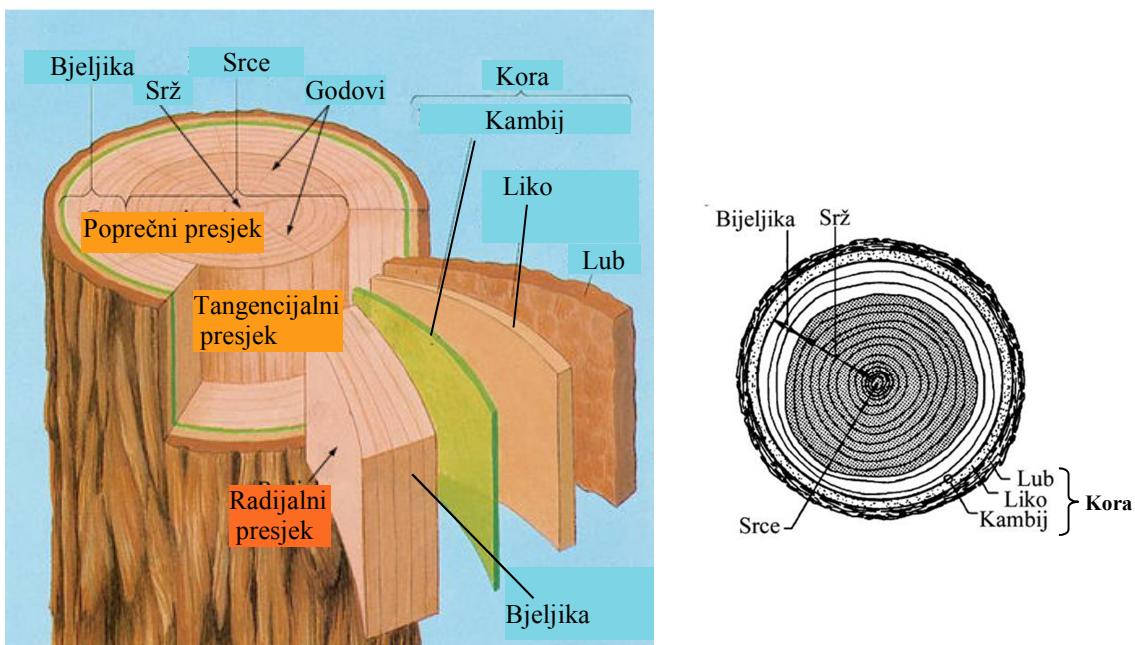
Prema *slici 13.3.* zapažamo godove i neke radikalne linije. Izvana imamo koru (a) koja štiti drvo od štetočina. Neposredno ispod kore je živi dio stabla za transport sokova (b), koji pruža mali hidraulički otpor, a od ostalog dijela stabla se uvelike razlikuje i po mehaničkim svojstvima i po svojoj svjetlijoj boji. Unutar tog sloja "bjelike" izvodi se transport sokova,



Slika 13.3 Makrostruktura drva

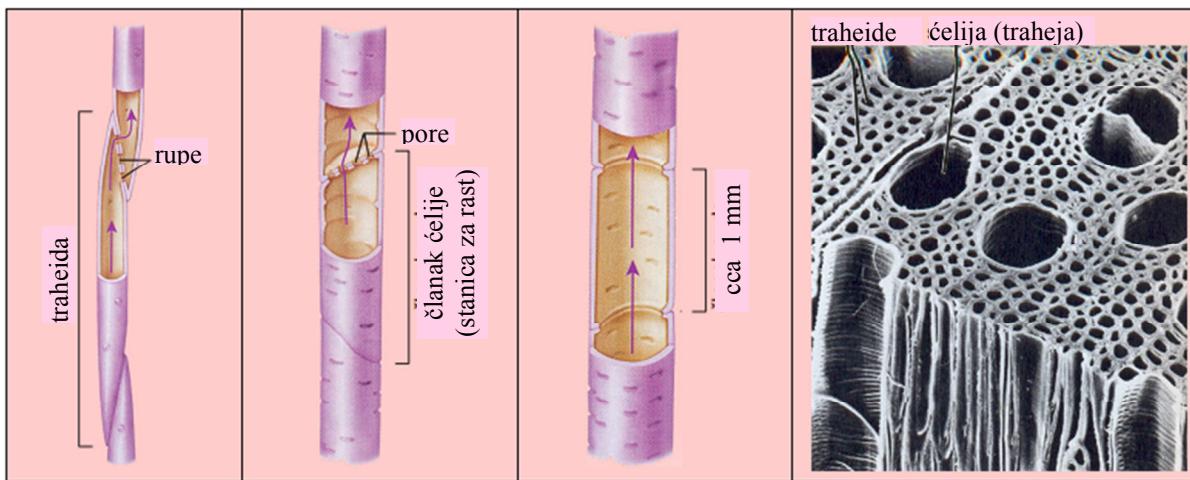
Prema *slici 13.4.* imamo sljedeće pojaseve:

- **Kora** drva se sastoji od kambija, lika i luba i ima fiziološku i zaštitnu funkciju, ali nije upotrebljiva kao građevni materijal.
- **Bjeljika** je fiziološki nužna jer se u njoj odvija proces rasta, ali je tehnički nevrijedna.
- **Srž** je tehnički najvažnija, to je dio drva koji je prošao fazu rasta i ima funkciju nošenja stabla.
- **Srce** je slabiji dio, koji je sklon raspucavanju i tehnički nije dobar.



Slika 13.4 Pojasevi u presjeku

Drvo počinje rasti u proljeće kad propupa i dobije lišće. S lišćem je stvorena i već spomenuta «kemijska tvornica» za stvaranje hranjivih produkata. Kroz čitav vegetacijski period lišće na stablu mora postojati. Intenzitet razvoja stabla opada u suhim ljetnim mjesecima bez vlage. U jesenskim mjesecima prestaje vegetacijski period, a zima služi za odmor do proljeća. Intenzitet rasta tijekom vegetacijskog perioda je promjenljiv, što se očituje u građi drva.



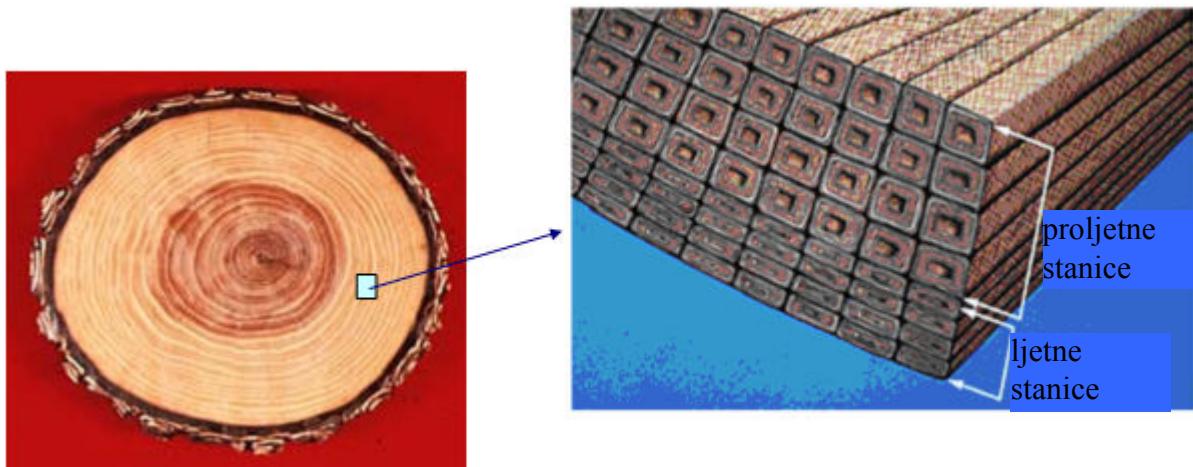
**Slika 13.5.** Unutrašnja građa drva

Na *slici 13.5* dan je povećani prikaz unutarnje građe drva. Drvo je sastavljeno od šupljih, duguljastih, cilindričnih i vlknastih ćelija - stanica za rast. Vanske dimenzije ovakve stanice znače prostor koji ta stanica zauzima. Što je stanična stjenka deblja to je drvo boljih mehaničkih svojstava! Promjer ove stanice iznosi  $\approx 0,1\text{mm}$ , dok je duljina ove stanice  $\approx 1\text{mm}$

U svakom dijelu perioda vegetacije dobivamo razlike stanice: prve su u proljeće stanice velikih šupljina s tankim stjenkama i niskim hidrauličkim otporom. Stanica izgrađena u ljetu je sporije rasla, ali je stjenka bila deblja, a stanična šupljina manja, pa je prostor bolje ispunjen drvnom tvari prema *slici 13.6*.

- U proljeće nastale stanice razlikuju se i po svojoj svjetlijoj boji. Promatrajući godove možemo ih čak i razlikovati.

Proljetne su stanice fiziološki bile važne, ali ljetne su važnije za mehanička svojstva drva, jer su bitno veće nosivosti.



**Slika 13.6** Usporedni izgled debljine stijenke stanica

### 13.3.2 Mikrostruktura

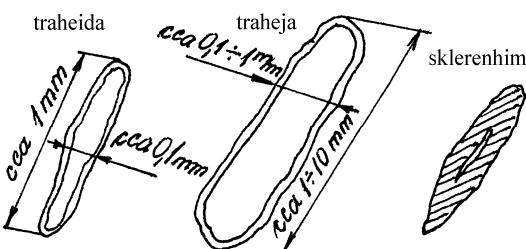
Promatramo li drvo mikroskopski uočavamo više vrsta vlakanaca:

- Kod četinjača:  
 a) traheide - uzdužna vlakna... (cjevčica)  
 b) parenhim - radialno staničje... (od kore prema centru)

Kod lišćara:  
 a) sklerenhim – uzdužno vlakno

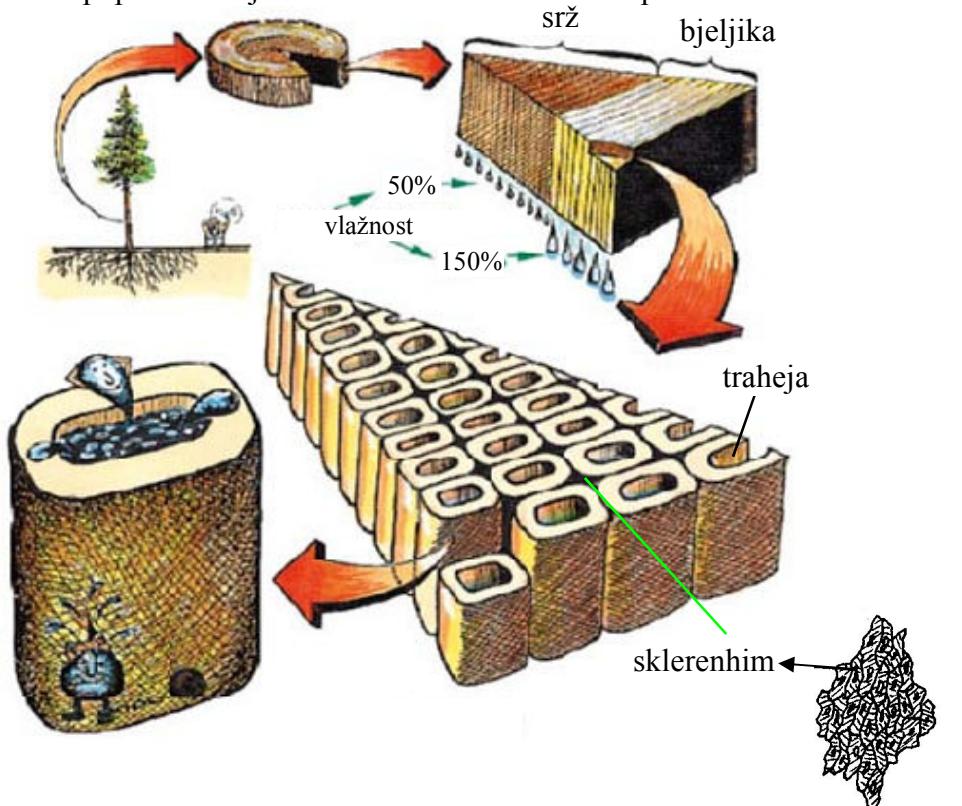
- b) traheje – uzdužno vlakno ... (cijev)
- c) parenhim – radikalno staničje.

Traheide su, kako smo već prethodno prikazali, najmanjeg volumena. Traheje su volumenoznije, a sklerenhim ima dosta drvne materije, prema *slici 13.7*.



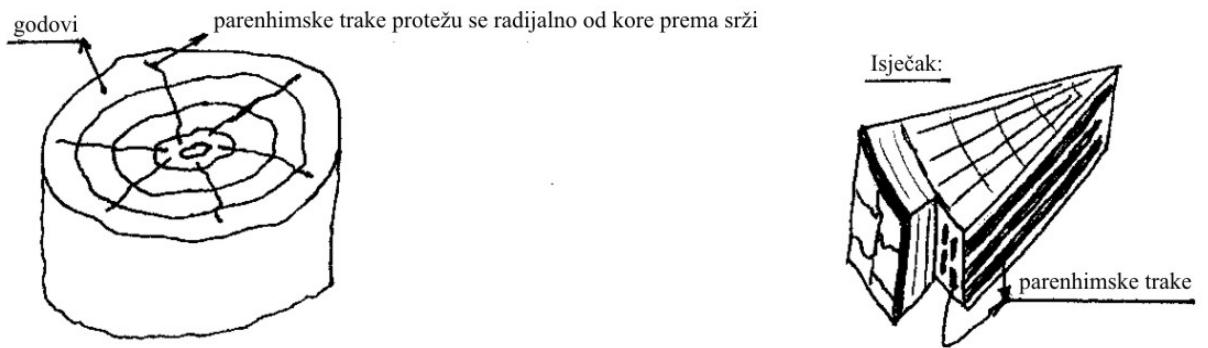
**Slika 13.7. Usporedni izgled poprečnog presjeka vlakanaca**

Promatramo li poprečni rez jedne lišćare dobivamo *izgled prema slici 13.8.*



**Slika 13.8. Poprečni rez lišćare**

- Trahealno staničje → ima ulogu provođenja hranjivih produkata i sokova.
- Traheida → iz ranog proljeća naglo se razvila, velike je unutarnje šupljine i podesna je za transport sokova. Debelostijeno staničje iz ljeta, nepogodno za transport sokova (visok hidraulični otpor), nosilac je čvrstoće drva, posebno kasno ljetne traheide.
- Sklerenhim → je kratko debelostijeno staničje, koje je nosilac čvrstoće materijala. Ima dakle ulogu u lišćarama kao kasna traheida u četinjarama (nosilac čvrstoće).
- Parenhimsko staničje → u obje vrste drveća ima čisto fiziološku ulogu. To je staničje, koje predstavlja nekakvo skladište hranjivih produkata, a smješteno je između ćelija ostalog staničja, prema *slici 13.9*. Parenhim je neka vrsta smočnice stabla (ili biljke). Postoje vanjski neprijatelji koji atakiraju na tu smočnicu i zbog toga ovo staničje najprije strada.



**Slika 13.9.** Smještaj parenhimskog staničja

Volumenski udio pojedinog staničja iznosi:

Kod četinjača:  
 traheide: 80-90% (najveći dio)  
 parenhim: 5-15%  
 ostatak do 100% je smolasto staničje.

Kod lišćara:	traheja:	15-50%	npr. kod bukve:	40%
	sklerenhim:	30-60%		ostalo!
	parenhim:	20-50%		16-30%

Što je veći postotak traheja, drvo je manje prostorne težine, a što je više sklerenhima čvrstoća drva je veća.

## 13.4 Kemizam drveta

Što se tiče kemijskog sastava, elementarna analiza pokazuje: 50% C (ugljik); 6-6,5% H (vodik); ostalo je uglavnom O (kisik). Ima još nekih elemenata koji tvore pepeo (0,4%) i nešto N (dušika i to 0,1%). Ovi su zato zanemarivi.

- Sastav može u ovim granicama malo varirati. Ova je analiza sastava zanimljiva za razmatranje gorenja drva. Međutim, s gledišta kemičara, zanimljivije je znati nešto o stanici, tj. o spojevima, a ne o samim elementima. Tako u drvu imamo tri grupe spojeva s težinskim udjelom:

- 1.) celuloze (najveći dio)  $\approx 50\%$ drvne tvari;
- 2.) lignini  $\approx 22-25\%$ ;
- 3.) poluceluloze (hemiceluloze)  $\approx 25\%$ .

- Po količini i značenju, celuloza je na prvom mjestu. Od ostalih spojeva uspjelo ju se odvojiti pomoću otapala. Celuloza je sirovina za razne materije (papir, ljepilo...).
- Lignini su tehnički nezanimljivi.
- Hemiceluloze kemičare zanimaju samo u nuždi. U ratnim godinama se može pretvoriti u šećer.

### 13.4.1. Celuloza ( $C_6H_{10}O_5)_n$

Dakle, postoji osnovna molekula, koja tvori celulozu kada se n-puta poveže. Osnovna molekula celuloze je građevna jedinica niza organskih spojeva (šećer, škrob itd.).

n- jest stupanj polimerizacije (umnožavanja)!

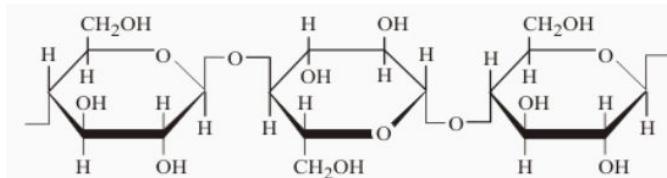
n=1500÷3000 ... kod celuloze;

n=1500 ... za drvne celuloze;

n=3000 ... za pamučne celuloze.

Što je stupanj polimerizacije (n) veći, vlakno celuloze je dulje i praktički vrjednije. Dakle s porastom (n) raste i vrijednost celuloze.

Celuloza tvori lančastu molekulu:



Slika 13.10. Molekula celuloze

Ako je stupanj polimerizacije (n) dovoljno velik, dobivamo dimenziju duljine vlakna celuloze  $10^{-4}$  mm (0,1 µm), što je u mikroskopskom području.

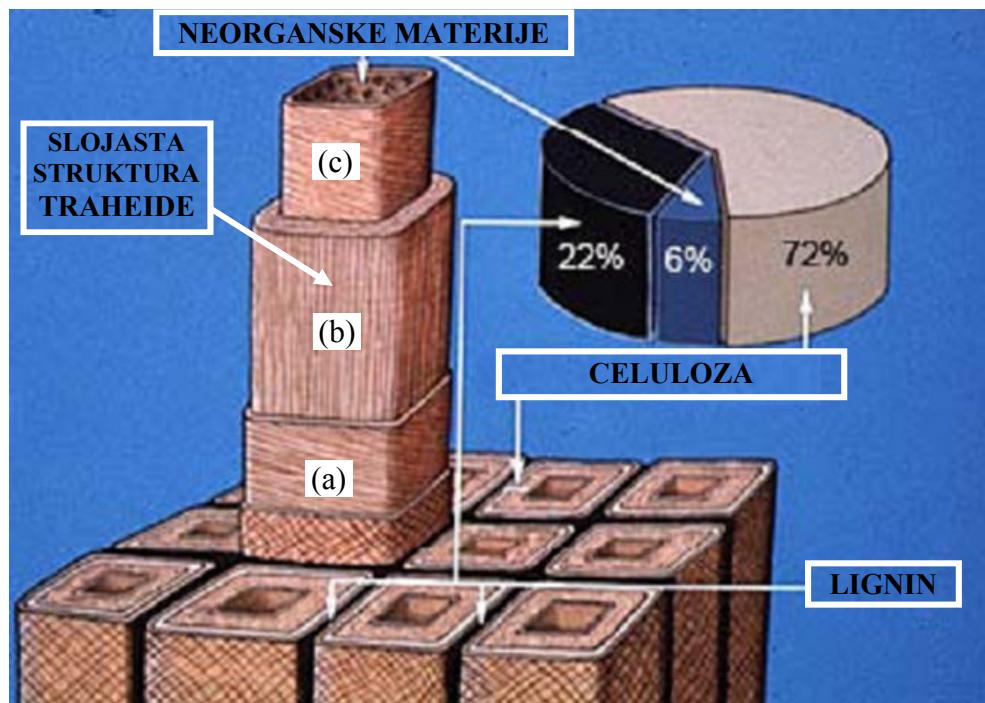
- Lignin je također spoj C; H i O, a zna se da mu je (n) razmjerno nizak i zato ne daje ligninu vlaknastu strukturu. Daje doprinos drvu kao gorivom materijalu, ali ne tehničkom.
- Hemiceluloze imaju stupanj polimerizacije (n) ispod 100, što im daje «brašnastu» strukturu, a ne vlaknastu.

### Kako su ova tri spoja vezana međusobno u staničnoj stjenci?

Smatra se da je kostur – celuloza u staničnoj stjenci. U taj kostur su naslagani i lignin i hemiceluloza. Neki strukturu stanične stjenke promatralju analogno armiranom betonu: čelične

šipke su skelet – celulza, a lignin i ostalo predstavlja okolni beton. Šipka je sama otporna na tlak, a beton stupu daje dobru tlačnu čvrstoću. To vrijedi i kod drva: celuloza – jest vlačno čvrsta, ali stablo samo sebe ne bi moglo izdržati na tlak (pritisak) da nema lignina i hemiceluloze.

- To je došlo odatle što velika stabla imaju dosta lignina što im daje čvrstoću na tlak. Uzmemو li mikroskopski susjedne četiri traheide prema *slici 13.11*, dobivamo prirodni kompozit drva.



*Slika 13.11. Kompozicija drva*

Lignin je centralna – središnja lamela koja služi kao vezivo, a smatra se da je i ona slojasta. I sama traheida (stanična stjenka) je slojasta (a, b, c).

Stoga je čitavo drvo slojasta materija: smatra se da je srednji sloj (b) onaj najčvršći, najvrjedniji dio - celuloza; sloj (a) sadrži ljepljive sastojke; sloj (c) je u stalnom dodiru sa živom supstancom i zato vjerojatno pod tim utjecajem ima i sastav.

S tehničke strane drvo nas zanima:

- po boji;
- po obradivosti (kakva se površina glatka može dobiti);
- po mehaničkim svojstvima (kao građevni materijal).

Imamo još neke sastojke u drvu:

- škrob i masti;
- tanin → zanimljiv je kao sirovina za štavljenje kože (ali se danas može proizvesti i sintetički);
- smola → u nekim vrstama četinjača imamo je do 8%. Ona je vrijedna sirovina za balzam, eterična ulja i sl.

### 13.5 Mehanička svojstva drva

Najviše nas zanimaju: vlačna (rastezna) čvrstoća  $R_m$ , tlačna (sabojna) čvrstoća  $R_{mt}$  i savojna čvrstoća  $R_{ms}$  kao i modul elastičnosti  $E$ .

- Drvene konstrukcije zahtijevaju poznavanje tih svojstava. Kad je u pitanju pokućstvo, to nije toliko traženo.

Međutim, mehanička nas svojstva zanimaju i kako bismo otkrili eventualne bolesti u drvetu.

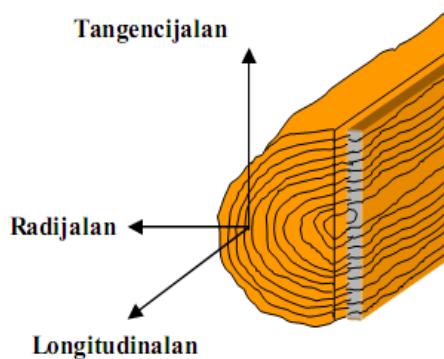
Normalno je npr. čvrstoća bukovine 120 - 150 [N/mm<sup>2</sup>]. Ako ona iznosi svega 80 [N/mm<sup>2</sup>], to je dokaz da to drvo nije unutra zdravo, ili zbog kakvih pukotina, strukturalnih promjena ili početka gnjileži i sl.

U početku se radilo i ispitivalo analogno s metalima. Međutim nas ponekad više zanima udarna žilavost.

Mehanička svojstva zavise od usmjerenosti epruvete i moramo označiti za koji smjer ta vrijednost vrijedi, prema *slici 13.12.*

Dakle razlikujemo svojstva uzduž, poprijeko i tangencijalno. To isto vrijedi i za modul elastičnosti. Mehanička svojstva ovise i o sadržaju vlage u drvu. U nastavku, a radi međusobne usporedbi, daje se tablica mehaničkih svojstava za relativno prošušeni materijal sa sadržajem vlage u drvu 10-12% i pripadajućom gustoćom  $\rho_0$  kada mehanička svojstva imaju maksimalne vrijednosti.

S povećanjem sadržaja vlage, mehanička svojstva znatno opadaju.



*Slika 13.12. Karakteristični smjerovi*

TABLICA MEHANIČKIH SVOJSTAVA za sadržaj vlage u drvu 10-12%

Drvo [kg/m <sup>3</sup> ]	čvrstoće u [N/mm <sup>2</sup> ]					Modul elastičnosti E u [N/mm <sup>2</sup> ]		
	vlačna $R_m$			tlačna	savojna	$E_L$	$E_T$	$E_R$
	$R_{mL}$	$R_{mT}$	$R_{mR}$	$R_{mt}$	$R_{ms}$			
BUKOVINA 630 - 680	130 do 150	4 do 6	8 do 12	70 do 75	100 do 110	15000 do 16000	1500	2500 do 3500
BOROVINA 450 - 500	100 do 110	3 do 5	7 do 9	65 do 70	80 do 90	11000 do 13000	1000	2000
JELOVINA 380 - 400	70 do 80	3 do 4	6 do 8	40 do 45	60 do 75	9000 do 10000	1000	2000
SMREKA 420 - 450	85 do 95	3,5 do 5	7 do 9	45 do 50	70 do 75	10000 do 11000	1200	2000 do 2500
HRASTOVINA 700	120 do 125	6,5 do 8	9 do 14	70 do 75	90 do 100	14000 do 15000	1500	2500 do 3000
JASENOVINA 600 - 650	140 do 160	5 do 8	10 do 15	80 do 100	110 do 120	16000	1500	3000

- Pojedine vrste gornjih drva mogu imati i veću gustoću od gore navedene, ali to nije s tehničkog gledišta poželjno jer se s većom gustoćom pojavljuju raspukline i slična oštećenja.
- Ima drva i s manjom gustoćom, npr. bukovina s po = 500 [kg/m<sup>3</sup>], što joj daje bolju homogenost i bolju obradivost. Iako bukovina kod nas zauzima cca 1/3 ukupnog drva, to i nije velika prednost, jer s tehničke strane upotrebljivosti nije jako vrijedna i podložna je štetočinama. Npr., brezovina koja je slična bukovini, otpornija je na štetočine, a uz to ima i bolja mehanička svojstva i bolju obradivost.
- Smreka je naprotiv jako otporna na štetočine.

Konačno, treba reći da prigodom konstruiranja i proračuna elemenata izrađenih od drva treba imati na umu navedena svojstva ovog prirodnog kompozita. Dakako, na temelju toga valja izvršiti optimalni odabir drva i s obzirom na cijenu!

# **14 Analiza strukture materijala**

## **14.1 Kemijski sastav**

Mnogi materijali mogu se prepoznati po karakterističnim svojstvima bez pomagala - specifičnoj težini, tvrdoći, boji i izgledu površinu, zvuku, okusu. Međutim, točnije prepoznavanje materijala može se obaviti pomoću analize kemijskog sastava. Ovom analizom može se točno utvrditi o kojem se materijalu radi, ali se većinom ne može ocijeniti kakva ostala svojstva ima zbog prerade.

### **14.1.1 Određivanje sastava kemijskom reakcijom**

Klasična kemijska analiza je dosta spor proces, koji se svodi na rastvaranje uzorka u nekoj kemikaliji i titranje rastvora reagensom. Iz utrošene količine reagensa i utrošene mase uzorka može se precizno odrediti količina pojedinog elementa.

Uzorci se uzimaju odvajanjem čestica s površine metala, bušenjem rupa i sličnim zahvatima. Obično se uzima čestice volumena kutije šibice.

Analiza se provodi odvojeno za svaki pojedini ispitivani element, jer su kemikalije na koje reagiraju različite.

Jasno je da se radi o sporom i skupom, iako vrlo preciznom procesu. Nedostatak je i u tome što se oštećuje površina komada.

### **14.1.2 Spektralna analiza**

Određivanje kemijskog sastava spektralnom analizom zasniva se na karakterističnoj energiji vezivanja elektrona u vanjskim ljkama za svaki element. Pobudom ovih elektrona oslobođaju se kvanti svjetlosti valne duljine koja odgovara pojedinim elementima. Usporedbom linija na spektru s poznatim linijama elemenata može se pouzdano zaključiti o kojim se elementima radi.

Spektralna analiza može biti kvalitativna i kvantitativna. U prvom slučaju se samo utvrđuje postojanje pojedinih elemenata, dok se u drugom slučaju izmjerom intenziteta pojedinih valnih duljina svjetla određuje točna količina pojedinih elemenata. Pobuda materijala na svjetlucanje postiže se električnom iskrom koja nastaje između molibdenske elektrode i ispitivanog materijala. Svjetlo iskre ide u analizator, koji daje podatke o sastavu.

Postoje prijenosni uređaji za kvalitativnu analizu, međutim za kvantitativnu analizu se koriste složeniji uređaji s podrškom računala.

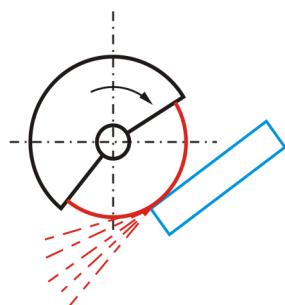
Umjesto spektralne analize svjetla može se provesti spektralna analiza raspršenog rentgenskog zračenja na elektronima iz dubljih ljkki atoma. Ispitivani uzorak se ozrači uskim snopom zračenja jedne valne duljine. Zračenje raspršeno na uzorku snima se detektorima koji iz intenziteta zračenja i valne duljine sekundarnog zračenja također određuju kemijski sastav metala. Za razliku od optičkog spektrometra, gdje se isparava mali volumen metala, ovdje nema isparavanja metala, a promatrana površina je jednak promjeru uskog rentgenskog snopa, tako da se mogu odrediti sastojci izuzetno sitnih faza u strukturi.

### **14.1.3 Približno određivanje kemijskog sastava**

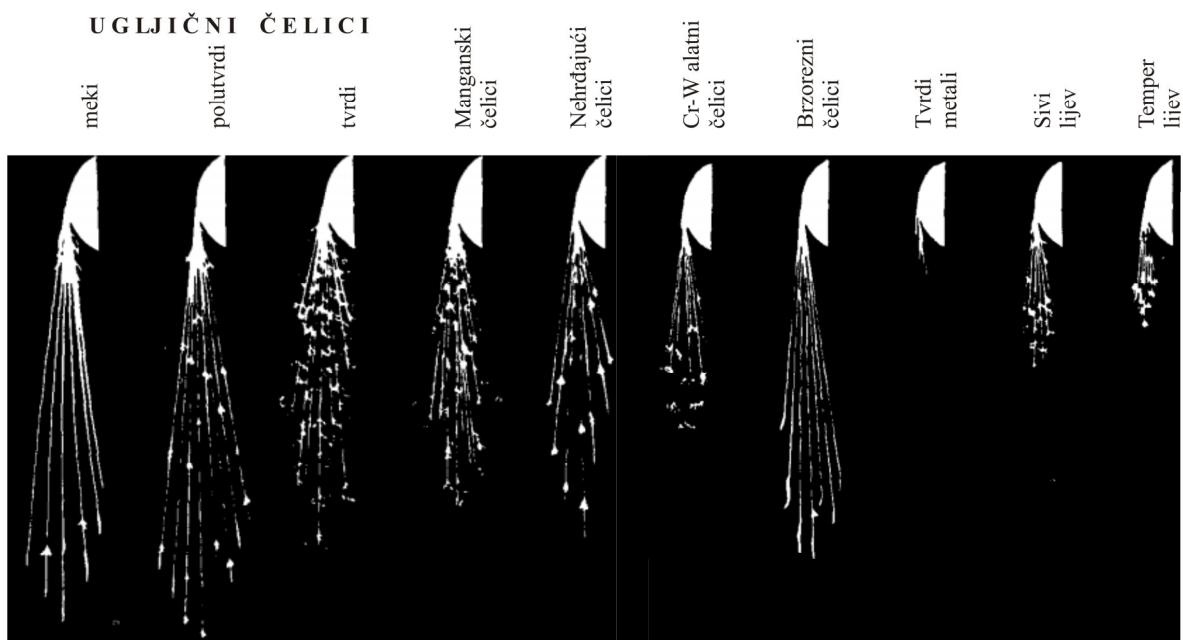
Približno određivanje kemijskog sastava zasniva se na prethodno opisanim metodama, ali ne zahtijeva složene instrumente. Podaci su naravno manje pouzdani, a zavise od uvježbanosti ispitivača. Proizvodi kemijskih reakcija nekih tvari s pojedinim elementima imaju karakteristične boje. Ispitivanje se svodi na ovlaživanje materijala pojedinim reagensima, nakon čega se papirom uzme otisk s površine i pregleda je li se pojavila očekivana boja ili nije. Za ova ispitivanja postoje kompleti s bočicama koje sadrže kemikalije za najčešće

susretane elemente u legurama, kao i etaloni najčešće korištenih legura radi provjere rezultata. Drugi način je promatranje izgaranja iskara dobivenih brušenjem ispitivanog materijala (*slika 14.1.* i *14.2.*).

Svaki element izgaranjem ispušta karakterističnu boju, a i oblik iskre zavisi od pojedinih elemenata. Usporedbom iskara dobivenih brušenjem i slika iz priručnika može se procijeniti vrsta materijala. I ovdje postoje uzorci najčešće susretanih legura, koji se mogu brusiti zajedno s ispitivanim materijalom radi usporedbe.



**Slika 14.1.** Približno određivanje kemijskog sastava



**Slika 14.2.** Slike iskri pri brušenju različitih metala

## 14.2 Analiza makro i mikro strukture materijala

Pregledom površine materijala može se samo naslutiti kakvu strukturu ima takav materijal. Površinski slojevi su često različitog kemijskog sastava od samog materijala, tako da ih je potrebno ukloniti radi uvida u strukturu. Nešto bolji uvid u građu materijala dobiva se prijelomom uzorka. Iz samog izgleda površine prijeloma može se zaključiti je li materijal žilav ili krt, rastezljiv, krupnozrnat i slično. Prema obliku prijeloma može se zaključiti i povijest obrade materijala, tj. je li materijal gnječen, toplinski obrađivan, izotropan ili anizotropan. Mogu se uočiti i neke nehomogenosti u nutrini pore i troska.

Povećalom se može bolje osmotriti površinu. Povećanje obične ne prelazi 10X, najčešće 1.5–3X. Ako se površina fino izbrusi i nagrize kiselinom, mogu se opaziti i golim okom makrostrukture materijala. Ovo je lijepo vidljivo kod odljevaka i zavarenih spojeva koji imaju krupnije zrno od gnječenih materijala.

#### 14.2.1 Optički mikroskop

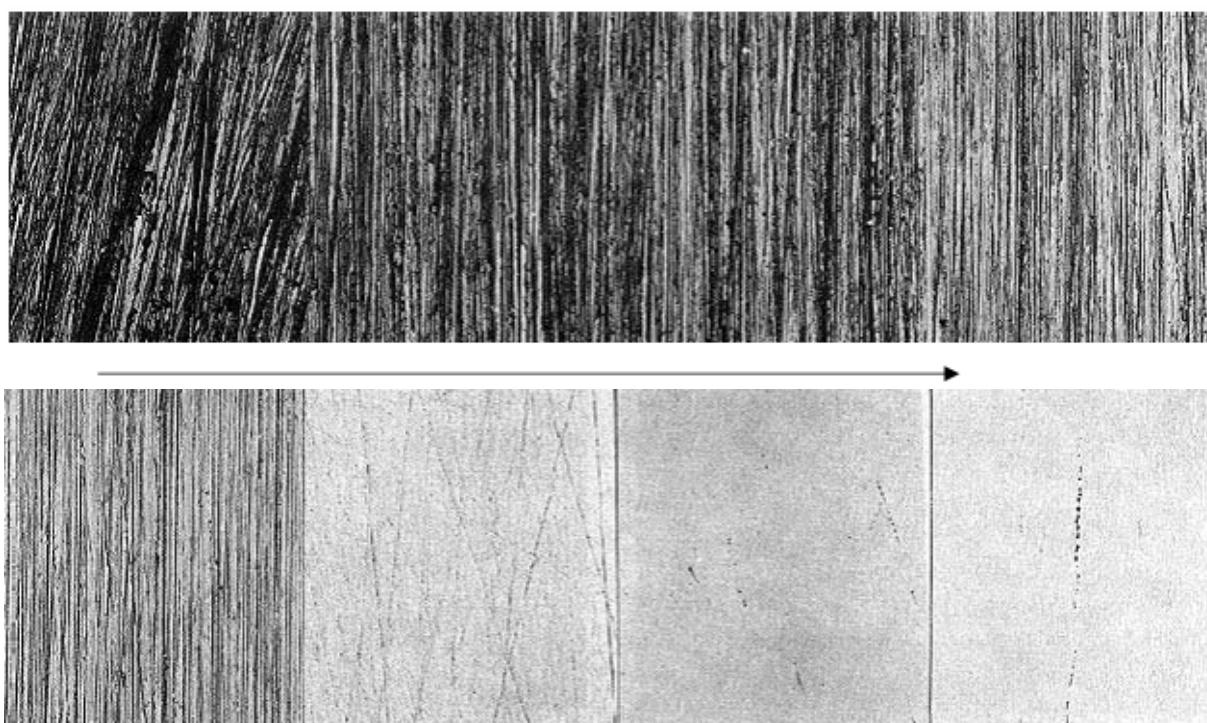
Većina metala ima zrno suviše sitno da se vidi golim okom. Još su u XIX. stoljeću izrađeni mikroskopi s povećanjem od 1500X, što je praktična granica povećanja optičkog mikroskopa. Pod ovim povećanjem mogu se lijepo vidjeti zrna svih metala, pa i najsitnija. Raspoznaju se i mnoge faze, kako primarne, tako i sekundarne. Neke faze se ipak ne mogu razlučiti optičkim mikroskopom, jer su presitne.

Uzorak za pregled na optičkom mikroskopu treba pažljivo pripremiti (slika 87) da se na površini ne dobije slika izazvana procesom pripreme uzorka. Izrezivanje manjeg komada provodi se intenzivnim hlađenjem da se ne izmijeni mikrostruktura.



Slika 14.3. Umetanje uzorka u kalup sa polimernom masom

Površina se zatim fino brusi, najprije se poravnava finim brusom, a zatim brusnim papirom s nekoliko gradacija krupnoće abrazivnih zrnaca. Na mikroskopu se provjerava smanjivanje brazda od brušenja. Nakon brušenja površina se polira finim abrazivom. Tvrđi metali se poliraju dijamantnom pastom. Poliranjem se uklanjuju sve brazde od brušenja i skida površinski plastično deformirani sloj (slika 14.5.).



Slika 14.4. Tragovi brušenja brusnim papirom i dijamantnom pastom. Smjer strelice pokazuje izgled izbruska u ovisnosti o promjeru abrazivne čestice počevši od grubljih prema finijim. Najfinije brušenje provodi se dijamantnom pastom promjera čestice  $1 \mu\text{m}$ .



*Slika 14.5. Shematski prikaz postupka pripreme metalografskih uzoraka*

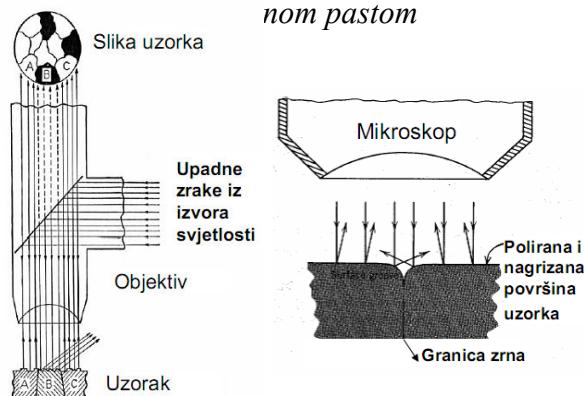
Ovako pripremljeni uzorak pod mikroskopom izgleda kao svjetla ploča. Dalje se priprema za promatranje nagrizanjem s odgovarajućom kiselinom koja selektivno nagriza pojedine faze. Obično se nagrizaju granice kristalnih zrna. Proizvodi korozije (nagrizanja) najčešće su tamniji, pa se pod mikroskopom razlikuju tamnije i svjetlije površine, što daje sliku zrna, faza itd. Neke faze se mogu nagrizanjem i obojiti.



Ako su metali čisti, onda su granice zrna prilikom nagrizanja tamnije. Intenzivnije nagrizanje postiže se postavljanje uzorka u



*Slika 14.7. Završno poliranje više uzoraka nom pastom*



*Slika 14.8. Optički mikroskop - shematski prikaz*

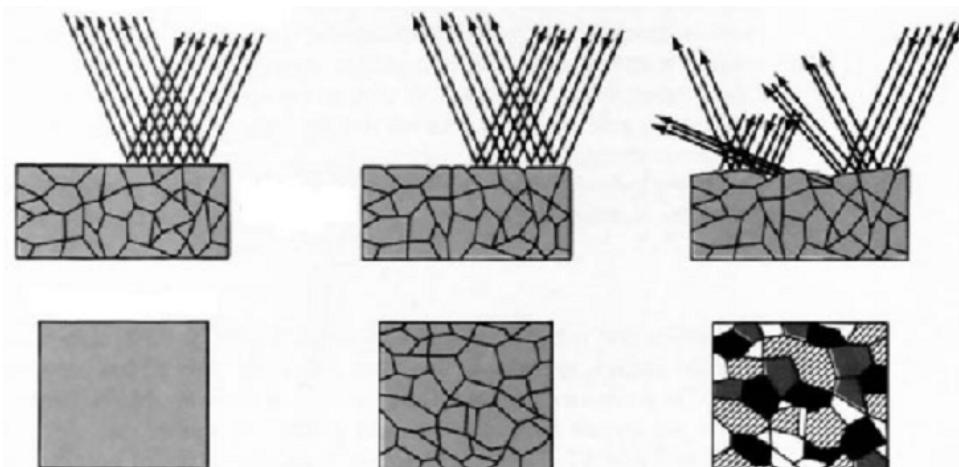
elektrolit i propuštanjem struje kroz uzorak i elektrodu.

Ovo elektrolitičko nagrizanje može zamijeniti neke stupnjeve finog brušenja i poliranje, čime se izbjegava plastična deformacija površine. Rasvjeta promatrane površine može biti okomita, ali i kosa. Dubinska oštRNA optičkog mikroskopa je vrlo mala, tako da površina mora biti jako glatka.

Većina mikroskopa ima priključen i fotografski aparat za snimanje mikrostrukture, a često i uređaj za mjerjenje mikrotvrdoće pojedinih faza u metalu.



*Slika 14.9. Metalografski optički mikroskop*



**Slika 14.10.** Odbijanje svjetla ovisno o površini uzorka (gore) i slika koju vidimo na okularu (dolje)

#### 14.2.2 Elektronski mikroskop

Elektronski mikroskop radi na sličnom principu kao i optički mikroskop. U visokom vakuumu stvara se snop elektrona koji se fokusira i širi slično svjetlu u optičkom mikroskopu. Ovdje se elektroni ponašaju kao valovi visoke frekvencije, tj. kratke valne duljine. S obzirom na to da je valna duljina elektrona nekoliko tisuća puta manja od valne duljine svjetlosti, moguće je i daleko veće povećanje slike uz dobro razlučivanje.

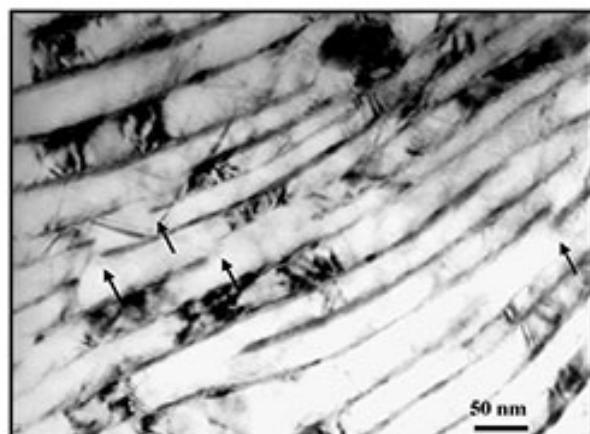
Dva su osnovna načina dobivanja slike uzorka, i to prosijavanjem (transmisijom) i refleksijom elektrona o površinu uzorka.

Transmisijski elektronski mikroskop, označen često kao TEM mikroskop daje povećanja do  $10^6$  X. Prosijavaju se vrlo tanke folije stanjene kemijskim nagrizanjem. Pregled površina obavlja se i na replikama - otiscima površina na materijalu koji ne apsorbira jako elektrone. Sredstvo iz kojeg se izrađuje replika nanosi se na površinu, a zatim se osnovni materijal kemijski odstrani.

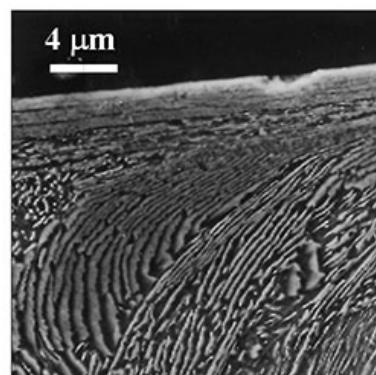
Pomoću TEM mikroskopa utvrđeno je postojanje dislokacija u metalu, njihovo umnažanje i pokretanje pod djelovanjem vanjskih sila. Na *slici 14.11.* dana je slika strukture perlita dobivena pomoću TEM mikroskopa. TEM mikroskop zahtijeva vrlo finu pripremu uzorka za prozračivanje i koristi se najviše za temeljna istraživanja strukture tvari.

Drugi način snimanja elektronskim mikroskopom je pretraživanje površine snopom elektrona koji se odbijaju od te površine i udaraju u detektor. Često se koristi kratica SEM mikroskop, od engleskog naziva *Scanning Electron Microscope*. Vidi *sliku 14.12.*

SEM mikroskop se koristi u širokom rasponu



**Slika 14.11.** Struktura površine na TEM mikroskopu, perlit



**Slika 14.12.** Struktura površine na SEM mikroskopu, perlit

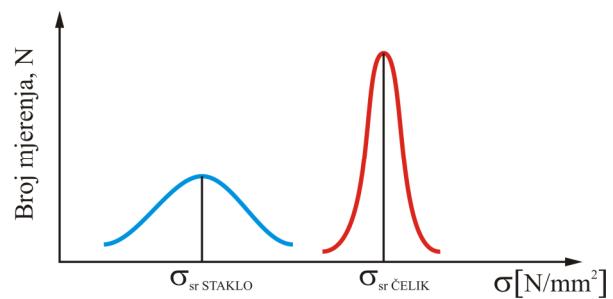
povećanja, od nekoliko desetaka puta do stotinjak tisuća puta. Jedinstveno svojstvo je velika dubinska oštrina slike, tako da se mogu jako povećavati hrapave površine i razni predmeti. U strojarskoj praksi najviše se koristi za preglede površina prijeloma. Priprema uzorka je jednostavnija nego za TEM mikroskop. Moguće je provesti i analizu kemijskog sastava analizom spektra rentgenskog zračenja, jer udarom elektrona o površinu dolazi do izbijanja rentgenskog zračenja.

### 14.3 Ispitivanje ponašanja materijala pod opterećenjem i utjecajem okoliša

Ocjena ponašanja materijala pod djelovanjem različitih opterećenja i utjecaja okoliša provodi se na temelju rezultata ispitivanja uzorka izvađenih iz promatranog materijala. Ova ispitivanja su precizno definirana standardima tako da se mogu uspoređivati rezultati dobiveni na različitim mjestima ispitivanja.

Postoje nacionalni, internacionalni i strukovni standardi ispitivanja, zatim standardi proizvođača i velikih korisnika (željeznice, vojska, brodogradnja, aeronautika...). Karakteristika svih ispitivanja je da rezultati trebaju biti prikazati na razumljiv i jednostavan način. Mogu se dati brojevani podaci o izmjeranim veličinama, podaci o pojavi pukotina u određenim uvjetima, izgledu komada nakon ispitivanja i slično. Svako ispitivanje podložno je nekim netočnostima, od pripreme uzorka, netočnosti naprava i mjernih instrumenata do nehomogenosti materijala. Ispitivanjem većeg broja uzoraka postiže se bolja ocjena prosječnih vrijednosti mjereneh veličina. Neka mjerena daju vrlo bliske vrijednosti iz velikog broja mjerena, dok u nekim slučajevima dolazi do velikog rasipanja rezultata.

Na *slici 14.13.* pokazan je primjer mjerena rastezne čvrstoće čelika i stakla. Na osi apscisa nanesene su izmjerene vrijednosti čvrstoća, a na osi ordinata broj ispitanih uzoraka koji su pokazali odgovarajuću čvrstoću. Vidljivo je znatno veće rasipanje rezultata mjerena u slučaju stakla u odnosu na čelik. Statističkom obradom mogu se dobiti srednje vrijednosti čvrstoće, rasipanje tih vrijednosti, vjerojatnost dobivanja srednjih vrijednosti za konačan broj uzoraka itd.

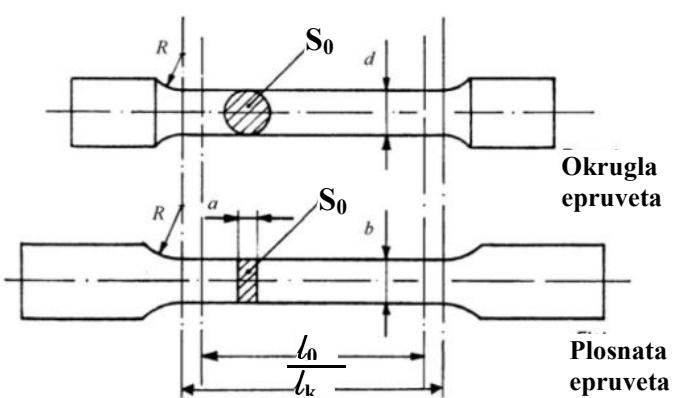


*Slika 14.13. Prikaz većeg broja mjerena čvrstoće čelika i stakla*

#### 14.3.1 Čvrstoća materijala

Pod čvrstoćom materijala podrazumijevamo opiranje raskidu materijala pod djelovanjem narinutih sila. Najčešće se ispituje rastezna ili vlačna čvrstoća, tj. opiranje materijala rastezanju. Tlačna i savojna čvrstoća se u strojarstvu rijede ispituju, jer su u pravilu veće ili jednake od rastezne čvrstoće.

Rastezna čvrstoća materijala mjeri se na uzorcima izvađenim iz ispitivanog materijala. Uzorci (epruvete) su okruglog ili pravokutnog presjeka, u



*Slika 14.14. Epruvete za ispitivanje rastezne čvrstoće*

obliku štapa sa zadebljanim završecima. Dimenzije epruveta (okrugle ili plosnate) su standardizirane. Postoje proporcionalno kratke ( $l_0=5 \cdot d$ ) i proporcionalno duge epruvete ( $l_0=10 \cdot d$ ). Prijelaz iz zadebljanog dijela u tanji dio je blag, da se postigne prijelom unutar stanjenog, središnjeg dijela (slika 14.14.). Pripremljeni uzorak (često se zove i epruveta) upinje se u čeljusti kidalice (slika 14.15) i zatim polagano rasteže do prijeloma. Brzina kidanja je mala, pa se ovo rastezanje može smatrati kvazistatičkim opterećenjem. Mjeri se veličina sile F i pripadno produljenje uzorka  $\Delta l$  na mjernoj bazi u srednjem dijelu epruvete. Rezultati mjerena bilježe se tokom rastezanja u dijagramu sila - produljenje, slika 14.16 a). Veličina sile mjeri se u Newtonima, a produljenje u milimetrima.



Slika 14.15. Kidalica

Dijeljenjem sile s početnim presjekom poprečnog presjeka  $S_0$  dobijemo naprezanje epruvete:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Deformacija epruvete je:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$$

Nakon prekida epruvete odmjerava se ukupno produljenje na mjernoj bazi i određuje rastezljivost (elongacija) ispitanog materijala:

$$A_5 \text{ (ili } A_{10}) = \frac{\Delta l_k}{l_0} \cdot 100\% ; \quad \Delta l_k = l_k - l_0,$$

gdje su:

$A_5, A_{10}$  - rastezljivost proporcionalne epruvete [%]

$\Delta l_k$  - konačno produljenje kod loma [mm]

$l_0$  - početna mjerna duljna [mm]

$l_k$  - konačna mjerna duljna [mm].

Rastezna čvrstoća dobiva se kao omjer maksimalne sile postignute kod rastezanja i početne površine poprečnog presjeka epruvete  $S_0$ , te označavaju kao  $R_m$ :

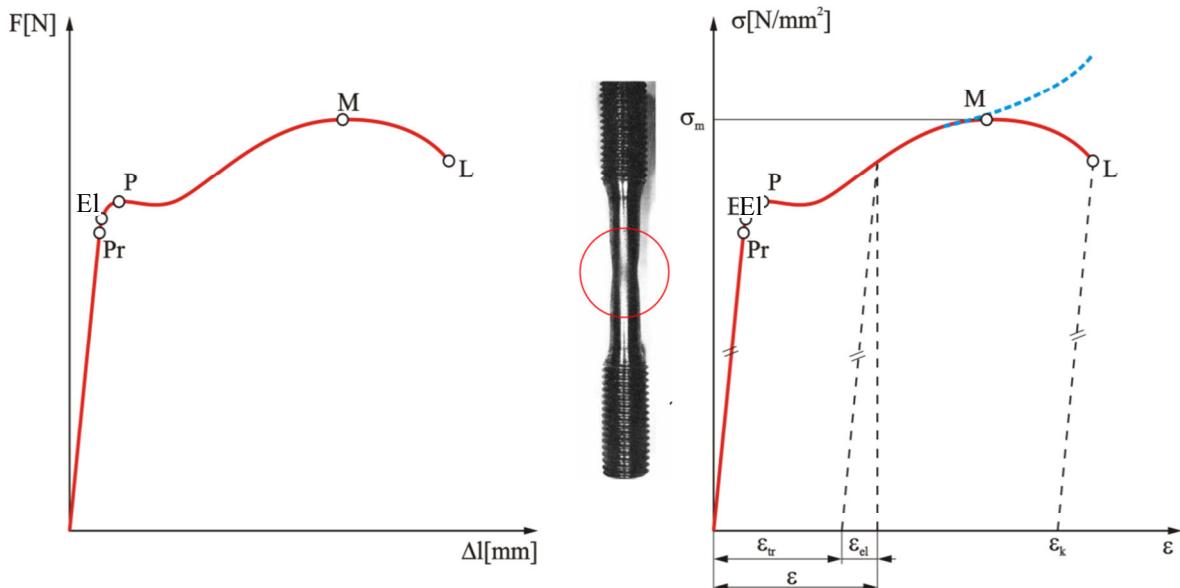
$$R_m = \frac{F_{\max}}{A_0} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \text{ ili } [MPa],$$

gdje je:

$F_{\max}$  - maksimalna sila [N]

$S_0$  - površina poprečnog presjeka epruvete [ $mm^2$ ].

Stvarna čvrstoća materijala je veća od ovako ocijenjene, jer rastezanjem dolazi do smanjenja poprečnog presjeka zbog produljenja epruvete, tako da je presjek na mjestu prijeloma  $S_{\min} < S_0$ , vidi sliku 14.16. Naime, volumen materijala pri rastezanju se praktički ne mijenja, pa produljenje u jednom smjeru prati suženje u poprečnom smjeru. U dijagramu " $\sigma - \varepsilon$ " na slici 14.16 b) isprekidana plava crta pokazuje stvari tok naprezanja.



**Slika 14.16. a)** Dijagram sila - produljenje      **b)** Dijagram naprezanje - deformacija

Karakteristične točke označene su u dijagramima na slici 14.16.:

- *Granica proporcionalnosti (Pr)* – je najveće opterećenje  $\sigma_{pr}$  kod kojega su naprezanje i deformacija proporcionalni (linearni dio dijagrama i za njega vrijedi Hookeov zakon:  $\sigma = E \cdot \epsilon$  gdje je:  $E$  - Youngov modul elastičnosti [N/mm<sup>2</sup>])
- *Granica elastičnosti (El)* – predstavlja najveće naprezanje  $\sigma_e$  kod kojega nakon rasterećenja neće doći do trajne deformacije.
- *Granica plastičnosti ili granica popuštanja ili granica tečenja (P)* – to je ono naprezanje  $\sigma_p$  kojim započinje intenzivnije produljenje epruvete - tečenje materijala. Kod metala, to je naprezanje kod kojega dolazi do klizanja dislokacija.
- *Vlačna čvrstoća (granica razvlačenja) (M)* – jest maksimalan iznos kvocijenta  $R_m = \frac{F_{\max}}{S_0}$  maksimalne sile i početne površine poprečnog presjeka epruvete.

Za materijale koji nemaju izraženu granicu plastičnosti, uzima se *konvencionalna granica plastičnosti* koja predstavlja naprezanje pri kojem trajna deformacija iznosi 0,2% nakon rasterećenja epruvete:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{A_0} [\text{N/mm}^2]$$

*Poprečna kontrakcija*, odnosno relativno suženje presjeka na mjestu prijeloma kao jedna od mjera plastičnosti materijala:

$$Z = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \cdot 100\%$$

Malu kontrakciju presjeka prilikom kidanja pokazuju krhki materijali, dok plastični pokazuju kontrakciju i preko 0.5.

Ako veličine komada nisu dovoljne za izradu standardne epruvete, najčešće se koriste "proporcionalne epruvete" (duge ili kratke).

Profili, užad, lanci, cijevi ili žice ispituju se u obliku u kojem se i koriste, a vlačne probe zovu se tehnološke.

Ispitivanje rastezanjem provodi se uglavnom u željezarama, gdje se za svaku šaržu (punjenje peći čelikom) određuju, uz kemijski sastav, i rastezna čvrstoća uzorka uzetog iz

poluproizvoda dobivenog preradom čelika iz te šarže. U popratnom listu prikazuju se i podaci o rastezljivosti i kontrakciji presjeka. Kod odljevaka se često zajedno s odljevkom izlije i štap iz kojeg se zatim izradi epruveta za pokus rastezanjem. Broj uzoraka i način uzimanja, kao i oblici epruveta su pokriveni standardima kao što su HRN (Hrvatske norme), HRB (Hrvatski registar brodova), te razni strani standardi (DIN, Lloyd's Register of Shipping, ASME, API, Bureau Veritas i mnogi drugi).

### 14.3.2 Tvrdoća materijala

Tvrdoća materijala se u svakodnevnom životu podrazumijeva kao relativna veličina odnosa dvaju materijala u paru. Tvrđi materijal može zaparati mekši, može ostaviti otisak u mekšem, odskače više od podloge od mekšeg, ako se udarcem pobudi na titranje zvoni dulje vremena od mekšeg, ako je magnetičan dulje vremena zadržava magnetičnost. Tvrdoća predstavlja mjeru odraza faznog sastava i strukture u metalu. Što je veća tvrdoća, materijal je otporniji na trošenje. Na temelju poznate tvrdoće, često se može približno odrediti i vlačna čvrstoća materijala.

Na osnovi ovih fizikalnih pojava zasniva se mjerjenje tvrdoće materijala, koje nema apsolutnu vrijednost kao rastezna čvrstoća, nego se izražava zavisno od načina mjerjenja.

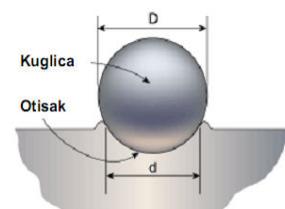
Najstariji tehnički način je usporedba tvrdoća različitih tvari međusobnim grebanjem tvari o tvar. Prema Mohsovoj skali ovako se mjeri tvrdoća minerala. Najtvrdi je dijamant, s brojem 10, a najmekši je talk, s brojem 0. Skala je nelinearna i u strojarstvu se ne koristi.

Mogućnost utiskivanja tvrde tvari u meku kao mjerilo tvrdoće koristi se često u strojarstvu. Najpoznatije su metode mjerjenja tvrdoće Brinellova i Vickersova. U svim slučajevima se standardnom silom utiskuje penetrator u ispitivani materijal i mjeri površina otiska. Omjer između primijenjene sile i površine otiska daje tvrdoću, koja se uz mjernu jedinicu označava i oznakom metode ispitivanja.

U svakom ispitivanju penetrator treba biti znatno tvrđi od ispitivanog materijala da se sam ne deformira prilikom ubadanja. Površina prije ispitivanja treba biti glatka kako bi se omogućilo oblikovanje pravilnog otiska i očitavanje promjera.

#### 14.3.2.1 Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom (HB)

Penetrator za ispitivanje Brinellovom metodom je zakaljena čelična kuglica standardnog promjera. Promjeri su različiti (10, 5 i 2.5 mm), kao i sile (29420, 7355, 187,5 [N]), da se pokrije širi raspon tvrdoća materijala. Ovom metodom ispituju se mekši i srednje tvrdi materijali (konstrukcijski čelik, obojeni metali), a samo ispitivanje ostavlja mali, ali vidljivi otisak na površini vidi *sliku 14.17*. Metoda je pogodna za komade koji se mogu donijeti pod uređaj za ispitivanje. Kod standardnih aparata sila pritiska raste do nazivne  $F$  kroz  $2 \div 8$  [s], a njeno djelovanje traje  $10 \div 15$  [s]. Nakon rasterećenja očita se pripadajući promjer otiska  $d$ .



**Slika 14.17.** Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom

Tvrdoća je prema Brinellu mjera otpornosti ispitivanog materijala na prodiranje kuglice standardnog promjera  $D$ , pritiskane standardnom silom  $F$ . Tvrdoća HB je omjer između sile i površine otiska, tj. kugline kalote.

Izvod izraza za HB:

Općenito je površina kugline kalote prema slici 14.18:

$A = \pi \cdot D \cdot h$  ... i prema slici je:

$$\frac{D}{2} - h = \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}}, \text{ tj. dubina otiska:}$$

$$h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{D^2 - d^2}, \text{ odnosno:}$$

$$h = \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}, \text{ pa je:}$$

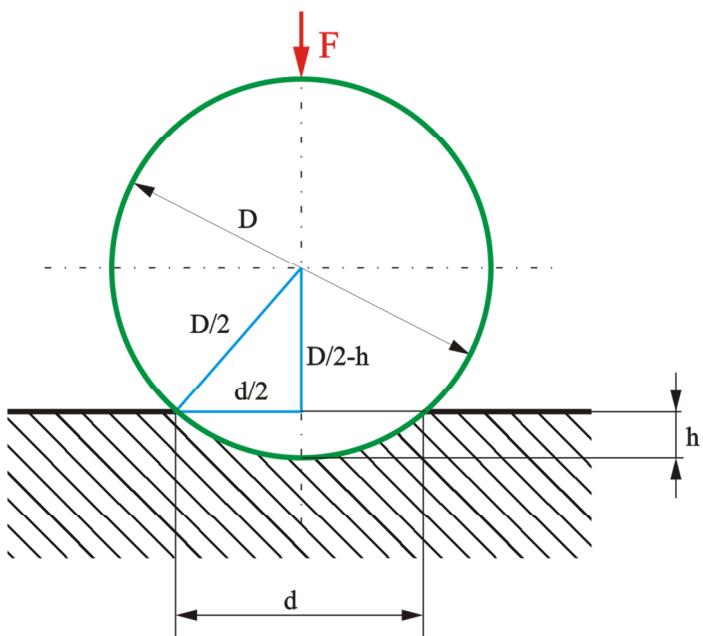
$$A = \pi \cdot D \cdot \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}; \text{ odnosno:}$$

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Budući da se sila očitava u [N], treba «stari» izraz korigirati, tj. [N]-e "vratiti" u napuštene [kp]-e dijeljenjem s 9,81. Konačno se dobije:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{9,81 \cdot \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ [stupnjeva Brinellove skale].}$$

Veličina koju trebamo izmjeriti je promjer otiska  $d$ . Najbolji rezultati mjerena su oni pri kojem je promjer otiska  $d \approx 0,3 \div 0,4 \cdot D$ .



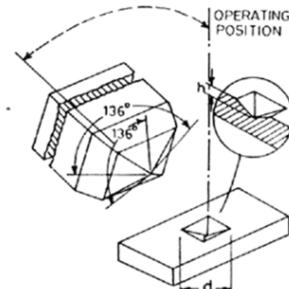
Slika 14.18. Geometrija postupka Brinellovom metodom

### 14.3.2.2 Ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom (HV)

Ispitivanje Vickersovom metodom služi za srednje tvrde i tvrde materijale, jer je penetrator dijamantna piramida s pravokutnom bazom. Iz omjera standardne sile  $F[\text{N}]$  i površine otiska četverostrane piramide  $A[\text{mm}^2]$  vršnog kuta  $136^\circ$ , dobiva se tvrdoća HV, vidi *sliku 14.19*.

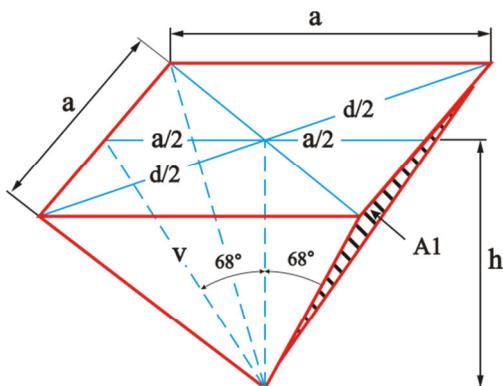
Tvrdoća je prema Vickersu mjeru otpornosti materijala prema prodiranju četverostrane dijamantne piramide. Predstavlja omjer standardne sile opterećenja i površine otiska četverostrane piramide:

$$HV = \frac{F}{A}.$$



Izvod izraza za HV:

Promotrimo li izgled otiska nakon rasterećenja na *slici 14.20.*:



*Slika 14.20. Geometrija postupka prema Vickersu*

$$\begin{aligned} a &= \frac{d}{\sqrt{2}}; v = \frac{a}{2 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 68^\circ}; \text{ odnosno} \\ A_1 &= \frac{a \cdot v}{2} = \frac{\frac{d}{\sqrt{2}} \cdot \frac{d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 68^\circ}}{2} = \frac{d^2}{8 \cdot \sin 68^\circ}; \quad a \\ \text{ukupna površina otiska } A \text{ je:} \\ A &= 4 \cdot A_1 = 4 \cdot \frac{d^2}{8 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ}; \text{ odnosno:} \\ HV &= \frac{F}{A} = \frac{F \cdot 2 \cdot \sin 68^\circ}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2}. \end{aligned}$$

Budući da se sila čita u [N], treba «stari» izraz korigirati, tj. [N]-e «vratiti» u napuštene [kp]-e dijeljenjem s 9,81. Konačno se dobije:

$$HV = \frac{F \cdot 2 \cdot \sin 68^\circ}{9,81 \cdot d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad [\text{stupnjeva Vickersove skale}]$$

U ovom izrazu uočavamo da je jedina veličina koju trebamo izmjeriti dijagonala "d" baze piramide. Zbog anizotropnosti materijala ovaj otisak nije uvek pravilan, pa je potrebno izmjeriti obje dijagonale, a u tablicu se ulazi sa srednjom mjerom  $d = d_{sr} = \frac{d_1 + d_2}{2}$ .

Opterećenje  $F$  može biti različito: (5, 10, 20, 30, 50 ili 100) x 9,81 [N], a bira se ovisno o tvrdoći ispitivanog materijala (manje opterećenje za mekše materijale, da otisak ostane unutar mjerne skale, tj. da ne bude prevelik).

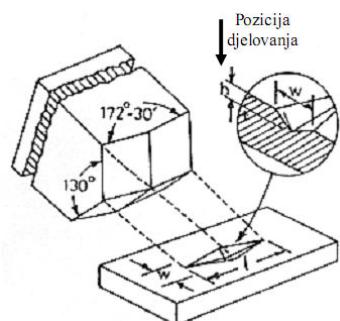
Ovim se postupkom mogu ispitivati mikrotvrdoće, ali u tom slučaju opterećenje je reda veličine do samo nekoliko [N], a dijagonale se mijere na istom aparatu pomoću povećala s ugraviranom mernom skalom i točnošću od 0,001 mm.



*Slika 14.21. Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Vickers-u*

### 14.3.2.3 Ispitivanje tvrdoće Knoopovom metodom

Slično je ispitivanju Vickersovom metodom, samo je piramida s bazom u obliku izduženog romba radi lakšeg očitavanja duljine dijagonala otiska (*slika 14.22*). Penetrator je sitan i mogu se bosti pojedinačne faze u materijalu, pa se ova metoda koristi za ispitivanje mikrotvrdoće. Očitavanje rezultata je slično kao i kod prethodnih metoda - omjer standardne sile (desetinke 1 N) i površine otiska. Ove tri metode utiskivanja penetratora radi provođenja plastične deformacije kao mjeru tvrdoće daju različite vrijednosti tvrdoće na istom materijalu. Naime, tvrdoća je prema Brinellu prosječna vrijednost tvrdoće materijala, jer penetrator zahvaća široko područje. Kod krupnozrnatog materijala tvrdoća prema Vickersu može dosta oscilirati, ovisno o tome koje se faze u većoj mjeri nađu pod penetratorom. Mikrotvrdoća daje vrijednosti pojedinih faza u materijalu, koje se mogu jako razlikovati ako se u mekoj matrici nalazi tvrda faza ili obrnuto.



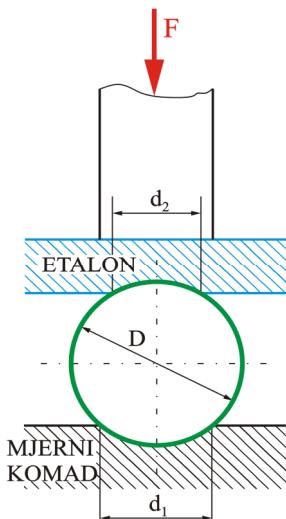
*Slika 14.22. Ispitivanje tvrdoće Knoopovom metodom*

### 14.3.2.4 Ispitivanje tvrdoće prema Poldyu

Jednostavno ispitivanje usporedbom otiska na poznatom i mjenom materijalu provodi se metodom Poldy (*slika 14.23.*). Otisci se dobivaju udarcem čekića po držaču kuglice i etalonu od materijala poznate tvrdoće, po ispitivanom materijalu. Promjeri otiska se izmjere i iz tablica očita vrijednost tvrdoće preračunata u Brinelle. Unutar razumnih raspona sile udarca postupak nije osjetljiv na razlike te veličine u pojedinim udarcima. Postoje i držači s osiguračima od zakaljenoga čelika koji pucaju pod udarcem i time daju standardnu силу za otisak. Uredaj je jednostavan i prenosiv, a mjerjenje se može provoditi u svim položajima. Zakaljena čelična kuglica promjera  $D=10\text{mm}$  utiskuje se istodobno u površinu uzorka materijala kojem mjerimo tvrdoću s donje strane i u etalon pozname čvrstoće s gornje strane, prema slici. Udarcem čekića zakaljena kuglica ostavlja otisak i na etalonu i na površini metala kojem mjerimo tvrdoću. Ovim postupkom zapravo se mjeri tvrdoća uzorka prema Brinellu  $\text{HB}_{uz}$  uz poznatu tvrdoću etalona  $\text{HB}_{et}$  koje

$$0,204 \cdot F$$

stoje u omjeru: 
$$\frac{\text{HB}_{uz}}{\text{HB}_{et}} = \frac{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_2^2})}{0,204 \cdot F}$$
, odakle je 
$$\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_2^2})$$



*Slika 14.23. Ispitivanje tvrdoće prema Poldyu*

Standardni etalon ima čvrstoću  $Rm = 70 \cdot 9,81 = 686.7 [\text{N/mm}^2]$ , tj. tvrdoću  $\text{HB}_{et}= 197$ .

Kako svi etaloni (probni štapovi) nemaju istu čvrstoću, uveden je korekcijski faktor "f" koji je

omjer stvarne i standardne čvrstoće etalona:  $f = \frac{\text{Rm}_{stvarni\_et.}}{\text{Rm}_{standardni\_et.}}$

kojim množimo vrijednost tvrdoće očitane iz tablica!

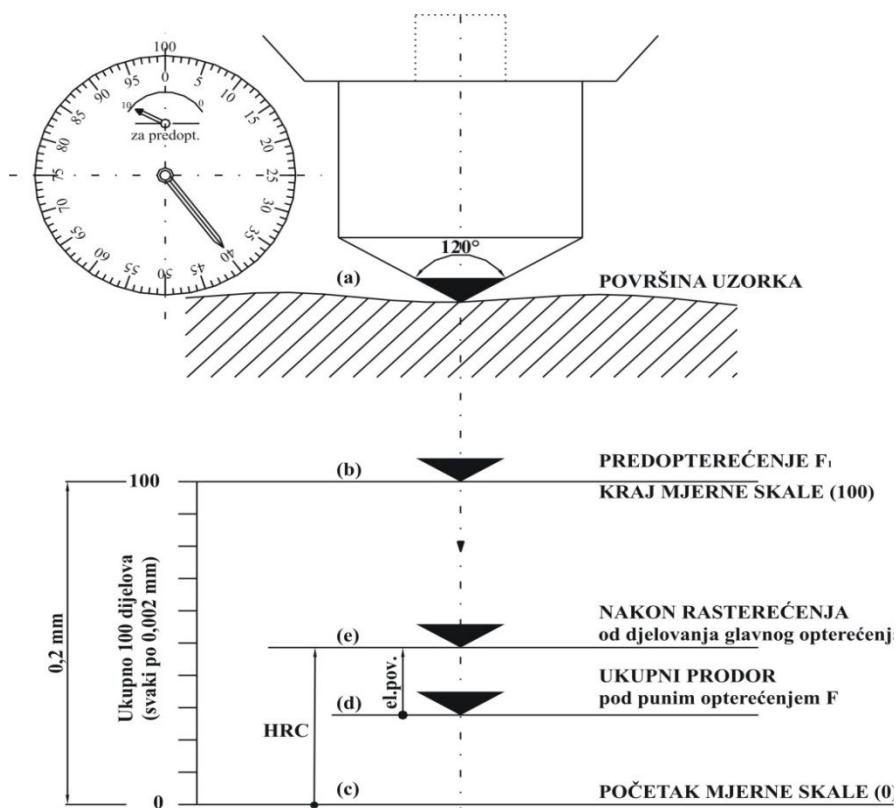
#### 14.3.2.5 Ispitivanje tvrdoće Rockwellovom metodom

##### *Rockwell C - HRC*

Utiskivanje penetratora provodi se i kod ispitivanja tvrdoće Rockwellovom metodom, samo se ovdje mjeri elastični povrat penetratora nakon rasterećenja. Penetrator je dijamantni stožac vršnog kuta  $120^\circ$ . Kako bi se izbjegle netočnosti zbog površinskih nehomogenosti, penetrator se prethodno optereti silom predopterećenja  $F_1 = 98,1 \text{ [N]}$ , prema starim jedinicama  $10[\text{kp}]$ . Nakon predopterećenja na instrumentu se podešava mjerena skala na oznaku 100. Mjerena skala je duljine  $0,2\text{mm}$  podijeljena na 100 dijelova. Utiskivanje se vrši dodavanjem standardne sile  $F_2 = 1373,4 \text{ [N]}$ , prema starim jedinicama  $140[\text{kp}]$ , pri čemu penetrator prodre do određene dubine. Ukupna sila na penetrator iznosi  $F = F_1 + F_2 = 1471,5 \text{ [N]}$ , prema starim jedinicama  $150 \text{ [kp]}$ . Nakon rasterećenja penetratora, elastični povrat vraća natrag penetrator, što se očitava na skali instrumenta u jedinicama Rockwella. Obrisak Rockwell penetratora je jedva vidljiv na površini ispitivanog materijala, koja također treba biti obradena i poravnata (*slika 14.25.*) Oznaka tvrdoće je u jedinicama Rockwella, uz oznaku penetratora. Za tvrde materijale kao penetrator se koristi dijamantni stožac, pa je oznaka HRC (od *hardness - tvrdoća i cone - stožac*). Ova se metoda primjenjuje na sve metalne materijale čija je tvrdoća od 20 HRC do 70 HRC. Preciznost mjerena kod radioničkih aparata iznosi  $\pm 1,5 \text{ HRC}$ .



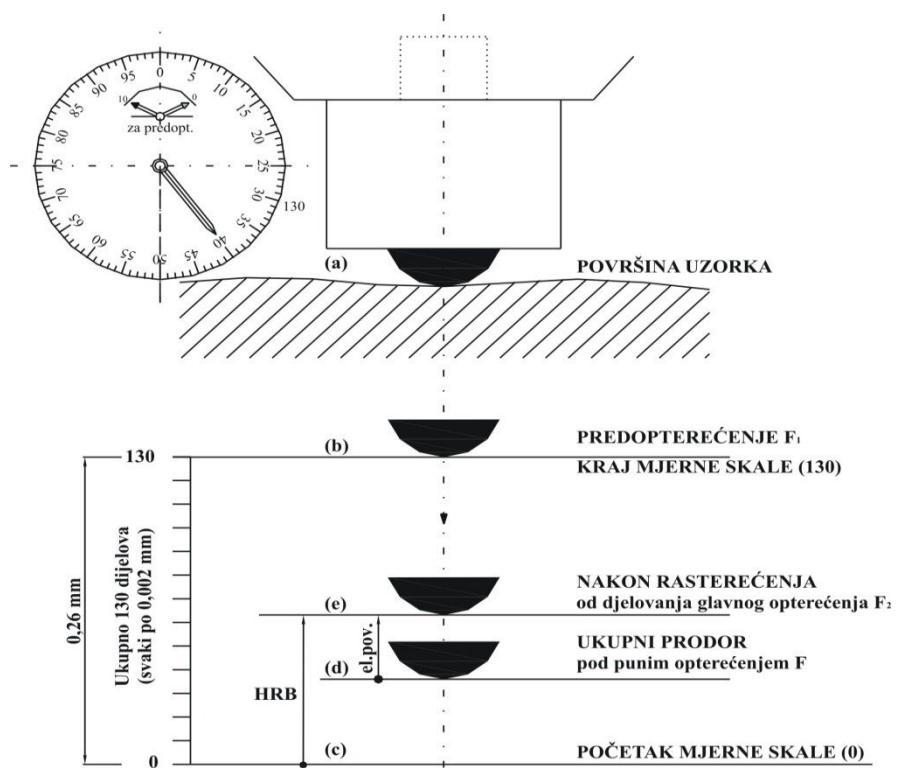
*Slika 14.24. Uredaj za ispitivanje tvrdoće prema Rockwellu*



*Slika 14.25. Ispitivanje tvrdoće po "Rockwell C" metodi*

## **Rockwell B - HRB**

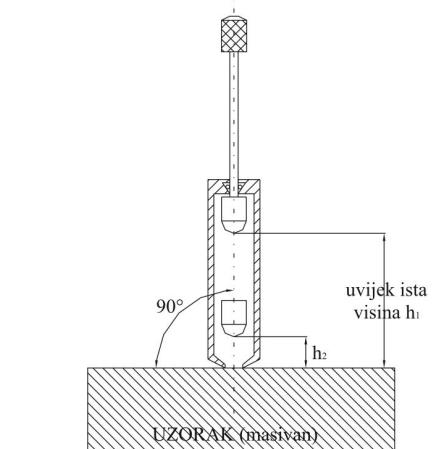
Ova metoda mjerena je analogna prethodnoj. Penetrator je zakaljena kuglica promjera  $\varnothing 1/16"$ . Sila predopterećenja ostaje ista, tj.  $F_1 = 98,1\text{[N]}$ . Glavno opterećenje sada iznosi  $F_2 = 882,9\text{[N]}$ , ukupna sila je  $F = 981\text{[N]}$ . Mjerna skala je duljine 0,26mm, ali je podijeljena na 130 dijelova što omogućuje korištenje istog već ugrađenog komparatora na aparatu za mjerjenje, vidi *sliku 14.26*. Ova se metoda primjenjuje na sve srednje tvrde metalne materijale čija je tvrdoća od 35 HRB do 130 HRB. Preciznost mjerjenja kod radioničkih aparata iznosi  $\pm 2\text{ HRB}$ .



*Slika 14.26. Ispitivanje tvrdoće po "Rockwell B" metodi*

### **14.3.2.6 Ispitivanje tvrdoće Shoreovom metodom**

Ispitivanje tvrdoće Shoreovom metodom zasniva se također na elastičnom povratu materijala, ali bez utiskivanja penetratora kao kod Rockwellove metode. Uređaj je jednostavan i prenosiv, a posebna obrada površine nije potrebna (*slika 14.27.*). Sa standardne visine ispušta se mali batić na ispitivanu površinu, od koje odskoči nazad. U najvišoj točki odskoka zaustavi se kočnicom. Visina odskoka je uvijek manja od početne visine pada za iznos utrošen na plastičnu deformaciju podloge i elastične valove u metalu. Kod mekših materijala je odskok niži nego kod tvrdih. Visina odskoka u milimetrima se preko tablice preračunava u



*Slika 14.27. Ispitivanje tvrdoće prema Shoreu*

vrijednost tvrdoće prema Brinellu. Postoje uređaji s induktivnim očitavanjem položaja batića nakon odskoka i brojčanim prikazom rezultata.



**Slika 14.28. Shoreov skleroskop**

#### 14.3.2.7 Ostali načini ispitivanja tvrdoće

Tvrdoća se može mjeriti i preko promjene brzine zvuka u metalu ultrazvučnim tvrdomjerima. Prilikom ispitivanja površina se ne ošteće, a očitavanje tvrdoće je u Brinellima ili drugim mjerama. Uređaj ima ugrađeno računalo za preračun različitih vrijednosti tvrdoće (*slika 14.29*). Mjerenje se zasniva na promjeni brzine zvuka u metalu zbog promjene modula elastičnosti zbog promjene tvrdoće.

Tvrdoća se također može mjeriti i preko promjene otpora induciranim vrtložnim strujama ili permanentnog magnetizma, ali su za ta mjerenja potrebni dobri etaloni za umjeravanje uređaja.

Sva spomenuta mjerenja tvrdoće daju rezultate koji jako ovise o primijenjenoj metodi. Izravan preračun jednih veličina u druge nije moguć bez tablica koje su dobivene usporednim ispitivanjem istih materijala.

Mjerenje tvrdoće ne zavisi od usmjerenoosti strukture kao što je to slučaj kod rastezne čvrstoće. Čvršći materijali su u pravilu i tvrdi, ali se ne može postaviti opća zakonitost za sve materijale. Procjena čvrstoće prema izmjerenim vrijednostima tvrdoće može se provesti prema sljedećoj orijentacijskoj tablici:

Ocjena čvrstoće u MPa iz vrijednosti tvrdoće u Brinellima:

$$R_m = c \cdot HB [N/mm^2]$$



**Slika 14.29. Ultrazvučno mjerjenje tvrdoće**

<b>Materijal:</b>	Ugljični čelik	Visokolegirani čelik (Cr)	Visokolegirani čelik (Cr-Ni)
<b>Koefficijent c:</b>	3,6	3,5	3,4

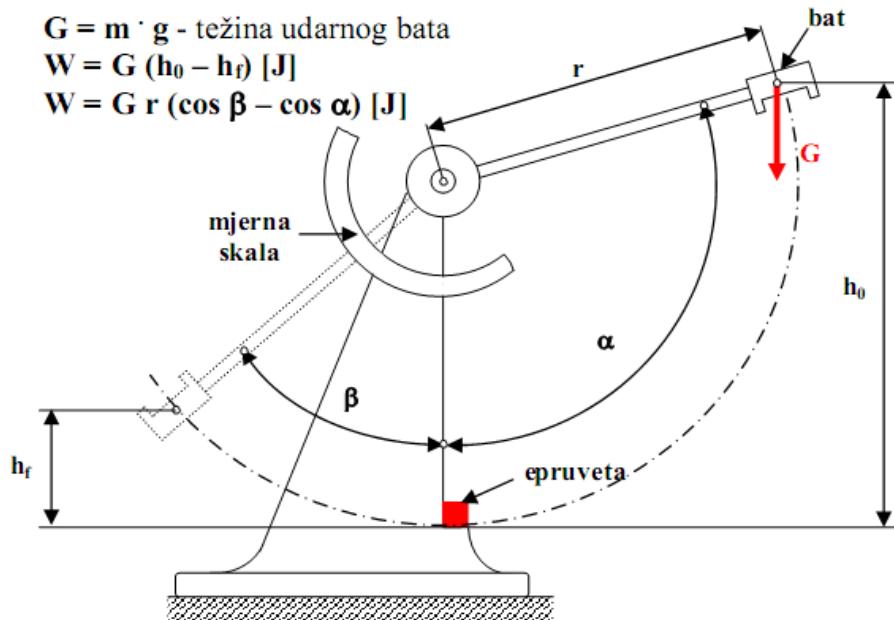
Aparati za mjerenje tvrdoća najčešće su univerzalni, tako isti uređaj može mjeriti tvrdoću različitim metodama, jednostavnom promjenom sile opterećenja i zamjenom penetratora.

### 14.3.3 Žilavost materijala

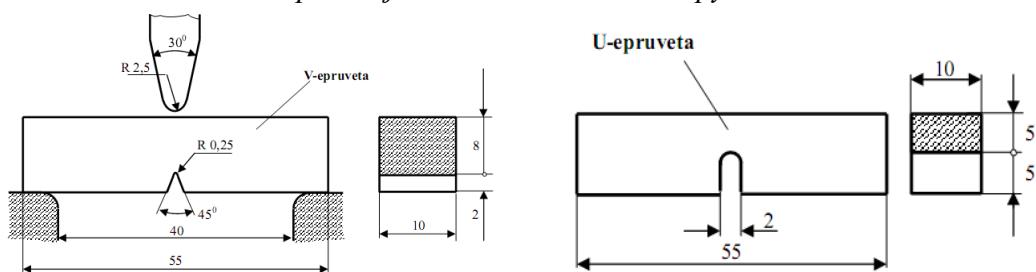
Žilavost materijala općenito se definira kao otpornost na lom. Za razliku od čvrstoće ovdje je mjera otpornosti na lom uglavnom utrošena energija na razdvajanje čestica materijala. Ova energija zavisi od vrste materijala i čvrstoći veza, ali i od načina i smjera širenja pukotine, vrste opterećenja i temperature materijala pod opterećenjem. Vidljivo je da kod ovolikog broja utjecajnih činitelja nije lako jednoznačno odrediti žilavost. Postoji veći broj ispitivanja, a sva se zasnivaju na ispitivanju uzorka s oštrim zarezom, odnosno koncentratorom naprezanja.

Napomena: Ispitivanja rastezne čvrstoće provode se na glatkim uzorcima, dok ispitivanje žilavosti oponaša opterećenje metala s oštrim zarezom, odnosno pukotinom!

Najčešće se kod nas provodi ispitivanje Charpyevom metodom, vidi *sliku 14.30*. Epruveta je malena, kvadratnog presjeka i zarezana na jednoj strani po sredini (*slika 14.31*).



*Slika 14.30. Ispitivanje udarne žilavosti Charpyevom metodom*



*Slika 14.31. Epruvete za Charpy ispitivanje sa "V" žlijebom i sa "U" žlijebom*

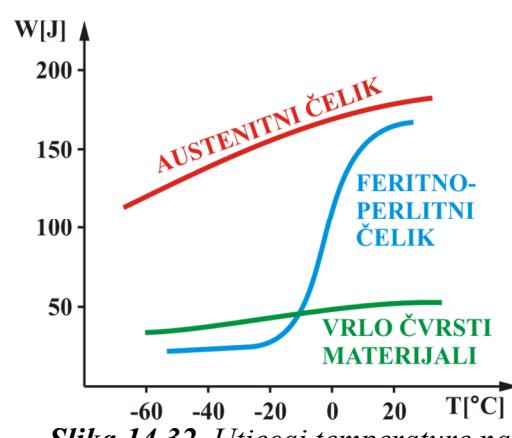
Epruvete sa "V" žlijebom se upotrebljavaju za žilavije materijale, npr. niskougljične čelike, dok se epruvete sa "U" žlijebom upotrebljavaju za krte materijale.

Udarcem bata epruveta se lomi na osloncu uređaja za ispitivanje žilavosti. Mjera žilavosti je utrošena energija bata W za lom epruvete u Jouleima, izmjerena iz razlika energije bata prije i nakon loma. Kritični dio za ispitivanja je priprema zareza na epruveti (bitan je radijus zaobljenja u vrhu zareza, kao koncentrator naprezanja).

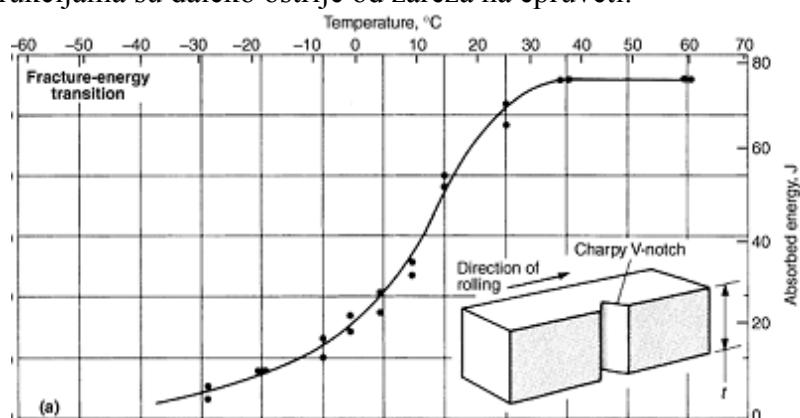
Rezultati ispitivanja žilavosti pokazuju dosta velika rasipanja, pa se obično lome tri epruvete i nalazi srednja vrijednost iz tri mjerena. Uzorci uzeti u smjeru i okomito na smjer valjanja pokazuju velike razlike u žilavosti ako su vlakna u materijalu jače izražena.

Na veličinu žilavosti utječe i temperatura ispitivanja, vidi slike 14.32 i 14.33. Feritni čelici pokazuju naročito izraženi pad žilavosti ispod neke kritične temperature  $T_{kr}$ .

Osim loma, kao mjera žilavosti koristi se veličina poprečnog izbočenja epruvete na mjestu loma (mjera plastičnosti kod loma), te udio površine žilavog loma u površini prijeloma epruvete. Svako od ovih mjerila ima prednosti i nedostatke, ali se u strojarskoj praksi najviše ustalilo prikazivanje energije loma u Joulima. Osnovna kritika ispitivanja žilavosti udarcem po zarezanoj epruveti je u tome da je volumen ispitivanog materijala preveliki da sa ostvare uvjeti slični lomu u stvarnim konstrukcijama, te da lom najčešće ne započinje uslijed udarca, nego pod statičkim opterećenjem. Osim toga, pukotine u stvarnim konstrukcijama su daleko oštrienje od zareza na epruveti.



Slika 14.32. Utjecaj temperature na vrijednost žilavosti



Slika 14.33. Utjecaj temperature na vrijednost žilavosti kod niskougljičnog čelika

Postoje još mnoga ispitivanja žilavosti materijala i to na velikim epruvetama dimenzija nekoliko  $m^2$ , srednje velikim epruvetama, sa zarezima napravljenim piljenjem i proširenim zamorom radi simuliranja stvarne pukotine. Ova su ispitivanja jako skupa, ali daju pouzdanije rezultate. Pokušaji dobivanja korelacije između ispitivanja na velikim i malim uzorcima još nisu dali povoljne rezultate. Za sada se u strojarskoj praksi prihvataju rezultati ispitivanja udarne žilavosti kao valjano mjerilo žilavosti materijala u konstrukciji.

Općenito nema korelacije između čvrstoće i tvrdoće i žilavosti materijala.

#### 14.3.4 Probe plastičnog deformiranja

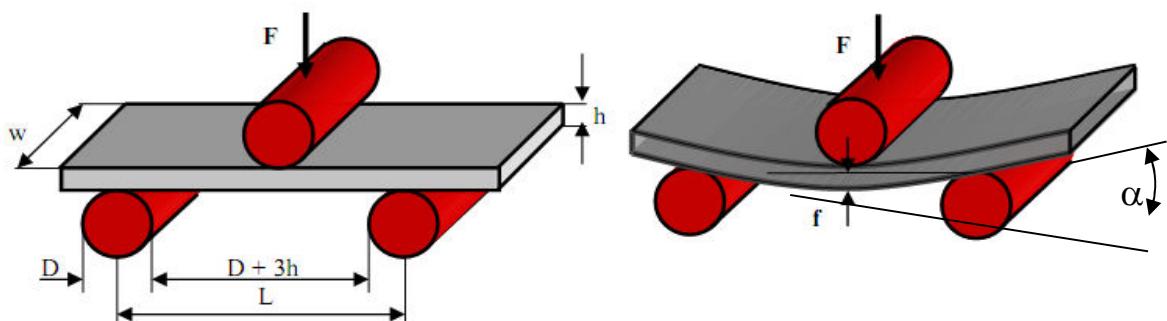
Česta je proba savijanjem epruvete iz ispitivanog materijala. Epruveta se savija preko trna određenog promjera. Ovo ispitivanje upotrebljava se za određivanje savojne čvrstoće i sposobnosti deformacije materijala niske rastezljivosti. Postupak ispitivanja materijala na savijanje moguće je izvesti na univerzalnim kidalicama pri sobnoj temperaturi ( $20^\circ C$ ).

Epruvete imaju pravokutni, kvadratni ili okrugli presjek, a ispituju se i profili. Debljina epruvete "h" nije veća od 30 mm. Širina pravokutnih epruveta "w" iznosi od 25 do 50 mm.

Preporučuje se duljina epruvete  $l = 5 \cdot h + 150\text{mm}$ . Promjer gornjeg valjka određuje se zavisno od materijala koji se ispituje, a propisan je standardima.

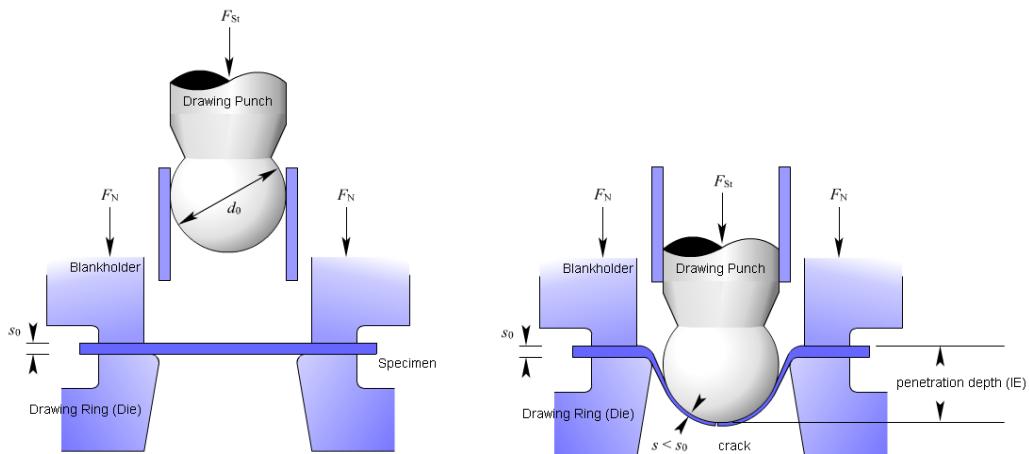
Za savijanje se koriste dva oslonca promjera "D": za  $h \leq 12\text{mm} \rightarrow D = 50\text{mm}$   
 $h > 12\text{mm} \rightarrow D = 100\text{mm}$ .

Savijanje mora biti polagano i neprekinuto do određenog kuta " $\alpha$ ". Mjera ispitivanja je kut savijanja " $\alpha$ " do pojavljivanja pukotine (ako do nje uopće dođe). Rastezljiviji materijali mogu se saviti za  $180^\circ$  oko trna, dok se čvršći materijali savijaju za manji kut. Uspješnost savijanja oko trna nekog materijala upućuje na mogućnost hladnog oblikovanja materijala, ali i na sigurnost u slučaju havarije sa znatnim deformacijama, tj. da neće doći do pucanja, nego samo gnječenja materijala. U tom slučaju ispitivanje savijanjem je također mjera otpornosti na lom materijala pri velikim deformacijama. Pokus je vrlo jednostavan i često se koristi kao osnovno terensko ispitivanje materijala, vidi *sliku 14.34*.



*Slika 14.34. Proba savijanjem*

U slučajevima kada se materijal obraduje hladnim tiskanjem, proba plastičnosti se provodi trnom sa kuglastim vrhom koji se utiskuje u lim (proba po Ericssonu). Mjera uspješnosti je dubina utiskivanja do pojave pukotine na ispuštenom dijelu lima kao na *slici 14.35*.



*Slika 14.35. Proba tiskanjem*

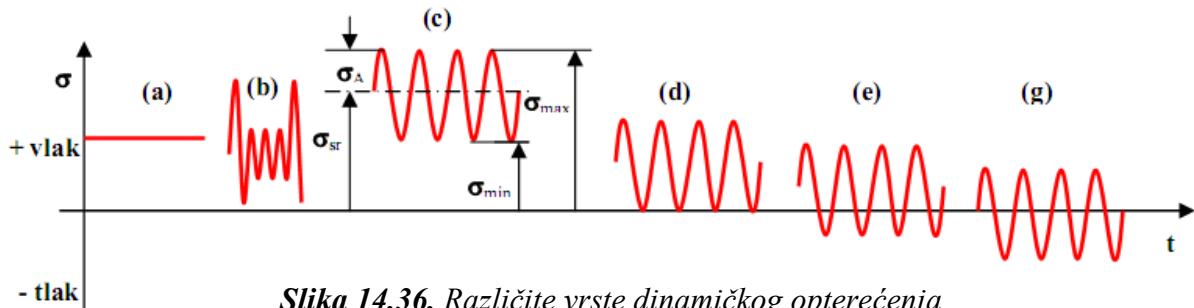
#### 14.3.5 Ispitivanje dinamičke izdržljivosti materijala

Dinamička izdržljivost materijala je osnovna veličina kojom se ide u proračun dinamički opterećenih konstrukcija. Dinamičko naprezanje (*slika 14.36*) može biti:

- *Istosmjerno* - krivulje (b), (c) i (d)
- *Izmjenično* - krivulje (e) i (g).

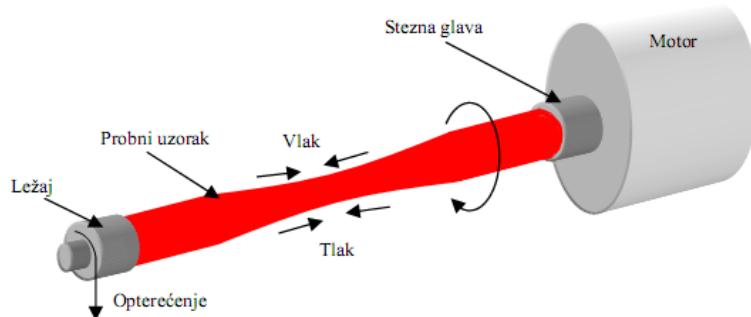
Posebno su značajna sinusoidalna naprezanja:

- *Pusirajuće ili titrajno dinamičko opterećenje*- krivulja (d)
- *Njihajuće ili kolebljivo dinamičko opterećenje*- krivulja (g).



*Slika 14.36. Različite vrste dinamičkog opterećenja*

U pravilu je dinamička izdržljivost materijala veća od dinamičke izdržljivosti konstrukcije izrađene iz tog materijala, jer su uzorci za ispitivanje dinamičke izdržljivosti standardizirane površinske obrade (obično polirani). Veličina dinamičke izdržljivosti također se izražava u MPa kao i čvrstoća materijala, a dobiva se ispitivanjem na umaralicama kao granično naprezanje kod kojeg ne dolazi do loma bez obzira na broj promjena opterećenja, vidi *sliku 14.37.*



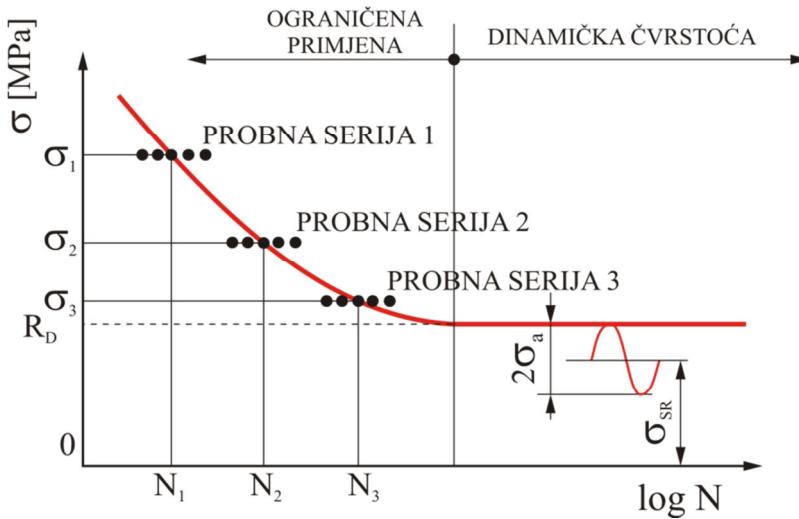
*Slika 14.37. Rotacijska umaralica*

Postoje umaralice sa aksijalnim ili savojnim opterećenjem (*slika 14.38*), te s torzijom. Ispitivanja su dugotrajna jer se obično ispituje preko  $10^6$  promjena opterećenja.

Osim glatkih standardnih uzoraka mogu se ispitivati i tipični spojevi i dijelovi strojeva, kao i cijeli uređaji, strojevi i vozila. Ova ispitivanja su vrlo skupa, ali daju dobar uvid u pouzdanost konstrukcije u radnim uvjetima. Za serijske proizvode ova ispitivanja omogućavaju smanjenje težine i veću trajnost proizvoda. Ispitivanje se provodi na velikom broju uzoraka. Za svako opterećenje (probnu seriju) ispituje se nekoliko epruveta, a broj ciklusa do puknuća je srednja dobivena vrijednost. Ispitivanje se provodi za različita opterećenja (naprezanja) i to počevši od većih prema manjim opterećenjima. Mjeri se broj ciklusa - promjena opterećenja do pucanja epruvete. Rezultati se prikazuju u Woehlerovom dijagramu u logaritamskom mjerilu (*slika 14.39.*)



*Slika 14.38. Savojna umaralica*



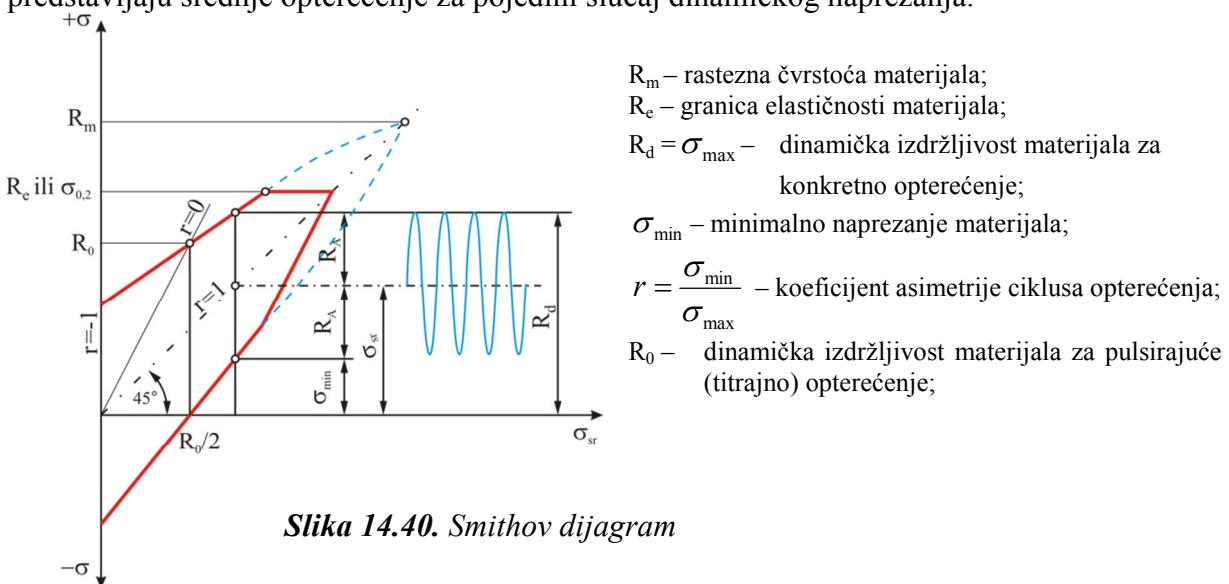
**Slika 14.39.** Woehlerova krivulja

Primjenom većeg naprezanja, npr.  $\sigma_1$  epruveta izdrži manji broj ciklusa  $N_1$ . Smanjenjem naprezanja povećava se broj ciklusa koje epruveta izdrži. Kada se naprezanje smanji na razinu dinamičke izdržljivosti  $R_d$ , epruveta praktično može izdržati beskonačan broj ciklusa. Vidimo da se ona kod određenog broja titraja asimptotski približava vrijednosti  $R_d$  (praktično za čelik se uzima  $N=10^7$ , a za luke metale  $N=10^8$ ).

**Omjer izdržljivosti** predstavlja omjer između granice izdržljivosti i vlačne čvrstoće materijala za određeno dinamičko opterećenje:

$$\text{omjer izdržljivosti} = \frac{R_d}{R_m}$$

Svaka Woehlerova krivulja vrijedi samo za određenu vrstu dinamičkog opterećenja u kombinaciji s određenim statičkim opterećenjem. U praksi nam ona služi kao osnova za konstrukciju Smithova dijagrama, *slika 14.40*. Smithov dijagram nam pokazuje dinamičku izdržljivost materijala  $R_d$  za različite vrste dinamičkog opterećenja  $\sigma_a$ , i različite veličine srednjeg naprezanja  $\sigma_{sr}$ . Područje unutar granica Smithova dijagrama predstavlja sve moguće kombinacije dinamičkog opterećenja. Točke na pravcu povučenom pod kutom  $45^\circ$  predstavljaju srednje opterećenje za pojedini slučaj dinamičkog naprezanja.



**Slika 14.40.** Smithov dijagram

Nije dopušteno opterećivati konstrukcije iznad granice elastičnosti. U dijagramu je ograničeno područje dopuštenog dinamičkog opterećenja s istosmjernim naprezanjem, i to upravo s

veličinom granice elastičnosti materijala  $R_e$ , odnosno  $\sigma_{0,2}$  za materijale bez izražene granice elastičnosti.

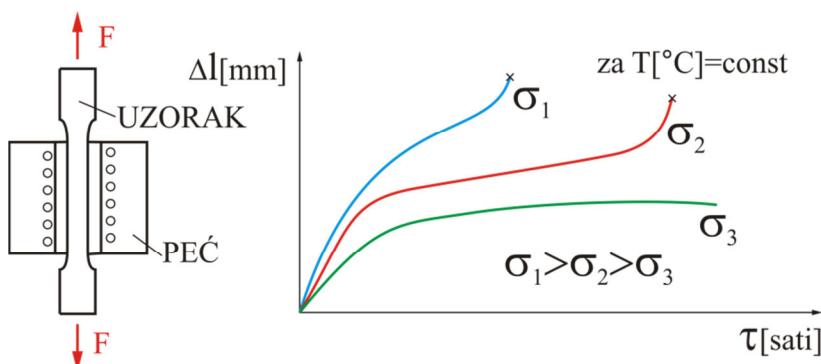
Korozija smanjuje dinamičku izdržljivost, jer ubrzava nastanak i rast pukotina uslijed zamora.

U Woehlerovu dijagramu na *slici 14.41.*, mogu se zapaziti dva područja, i to područje visokih naprezanja s izmjeničnim plastičnim deformacijama, kada lom nastupa u manjem broju ciklusa opterećenja, te područje elastičnih deformacija, kada lom nastupa nakon više od  $10^5$  ciklusa opterećenja.

Neki materijali, posebno aluminij, ne pokazuju trajnu dinamičku izdržljivost, nego stradaju pri konačnom broju promjena opterećenja. Uslijed promjenljivog opterećenja očvrsnuti metali mogu omekšati, a meki očvrsnuti (Bauschingerov efekt).

#### 14.3.6 Ispitivanje puzanja materijala

Ispitivanje puzanja je dugotrajan proces na temperaturama pri kojima dolazi do plastične deformacije uslijed strukturnih promjena u metalu. Puzanje je jako izraženo na temperaturama višim od temperature rekristalizacije. Postoje tri parametra čiji se međusobni odnos mjeri: visina statičkog opterećenja, temperatura i trajanje opterećenja do postizanja dopuštene deformacije. S obzirom na dugotrajnost ispitivanja, ova ispitivanja su obično u području istraživačkih radova za pojedine materijale i ne ponavljaju se za pojedine šarže. Shema ispitivanja prikazana je na *slici 14.42.*

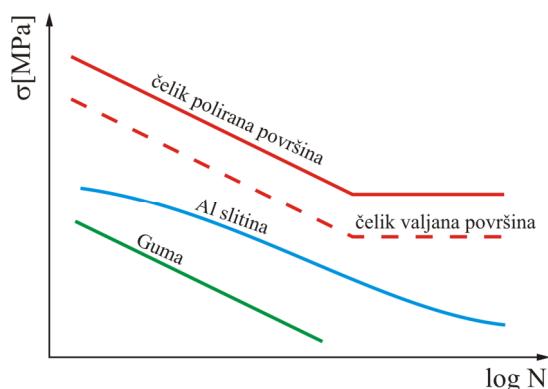


*Slika 14.42. Ispitivanje na puzanje i prikaz rezultata*

Uzorak ispitivanog materijala se rasteže stalnom silom preko odgovarajućeg polužja. Epruveta je smještena u peći i grijе se na potrebnu temperaturu. Mjeri se deformacija u određenom vremenu, a s više epruveta (i više uređaja) varira se bilo temperatura, bilo opterećenje.

Bitan činitelj procesa puzanja su difuzijski procesi u materijalu pod opterećenjem, gdje dodatno mehaničko naprezanje daje dopunsку energiju za strukturne promjene.

Proces puzanja izaziva nastanak vakancija u materijalu, koje se vremenom okrupnjuju do mikropukotina, a zatim do pukotina. U završnom stadiju puzanja ima toliko vakancija da rastezljivost materijala pada, i to nepovratno.



*Slika 14.41. Woehlerov dijagram za različite materijale*

Dijelovi podvrgnuti puzanju dimenzioniraju se na način da se izazovu samo dopuštena odstupanja dimenzija za vrijeme trajanja konstrukcije. Konstrukcije koje su izložene naprezanjima na temperaturama višim od  $200^{\circ}\text{C}$ , veća se važnost pridaje puzavosti materijala nego granici plastičnosti  $\sigma_p$  ili čvrstoći materijala  $\sigma_m$ . Kao mjeru otpornosti materijala na puzanje, uveden je pojam *granica puzavosti*. To je ono naprezanje koje daje najveću dozvoljenu brzinu rastezanja (defomacije) na sat, uobičajeno  $10^{-4}$  ili  $10^{-5}$  % na sat. Uobičajeno označavanje granice puzavosti je na primjer  $\sigma_{1/10000}^{200}$ , gdje  $\sigma$  predstavlja ono naprezanje koje će pri temperaturi  $200^{\circ}\text{C}$  izazvati deformaciju 1% u vremenu 10.000 sati tj.  $10^{-4}\%$  na sat.

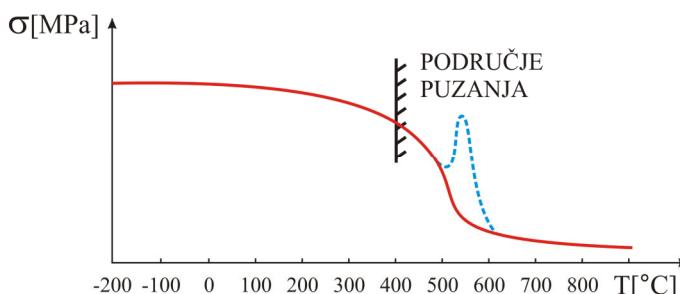
*Granica lomne puzavosti*  $\sigma_L$  je najveće naprezanje koje materijal može podnijeti, pri određenoj povišenoj temperaturi, određeno vrijeme bez loma. Granice lomne puzavosti najčešće se određuju za 10.000 ili 100.000 sati ( $\sigma_{L/10.000}$  ili  $\sigma_{L/100.000}$ ).

Konstrukcije izložene povišenim temperaturama moraju se dimenzionirati uzimajući u obzir temperaturu te njihov vijek trajanja i dozvoljenu deformaciju. Kod manje važnih konstrukcija (npr. dijelovi peći), mogu se dozvoliti relativno velike deformacije, dok se kod odgovornih konstrukcija (lopatice plinskih turbina -  $500^{\circ}\text{C}$ , mlaznih motora -  $900^{\circ}\text{C}$ ) može dozvoliti samo vrlo mala puzavost kako bi se izbjegao lom.

#### 14.3.7 Utjecaj okoliša na mehanička svojstva materijala

Čimbenici utjecaja na svojstva materijala u nekom okolišu mogu biti temperatura, snopovi energije i čestica, te korozija. Svi ovi činitelji degradiraju neka mehanička svojstva materijala.

Povišenjem temperature gubi se trajna statička čvrstoća materijala, jer dolazi do puzanja. Pad čvrstoće je vrlo brz u području temperatura rekristalizacije, kako je pokazano na slici 14.43 za ugljični čelik. Snižavanjem temperature donekle raste čvrstoća i tvrdoća, ali pada žilavosti. Neki materijali zbog izlučivanja sekundarnih faza imaju intervale povišenih temperatura s izrazitim povećanjem čvrstoće i padom rastezljivosti (isprekidana linija na slici 14.43). Treba izbjegavati bilo kakvu obradu tih materijala na povišenim temperaturama, jer dolazi do trajnih promjena svojstava.



Slika 14.43. Utjecaj temperature na promjenu čvrstoće čelika

Snopovi energije i čestica oštećuju strukturu metala. Najštetniji utjecaj ima neutronsko zračenje, koje se javlja kod nuklearnih reakcija. Materijal gubi rastezljivost i žilavost, a čvrstoća pada. Istodobno može doći do porasta volumena zbog pretvorbe elemenata u izotope i oslobođanja plinova iz nuklearnih reakcija. Ovakav materijal nakon određenog vijeka trajanja treba zamijeniti jer lako dolazi do širenja pukotina. Ako ozračivanjem nastanu radioaktivni izotopi, takav se materijal ne bi smio koristiti kao otpadni metal za ponovnu preradu.

Polimerni materijali su jako osjetljivi na zračenja. Već ultraljubičasto zračenje sunca brzo izaziva starenje polimera, koji postaju krhki i nerastezljivi. Uz djelovanje vlage nastaju i površinske pukotine koje prodiru u dubinu materijala. Zračenja viših energija još jače oštećuju polimere. Pod djelovanjem zračenja dolazi do intenzivnog poprečnog vezivanja polimernih lanaca, čime se dobiva kruti materijal.

U nekim se slučajevima polimeri namjerno umrežavaju zračenjem za postizanje visoke čvrstoće ili naknadne kontrakcije kod zagrijavanja (slika 14.44.).

Promjena fizikalnih svojstava nekih materijala djelovanjem zračenja koristi se za različite svrhe - fotoni svjetlosti omogućavaju električnu vodljivost poluvodiča i tok struje, pobuda elektrona u nekim tvarima omogućava praktički istovremeno obrušavanje svih pobuđenih

elektrona za isti energetski pad, što daje koherentno zračenje (laser). Polarizacija koloidnih čestica izaziva velike promjene viskoznosti i prozračnosti nekih suspenzija (tekući kristali). Bombardiranjem površina materijala ionima stranih elemenata postižu se različita svojstva površina.

Korozivni procesi predstavljaju najčešći razlog ograničenog roka trajanja konstrukcija ili dijelova konstrukcija. Tako, primjerice, brod kao cjelina može znatno dulje trajati od nekih brodskih dijelova. Korozija najčešće nije svugdje jednolično raspodijeljena. Najviše propadaju dijelovi trupa na razdjelnici more-zrak, najmanje uronjeni dijelovi dna broda, jako stradaju čelični dijelovi u blizini brončanog propelera itd. U mnogim slučajevima moguće je popraviti ili zamijeniti korodirani dio, ali na kraju životnih priča svih konstrukcija slijedi neumitan kraj - propadanje od korozije.

Korozija predstavlja vraćanje metala u stanje niže energije koju je imao u obliku rudače. Utroškom energije tijekom rafinacije metala iz rudače dobiva se čisti metal. Tijekom vremena u agresivnoj sredini propada površina metala i stvara korozivne produkte neupotrebljivih mehaničkih svojstava, koji su stabilni, jer su u stanju niže energije. Stare materijale se može koristiti pretaljivanjem i ponovnim pročišćavanjem.

Korozija može biti jednolična po većim plohama, ali i lokalizirana, tj. koncentrirana na malo područje. Brzina korozivnog procesa je različita, ali su najopasniji lokalni procesi koji mogu izazvati teške havarije u inače zdravoj konstrukciji.

Najčešća se korozija dijeli na suhu (u plinovima) i mokru (u elektrolitima). Kod suhe korozije najčešća je oksidacija i ljuštenje oksidnih slojeva s površina. Korozija u elektrolitima pokazuje različite oblike, a posljedice su ljuštenje površina, nastajanje interkristalnih pukotina, lokalnih šupljina i slično.

Pojave i zaštita od korozije obrađuju se drugim predavanjima i ovdje se o njima neće dalje govoriti.



*Slika 14.44. Umrežavanje polimera (polietilen) zračenjem i učinak "pamćenja"*

## **15 PREPORUČENA LITERATURA**

1. Deželić, R.: *Metali u strojogradnji*, FESB, Split, 1985.
2. Malešević, N.: *Metali I, II, III, IV*, FSB, Zagreb, 1968.
3. Anzulović, B.: *Metali I*, FESB, Split, 1990.
4. Španiček, Đ.; Ćurković L.: *MATERIJALI I*, FSB, Zagreb, 2005.
5. Kolumbić Z.; Tomac N.: *MATERIJALI*, Filozofski fakultet, Rijeka, 2005.
6. *Tehnička enciklopedija*, razni članci, JLZ, Zagreb, 1967.
7. Frantz, M.: *MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA*, FSB, Zagreb, 2005.
8. Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, FSB, Zagreb, 2011.
9. Kraut, B: *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb, različita izdanja
10. *Metals Handbook*, Vol I - XI, Metals Park, 1981 - 1980.
11. Callister, W: *Materials Science and Engineering*, 8th Edition, Wiley & Sons, New York, 2011.