

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva

Kolegij: MATERIJALI 1

LABORATORIJSKE VJEŽBE
(Autorizirani nastavni materijali)



Autor: Igor Gabrić

Split, rujan 2022.

PREDGOVOR

Autorizirani nastavni materijali za laboratorijske vježbe iz kolegija Materijali 1 namijenjeni su studentima prve godine stručnog preddiplomskog studija Konstrukcijsko strojarstvo.

Svrha izrade ovih materijala je upoznavanje studenata s tematikom laboratorijskih vježbi. Predviđeno je da se studenti prije pristupanja laboratorijskim vježbama obavezno priprema za iste proučavanjem odgovarajućeg poglavlja ovih nastavnih materijala. Nastavni materijali su također namijenjeni i pripremi studenata za provjeru znanja bilo putem kolokvija ili završnog ispita.

Nastavni materijali su podijeljeni u tri logičke cjeline od kojih svaka obuhvaća više termina laboratorijskih vježbi.

Prvi dio obuhvaća upoznavanje s tehničkim materijalima, temeljnim fizikalnim i mehaničkim svojstvima materijala s naglaskom na metale te pojavama pri grijanju i hlađenju čistih metala i legura.

U drugom dijelu studenti se upoznaju s osnovnim binarnim faznim dijagramima nakon čega slijedi detaljno upoznavanje sa stabilnim i metastabilnim dijagramom željezo – ugljik.

Ispitivanje mikrostrukture metala i mehaničkih svojstava treća su cjelina ovih nastavnih materijala.

Pregled korištene literature može se pronaći na kraju nastavnih materijala čime je omogućeno dodatno produbljivanje znanja zainteresiranim studentima.

Autor

Sadržaj

1	VRSTE I SVOJSTVA TEHNIČKIH MATERIJALA	5
1.1.	Vrste materijala i njihovo raspoznavanje	5
1.1.1	Vrste tehničkih materijala	5
1.1.2	Raspoznavanje materijala	9
1.1.3	Svojstva materijala	11
2	KRIVULJA HLAĐENJA ČISTOG METALA / KRUTOST METALA	15
2.1	Krivulja hlađenja čistog metala	15
2.2	Elastičnost	21
3	ALOTROPSKE MODIFIKACIJE, TOPLINSKA VODLJIVOST MATERIJALA	25
3.1	Alotropske modifikacije	25
3.1.1	Curieva temperatura kod niskougljičnih čelika	26
3.2	Mjerenje toplinske vodljivosti materijala	27
4	KRIVULJE GRIJANJA I HLAĐENJA LEGURA	31
4.1	Vrste kristala koji nastaju skrućivanjem legura	31
4.2	Legure potpune rastvorivosti u talini i krutini	32
5	ANALIZA MIKROSTRUKTURE METALA	35
5.1	Uvod	35
5.1.1	Analiza makro strukture metala	36
5.2	Analiza mikrostrukture metala	38
5.2.1	Optički mikroskop	38
5.2.2	Priprema uzoraka	40
5.2.3	Faze pripreme uzoraka	40
6	BINARNI DIJAGRAMI SLIJEVANJA POTPUNE RASTVORIVOSTI U KRUTINI I POTPUNE NERASTVORIVOSTI U KRUTINI	43
6.1	Dijagram potpune rastvorivosti u talini i krutini	43
6.1.1	Primjer proračuna količinskih udjela faza legure potpune rastvorivosti u krutini	44
6.2	EUTEKTIČKI DIJAGRAM POTPUNE RASTVORIVOSTI U TALINI I POTPUNE NERASTVORIVOSTI U KRUTINI	45
6.2.1	Primjer proračuna količinskih udjela faza eutektičke legure potpune nerastvorivosti u krutini	47
7	EUTEKTIČKI DIJAGRAM DJELOMIČNE RASTVORIVOSTI U KRUTINI I POTPUNE RASTVORIVOSTI U TALINI	53
7.1	Primjer proračuna količinskih udjela faza eutektičke legure djelomične rastvorivosti u krutini	55

8	PERITEKTIČKI DIJAGRAM DJELOMIČNE RASTVORIVOSTI U KRUTINI I POTPUNE RASTVORIVOSTI U TALINI	62
8.1	Primjer proračuna količinskih udjela faza eutektičke legure djelomične rastvorivosti u krutini	63
8.2	Primjer crtanja krivulja hlađenja i metalografskih skica	69
9	STABILNI Fe-C DIJAGRAM SLIJEVANJA	74
9.1	Proračun količinskih udjela faza	75
10	METASTABILNI Fe-Fe ₃ C DIJAGRAM SLIJEVANJA	86
10.1	Proračun količinskih udjela faza	87
11	ISPITIVANJE TVRDOĆE (Brinell, Vickers, Poldy, Leeb)	98
11.1	Tvrdoća materijala	98
11.2	Ispitivanje tvrdoće po Brinellu (HB)	99
11.2.1	Primjer mjerenja Brinell tvrdoće	103
11.3	Ispitivanje tvrdoće po Vickersu (HV)	107
11.3.1	Primjer mjerenja Vickers tvrdoće	109
11.4	Ispitivanje tvrdoće po Poldy	112
11.5	Ispitivanje tvrdoće po Leebu	113
12	Ispitivanje tvrdoće - Rockwell B i C postupak; Ispitivanje puzavosti materijala	117
12.1	Ispitivanje tvrdoće - Rockwell C metoda (HRC)	117
12.1.1	Primjer postupka mjerenja HRC tvrdoće uzorka alatnog čelika	120
12.2	Ispitivanje tvrdoće - Rockwell B metoda (HRB)	122
12.2.1	Primjer postupka mjerenja HRB tvrdoće uzorka nelegiranog čelika	123
12.3	Ispitivanje puzavosti materijala	126
13	VLAČNA PROBA	130
13.1	Primjer zadatka s rješenjem	137
14	ISPITIVANJE DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI, ŽILAVOSTI MATERIJALA I PLASTIČNOSTI MATERIJALA	142
14.1	Ispitivanje dinamičke izdržljivosti materijala	142
14.2	Ispitivanje žilavosti materijala	146
14.3	Ispitivanje plastičnosti materijala – proba savijanja	149
15	PREPORUČENA LITERATURA	142

1 VRSTE I SVOJSTVA TEHNIČKIH MATERIJALA

Svrha uvodnog termina u laboratorijske vježbe je upoznavanje s klasama tehničkih materijala koji se susreću u praksi i načina na koji se ti materijali mogu raspoznavati prema njihovim fizikalnim (gustoća, boja, magnetičnost, refleksija površine ...) i mehaničkim svojstvima (krutost, elastičnost, čvrstoća, žilavost ...). U drugom dijelu laboratorijske vježbe opisana su neka temeljna mehanička svojstva materijala i kvalitativni načini usporedbe mehaničkih svojstava kod različitih klasa tehničkih materijala.

1.1. VRSTE MATERIJALA I NJIHOVO RASPOZNAVANJE

1.1.1 VRSTE TEHNIČKIH MATERIJALA

Tehnički materijali se najčešće pronalaze u strojarskoj i brodograđevnoj praksi (Slika 1.1) i sistematiziraju su u nekoliko velikih klasa prema njihovim svojstvima:

- metali
- polimeri
- keramike
- kompoziti (kombinacije gore navedenih materijala)
- drvo



Slika 1.1 Primjeri različitih klasa tehničkih materijala

Metali:

Metali su kruti neprozirni materijali sjajne površine, u pravilu veće gustoće od ostalih klasa materijala (Slika 1.2). Velika gustoća i deformabilnost metala proizlazi iz njihove kristalične strukture i vrste veza koja se ostvaruje među metalnim ionima) Daju se obrađivati postupcima lijevanja, zavarivanja, rezanja i deformiranja. Imaju dobru električnu i toplinsku vodljivost. Većina metala propada u korozivnim sredinama iako postoje i iznimke. U praksi najčešće korišteni metali su:

- gvožđa koja su legure željeza i ugljika kao osnovnih legiranih elementa te silicija i mangana kao redovitih pratilaca koji se koriste u proizvodnji nelegiranih i legiranih čelika te ljevove uz dodatke legiranih elemenata poput kroma, nikala, vanadija, bakra, aluminija, titana, niobija, molibdena ...
- legure aluminija iz kojih se proizvode vučeni, valjani proizvodi i ljevovi
- legure bakra koje se dijele na mjedi (legure bakra kojim je glavni legirni element cink) i bronce (kod kojih je uz bakar legura može sadržavati dodaju kositar, aluminij, magnezij, silicij, berilij ...)
- sve ostale legure obzirom imaju znatno manju učestalost primjene (legure titana, nikla, magnezija, berilija, kositra ...) najčešće zbog svoje relativno visoke cijene



Slika 1.2 Tehnički metali

Polimerni materijali:

Polimeri su materijali čija se struktura sastoji iz dugih makromolekularnih lanaca međusobno povezani čvrstim ili slabim vezama (Slika 1.3). U praksi se dijele u tri osnovne skupine:

- elastomeri (gume) s izraženim svojstvima elastičnosti u odnosu na sve ostale materijale
- plastomeri ili termoplasti su materijali koji se zagrijavanjem omekšavaju te im se u omekšanom stanju može mijenjati oblik kojeg nakon hlađenja zadržavaju. Najpoznatiji predstavnici ove skupine su PVC, polietilen, pleksiglas, teflon, kevlar ...
- duromeri ili duroplasti ili termostabili su polimeri kod kojih se zagrijavanjem ne može mijenjati (na određenim povišenim temperaturama se raspadaju – materijal je

nepovratno uništen). U ovu skupinu se ubrajaju: bakelit, epoksidi, polieseteri, poliamidi, silikoni...

U posljednje vrijeme sve češća je upotreba polimernih legura s ciljem dobivanja boljih svojstava, lakšeg recikliranja, manjeg utjecaja na okoliš ... Razvojem polimernih legura razvila se i nova skupina polimernih materijala – termoplastični elastomerni koji se za razliku od elastomera mogu ponovno koristiti po kraju životnog vijeka proizvoda (recikliranje)



Slika 1.3 Polimerni materijali

Keramike:

Keramike su složeni kemijski spojevi koji sadrže nemetale i anorganske elemente. Izrazito su tvrdi, kruti i kemijski stabilni materijali koji se mogu oblikovati na visokim temperaturama. Mogu biti kristalne, staklaste ili mješovite strukture. Izvrsni su električki i toplinski izolatori. Mogu biti prozirne i neprozirne. U praksi se najčešće dijele u dvije velike skupine:

- tradicionalne keramike (Slika 1.4)
 - proizvodi od gline (lonci, posuđe)
 - konstrukcijski materijali u građevinarstvu (opeka, crijep, beton)
 - stakla (boce, laboratorijska oprema)
 - vatrootporni materijali (kuhinjsko posuđe, opeke u pećima – šamot)
 - bijela keramika (sanitarije, emajl)



Slika 1.4 Tradicionalne keramike

- industrijske – visokoučinkovite keramike (Slika 1.5)
 - termokeramika (lonci za taljenje na visokim temperaturama)
 - elektrokeramika (poluvodiči, izolatori)
 - magnetokeramika (keramike sa izraženim magnetskim svojstvima)
 - mehanokeramika (elementi strojeva podložni habanju, rezni alati)
 - kemokeramika (kemijske instalacije)
 - biokeramika (ortopedska i stomatološka protetika)
 - optokeramika (prozorska stakla)

Keramike su u osnovi karbidi, oksidi ili nitridi (kamen, porculan, rezne pločice)



Slika 1.5 Industrijske keramike

Kompoziti:

Kompoziti se izrađuju kao kombinacija dvije ili više klasa materijala čime se ostvaruju specifična svojstva koja se ne mogu ostvariti obradom monolitnih materijala (Slika 1.6). Kompozit je određen vrstom korištenih materijala, udjelom, konfiguracijom i razmjerom. Sastoji se od matrice koja ima funkciju zadržavanja oblika i vlakana koja su u pravilu faza koja ima funkciju poboljšanja nekih svojstava poput čvrstoće, krutosti, žilavosti, vodljivosti i sl. U praksi je najšira primjena kompozita kod kojih je matrica ojačana vlaknima ili česticama. Primjeri ovakvih kompozita su: armirani beton, stakloplastika, drvo, aluminij ojačan staklenim vlaknima, keramika ojačana česticama silicij karbida...



Slika 1.6 Konfiguracije i primjeri kompozitnih materijala

1.1.2 RASPOZNAVANJE MATERIJALA

Sve klase tehničkih materijala, kao i svi tehnički materijali imaju svoja karakteristična svojstva. Na temelju svojstava tehnički materijali se mogu raspoznavati bilo vizualno na temelju promatranja boje i refleksije površine ili izvođenjem određenih ispitivanja. Ispitivanja mogu biti kvalitativna (gruba procjena nekih svojstava poput gustoće, toplinske vodljivosti, akustičnih svojstava, tvrdoće) ali se u praksi najčešće izvode precizna standardizirana ispitivanja svojstava materijala (*Slika 1.7*). Materijali se najčešće raspoznaju prema nekima od navedenih svojstava:

- boja površine - vizualno
- gustoća - mjerenjem volumena i vaganjem
- refleksija svjetla (metalna površina) - vizualno
- magnetičnost – korištenjem permanentnog magneta
- toplinska i električna vodljivost - pomoću izvora topline
- mehanička svojstva materijala (tvrdoća, čvrstoća, žilavost, rastezljivost...)

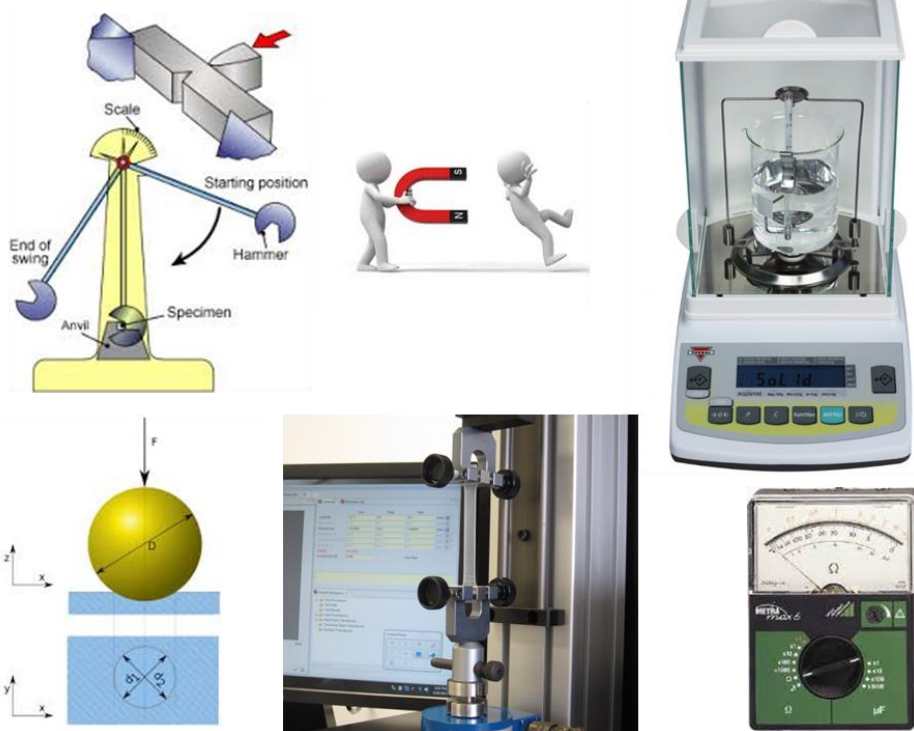
tvrdoća - grebanjem uzoraka iz različitih materijala jedan po drugom i usporedba otisaka (tvrđi materijal ostavlja trag na mekšemu, čvrstoća i rastezljivost – kidalica, žilavost – Sharpyev bat)

- prigušenje zvuka nakon udara o površinu predmeta - udarcem čekića o površinu uzorka i mjerenjem vremena prigušenja zvuka
- sposobnost obrade na sobnoj, sniženoj ili povišenoj temperaturi

deformiranjem uzoraka na različitim temperaturama (savijanjem u škripcu)

- oblik i namjena predmeta (odljevci, otkivci ...)

razni dijelovi strojeva iz svakodnevnog života



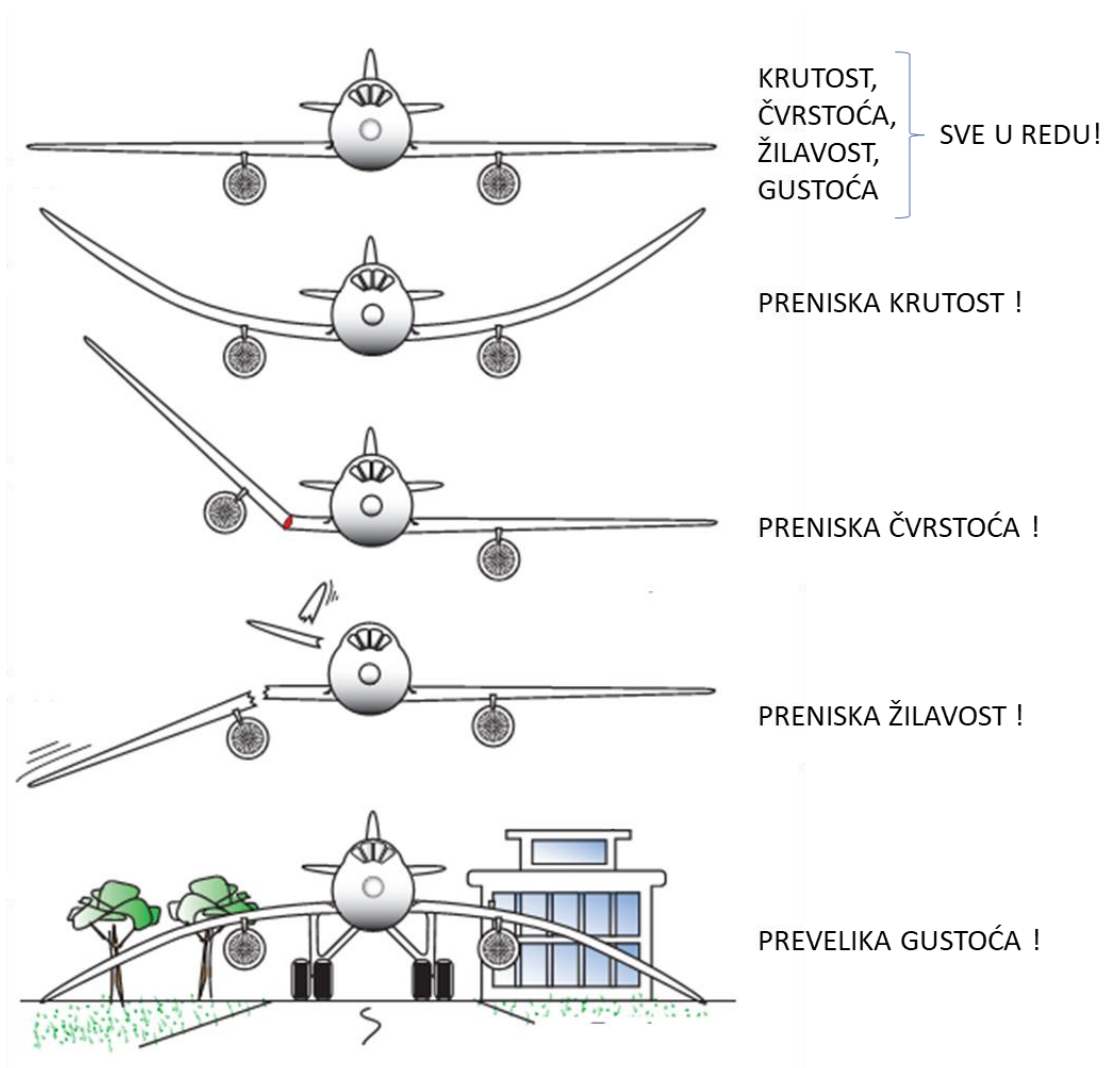
Slika 1.7 Neke od metoda ispitivanja svojstava u svrhu raspoznavanja tehničkih materijala

1.1.3 SVOJSTVA MATERIJALA

Svaki materijal karakteriziran je svojim svojstvima. Svojstva materijala su sistematizirana u više skupina: opća, fizikalna, mehanička, toplinska, električna, magnetska, tehnološka, postojanosti u različitim sredinama, recikliranja Svaka skupina sadrži više svojstava. Na slici *Slika 1.8* prikazano je kako neka svojstva utječu na funkcionalnost konstrukcije.

Tehnički materijali se najčešće međusobno raspoznaju prema njihovim:

- mehaničkim svojstvima: tvrdoća, čvrstoća, žilavost, elastičnost ...
- fizikalnim svojstvima: gustoća, talište, viskozitet ...
- tehnološkim svojstvima: sposobnost obrade postupcima deformiranja u hladnom i toplom stanju, zavarljivost, livljivost, toplinska obradivost

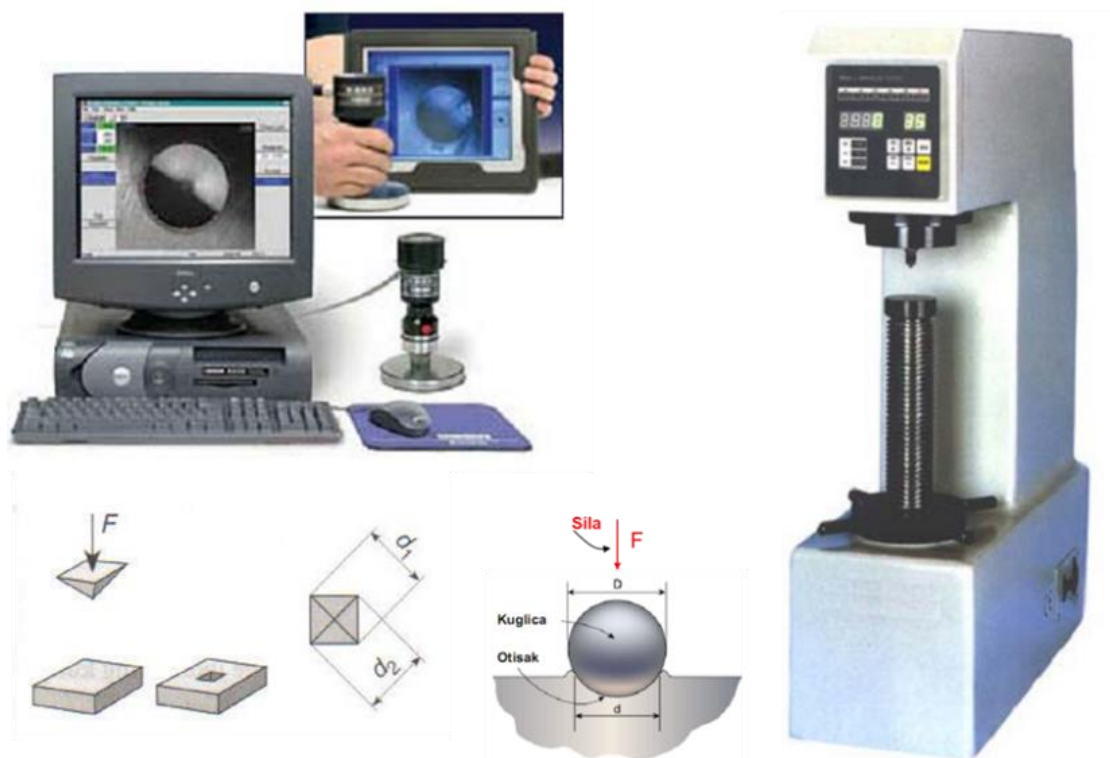


Slika 1.8 Utjecaj svojstava na funkcionalnost konstrukcije

TVRDOĆA MATERIJALA

Tvrdoća materijala je otpornost materijala na prodiranje stranog predmeta u njegovu površinu. Ovo mehaničko svojstvo se može odrediti kvalitativno usporednom metodom zadiranjem jednog materijala u drugi (dali materijal ostavlja trag u drugom materijalu nakon pokušaja zadiranja u njega – usporedbom učinaka zadiranja možemo odrediti koji je materijal tvrdi).

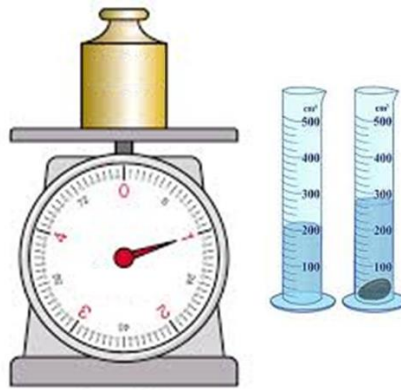
U strojarskoj praksi se koriste standardizirane kvantitativne metode (*Slika 1.9*) koje se zasnivaju na utiskivanju penetratora uz pomoć odgovarajućeg uređaja (tvrdomjera) standardnom silom, a potom mjerenjem površine nastalog otiska ili mjerenjem elastičnog povrata nakon rasterećenja. Najčešće korištene metode ispitivanja tvrdoće u praksi su Rockwell B i C, Brinell i Vickers postupak mjerenja tvrdoće.



Slika 1.9 Neke od standardnih metoda mjerenja tvrdoće

GUSTOĆA (SPECIFIČNA MASA)

Gustoća je fizikalna veličina određena omjerom mase i volumena nekog tijela. Vaganjem i mjerenjem volumena uzoraka valjkastog oblika iz različitih materijala može se odrediti njihova gustoća (specifičnu masu) prema izrazu $\rho \text{ (gustoća)} = \frac{m \text{ (masa)}}{V \text{ (volumen)}}$ (Slika 1.10). Na temelju gustoće metali se dijele na lake i teške metale.



Slika 1.10 Mjerenje gustoće materijala vaganjem i mjerenjem volumena uranjanjem uzorka u menzuru s mjernom skalom

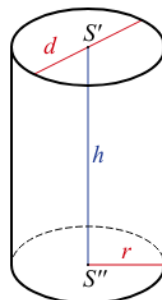
Praktični dio vježbe:

Za unaprijed pripremljene uzorke valjkastog oblika iz čelika, mjedi, aluminija, polietilena i drva mjerenjem odrediti gustoću materijala.

Oprema za izvođenje vježbe koji je potrebno pripremiti:

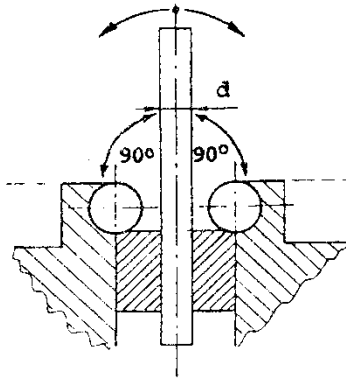
- valjkasti uzorci iz čelika, mjedi, aluminija, polietilena i drva
- pomično mjerilo
- precizna vaga
- kalkulator

Napomena: Volumen valjka se računa prema izrazu $V = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h$ gdje je d promjer valjka, a h visina valjka.



SPOSOBNOST PREVIJANJA

Sposobnost previjanja žice se određuje primjenom uređaja shematski prikazanog na Slika 1.11. Naprava je sastavljena iz dijela koji služi za učvršćenje žice i zakaljenih čeličnih valjčića koji osiguravaju da radijus previjanja žice ne bude previše malen.



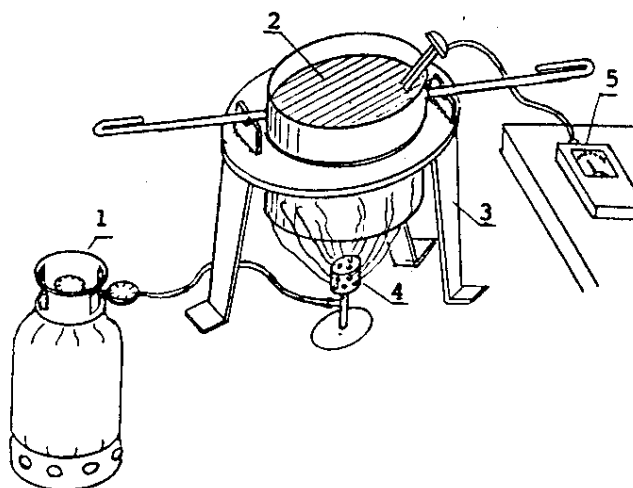
Slika 1.11 Shematski prikaz uređaja za pokus previjanja žice

Previjanje se vrši savijanjem žice iz početnog položaja za 90° u jednu stranu, te natrag do početnog položaja. Ovo predstavlja prvo previjanje. Potom se previjanje vrši na suprotnu stranu za 90° , te natrag do početnog položaja. Ovo predstavlja drugo previjanje. Važno je da se previjanje obavlja u pravilnim vremenskim intervalima (jedno previjanje u jednoj sekundi) zbog utjecaja zagrijavanja na rezultate do kojeg dolazi uslijed unutrašnjeg trenja materijala. Pokus se vrši do pojave loma žice. Ukupan broj previjanja do loma predstavlja mjeru sposobnosti za izmjenično previjanje.

2 KRIVULJA HLAĐENJA ČISTOG METALA / KRUTOST METALA

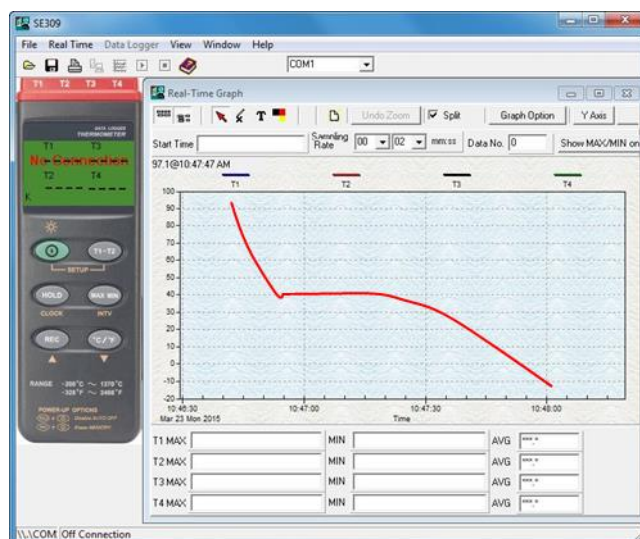
2.1 KRIVULJA HLAĐENJA ČISTOG METALA

Talište čistog olova prema podacima iz literature iznosi 327°C . Prema shematskom prikazu na slici 2.1, u okviru praktičnog dijela vježbe, treba zagrijati olovo u loncu pomoću plamenika ili električnog grijača do temperature približno 400°C . Nakon zagrijavanja ukloniti izvor topline te na mirnom zraku pustiti da se olovo hladi. U svrhu snimanja krivulje hlađenja može se koristiti sat i digitalni termometar s uronjivim termoparom te u pravilnim vremenskim razmacima očitavati temperature prilikom hlađenja. Snimanje vršiti dok se temperatura ne spusti do približno 250°C . Dobivene podatke o vremenu i temperaturi zapisati tablično. Tablične podatke treba prikazati u dijagramu τ - t . Snimanje krivulje hlađenja može se vršiti i direktno tako da se podaci s digitalnog termometra u realnom vremenu iscrtavaju na zaslonu računala. Promjene temperature taline i krutine se prate pomoću digitalnog termometra i odgovarajućeg računalnog programa prikazanog na slici 2.2



1 - gorivi plin, 2 - olovo, 3 - postolje s loncem, 4 – plamenik, 5 – termometar

Slika 2.1 Shematski prikaz grijanja metala



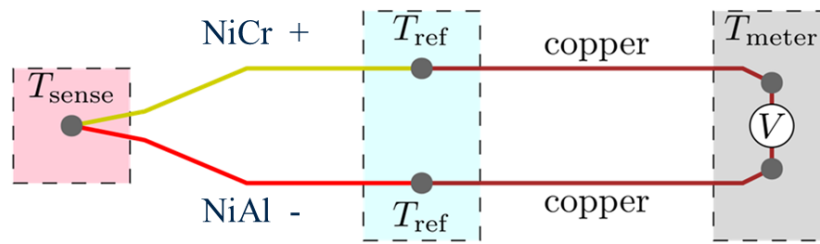
Slika 2.2 Četiri kanalni digitalni termometar SE309 s pripadajućom računalnom aplikacijom

Senzori za mjerenje temperature koji se najčešće koriste su:

- **Termopar** - kod kojeg se vrši pretvorba toplinske energije u električnu (dva različita metala u kontaktu promjenom temperature generiraju napon koji se može mjeriti na kontaktima korištenjem preciznih mjernih instrumenata). Tipovi termoparova i područje primjene prikazani su u tablici 2.1. Princip mjerenja temperature pomoću termoparova prikazan je shematski na slici 2.3.

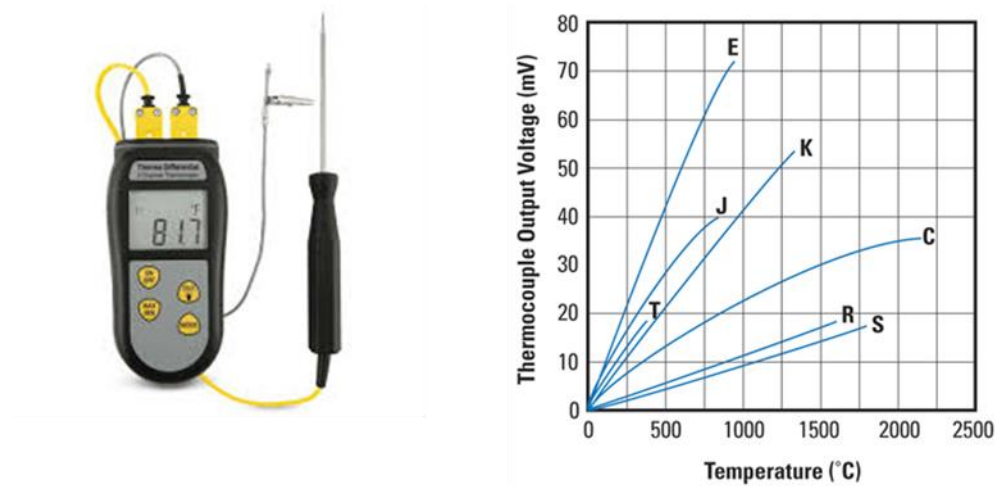
Tablica 2.1 Tipovi termoparova i područje primjene

TIPOVI TERMOPAROVA		
TIP	KOMBINACIJA METALA	RASPON TEMPERATURA, °C
B	Platina 30% Rodij / Platina 6% Rodij	1370 : 1700
E	Nikal – krom / Konstantan (Cu55%Ni45%)	0 : 870
J	Željezo / Konstantan (Cu55%Ni45%)	0 : 760
K	Nikal – krom / Nikal – alumini	0 : 1260
N	Nikrosil(NiCrSi) / Nisil (NiSi)	0 : 1260
R	Platina 13% Rodij / Platina	870 : 1450
S	Platina 10% Rodij / Platina	980 : 1450
T	Bakar / Konstantan (Cu55%Ni45%)	-59 : +370



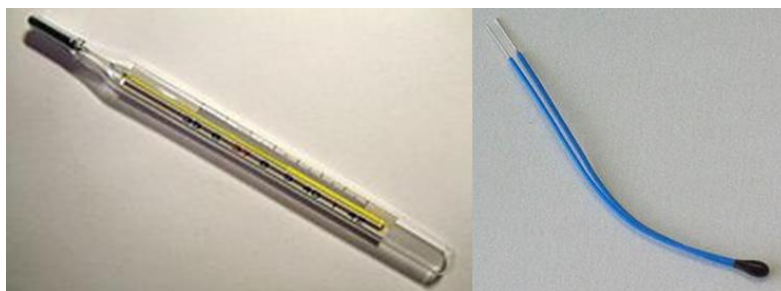
Slika 2.3 Shematski prikaz principa mjerenja temperature pomoću termopara

Na slici 2.4 prikazan je izgled digitalnog termometra s termoparom i načelne karakteristike različitih tipova termoparova.



Slika 2.4 Digitalni termometar s pripadajućim termoparom (lijeva) i karakteristike termoparova različitog tipa (desno)

- Za niže temperature mogu se koristiti i termometri punjeni tekućinom (slika 2.5 lijevo) koji rade po principu temperaturnog širenja. Mjerno područje ovih termometara je od – 200 do + 600°C.
- Najjeftiniji na tržištu su termistori (slika 2.5 desno). Termistor je električni otpornik zasnovan na poluvodičima kojima se električni otpor znatno mijenja promjenom otpora. Razlikuju se PTC termistori (–50 do 220 °C) koji imaju pozitivni koeficijent temperaturene promjene otpora i NTC termistori (–50 do 150 °C) koji imaju negativni koeficijent temperaturene promjene otpora.

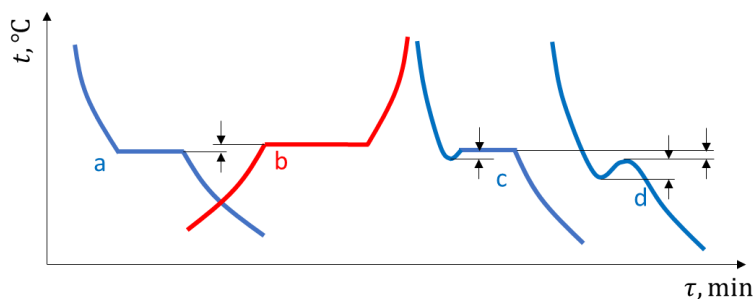


Slika 2.5 Termometar punjen tekućinom (lijevo) i termistor (desno)

Pri zagrijavanju krutine uočavaju se slijedeće pojave:

- mjesto pojave prve taline kod grijanja uz stjenke lonca gdje je i najintenzivnije dovođenje topline
- stojište na temperaturi taljenja koje je rezultat potrebne latentne topline taljenja metala (stojište traje toliko dok se i zadnji djelić krutine ne rastali – dovedena toplota se troši na oslobađanje metalnih iona krutih veza i njihovo povećanje kinetičke energije tj. za prelazak metalnih iona na viši energetski nivo)
- preostala krutina potone u talini prilikom grijanja zbog veće specifične mase od taline (u talini su metalni ioni značajno udaljeniji – manja gustoća rastaljenog metala)
- mjesto nastajanja prve krutine prilikom hlađenja taline javlja se ponovno uz stjenke lonca jer je to ujedno mjesto najintenzivnijeg hlađenja taline
- stojište na temperaturi skrutišta povezano je s oslobađanjem latentne topline (metalni ioni višeg energetskog nivoa u talini skrućivanjem prelaze na niži energetski nivo, a višak energije nadoknađuje gubitke topline prema okolišu zbog čega dolazi do pojave stojišta)
- usahlina u sredini lonca nakon skrućivanja nastaje zbog slijeganja preostalog dijela taline (koja se nalazi u središnjem dijelu lonca) pri skrućivanju
- razlika temperature tališta i skrutišta (temperaturnu histerezu) je direktna posljedica potrebe savladavanja energetske barijere (pri grijanju je potrebna dodatna energija, dok je pri hlađenju potrebno smanjenje sadržane energije)

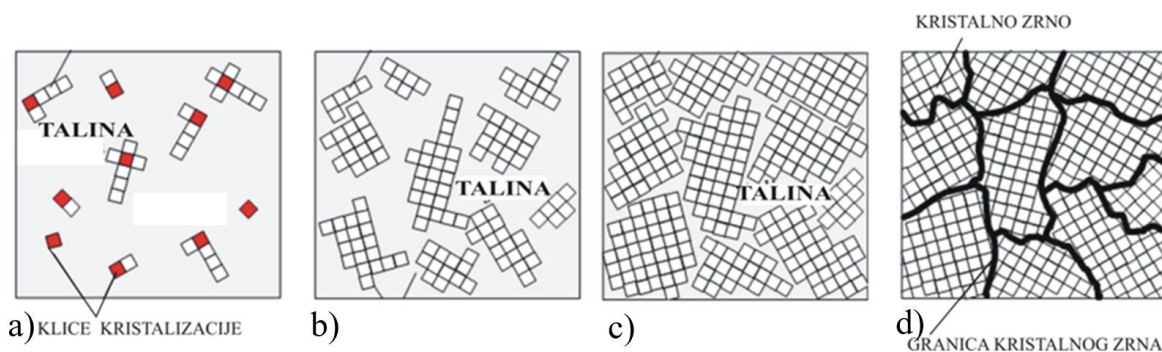
Slika 2.6 prikazuje krivulje hlađenja (a, c i d) i krivulju grijanja (b). Vidljiva je temperaturna histereza (razlika temperature stojišta) pri jako sporom grijanju (krivulja a) i hlađenju (krivulja b). Ova histereza je povezana s energijom potrebnom za savladavanje energetske barijere za prijelaz iz krutog u tekuće stanje i obratno. Povećanjem brzine hlađenja taline dolazi do pojave pothlađenja (krivulja c) tj. temperatura nastanka prve krutine se spušta ispod temperature stojišta, nakon čega temperatura poraste zbog oslobađanja veće količine latentne topline koja nadoknađuje gubitke prema okolišu. Kod iznimno velikih brzina hlađenja (krivulja d). Latentna toplota ne uspijeva nadoknaditi gubitke prema okolišu te se čitavo skrućivanje odvija na temperaturama ispod temperature stojišta. Što je veća brzina hlađenja biti će i veće pothlađenje.



a – vrlo sporo hlađenje; b – vrlo sporo zagrijavanje;
c – brže hlađenje; d – vrlo brzo hlađenje.

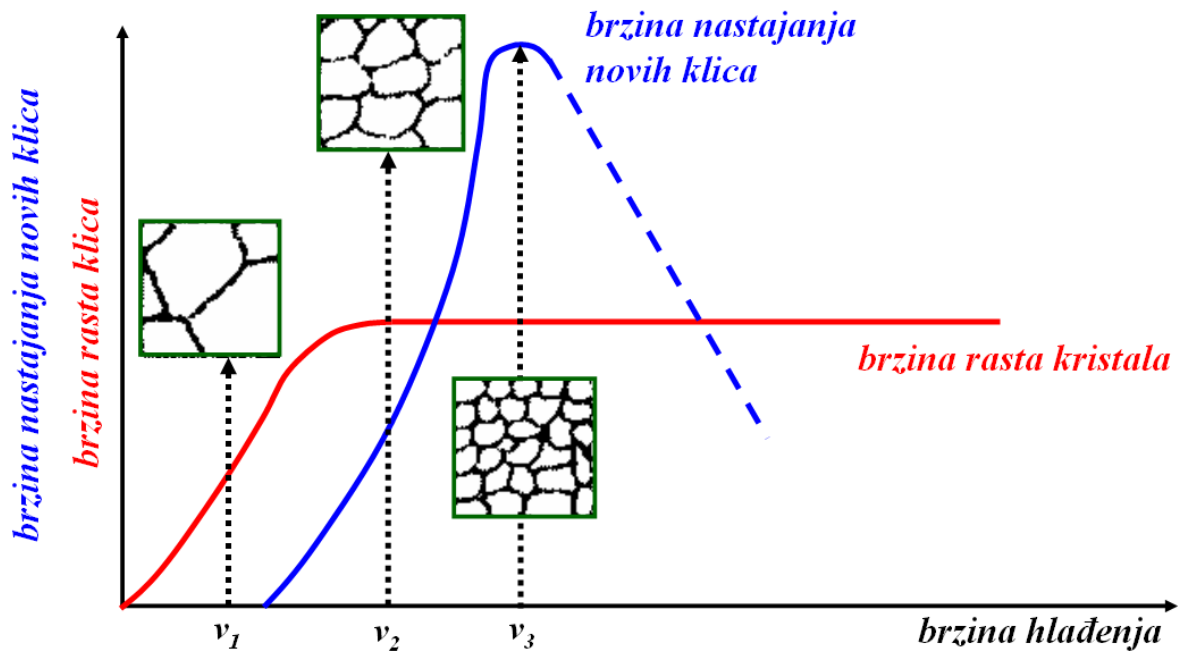
Slika 2.6 Utjecaj brzine hlađenja na stojište

Na slici 2.7 prikazan je proces kristalizacije. Na skici a prikazan je nastanak prvih kristalnih rešetki uz klice kristalizacije. Klice kristalizacije su čestice keramičkog porijekla ili stijenske lonca u kojoj se nalazi talina i koje su u krutom stanju u talini. Spuštanjem temperature taline do skrućišta započinje kristalizacija na način da prvi metalni ioni započinju rast kristala na klicama kristalizacije. Na slikama b i c prikazan je izgled podmakle kristalizacije. U smjesi se vide sve veći različito orijentirani kristali. Na slici d prikazan je završetak procesa kristalizacije, gdje su se zadnji djelići taline skrutnuli u vidu granica kristalnih zrna. Unutar granica zrna metalni ioni su zauzeli znatno nepravilniji (amorfni) raspored.



Slika 2.7 Kristalizacija (skrućivanje) metala

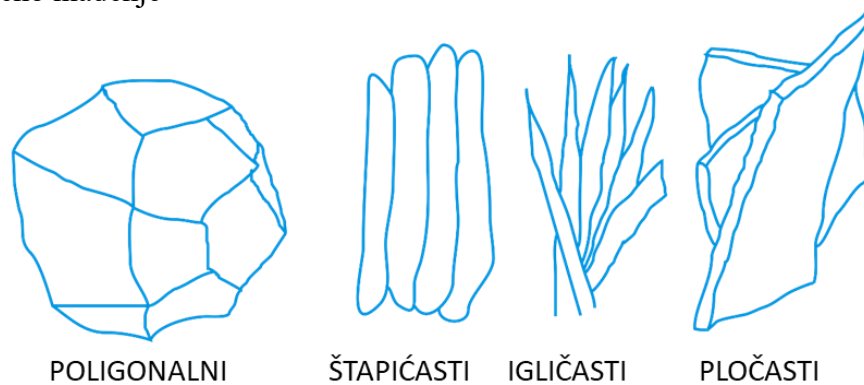
Utjecaj brzine stvaranja novih klica kristalizacije i brzine rasta klica prikazan je na slici 2.8. Može se uočiti da je za male brzine hlađenja brzina nastajanja novih klica zanemariva pa se stoga razvija krupno zrnasta struktura (grubo zrno) najčešće poligonalnog oblika. Porastom brzine hlađenja rastu i brzina rasta klica i brzina nastajanja novih klica pa se stoga veličina kristalnog zrna smanjuje. Kod velikih brzina hlađenja nastaje izrazito sitno zrnasta mikrostruktura.



Slika 2.8 Utjecaj brzine hlađenja na brzinu nastajanja klica kristalizacije i brzinu rasta kristala

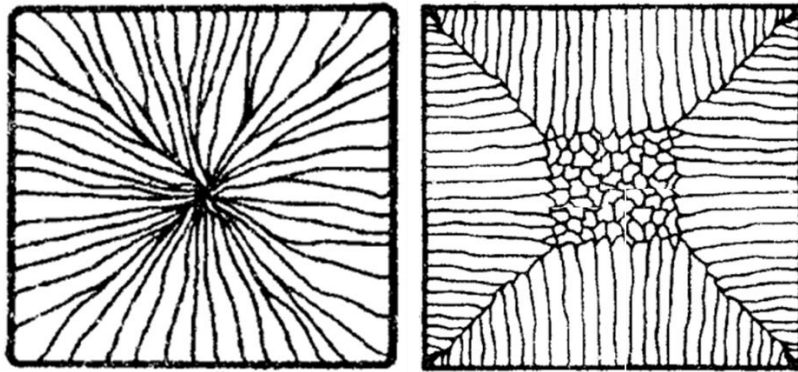
Na veličinu i oblik kristalnog zrna (vidi sliku 2.9) utječu sljedeći faktori:

- brzina hlađenja
- brzina nastajanja klica kristalizacije (umjetne klice – cjepiva)
- brzina rasta klica kristalizacije
- usmjereno hlađenje



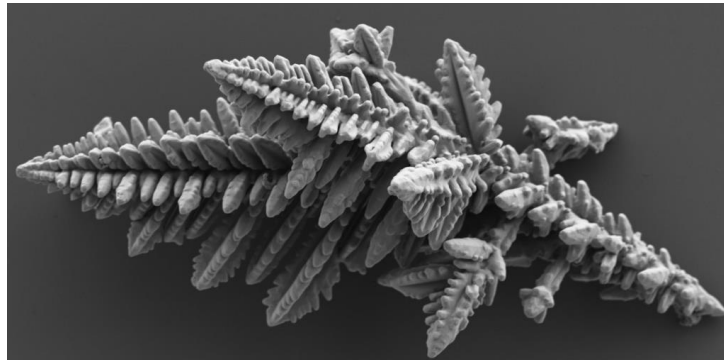
Slika 2.9 Česti oblici kristalnih zrna u metalu

Utjecaj oblika kalupa i brzine hlađenja na veličinu i oblike kristalnih zrna prikazan je na primjeru hlađenja odljevka iz bakra u kalupu s zaobljenim rubovima lijevo i u kalupu s oštrim rubovima desno (slika 2.10). Slika 2.10



Slika 2.10 Utjecaj oblika kalupa i brzine hlađenja na mikrostrukturu. Hlađenja kalupa s talinom bakra mlazovima vode za vrijeme skrućivanja. Struktura kod šipka zaobljenih rubova (lijevo) i kod šipka oštih rubova (desno)

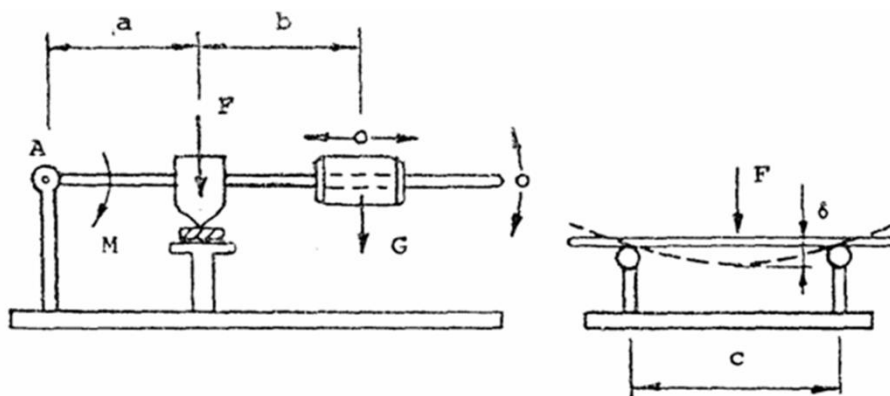
Kristali dendriti, koji nastaju pri sporijim hlađenjima taljevine, često se nalaze u unutrašnjosti odljevka – vidi sliku 2.11.



Slika 2.11 Kristali dendriti čistog bakra

2.2 ELASTIČNOST

Elastičnost materijala jest njegova sposobnost da se nakon prestanka djelovanja opterećenja vrati u prvobitni položaj. Trake iz različitih materijala postavljamo u napravu prema slici 1. i opterećujemo različitim opterećenjima.

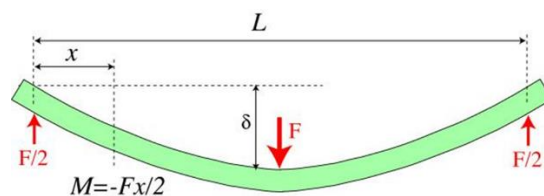


Slika 2.12 Naprava za procjenu elastičnosti materijala

- Točno na sredini i ispod trake postavi se komparator koji mjeri veličinu progiba (s preciznošću od 0.01 mm) za različita opterećenja.
- Nakon rasterećenja treba provjeriti dali se kazaljka komparatora vratila u početni položaj.
- Ako se kazaljka komparatora vrati na početni položaj deformacija trake je bila u elastičnom području.
- Treba uočiti razlike u opterećenju za postizanje istog progiba za različite materijale, te razlike u elastičnim deformacijama za ista opterećenja (različito svojstvo krutosti materijala – Youngov modul elastičnosti).
- Ukoliko kazaljka pokazuje određeni progib nakon rasterećenja to znači da je osim elastične deformacije materijal bio i plastično deformiran.

Ukoliko se primjene izrazi iz nauke o čvrstoći materijali korištenjem rezultata pokusa za elastično područje deformacija može se odrediti Young-ov modul elastičnosti za ispitivane materijale.

Izraz za progib sredine grede slobodno oslonjene na dva oslonca (slika 2.13) i opterećene u središnjem djelu silom F može se pronaći u priručnicima.

Slika 2.13 Greda slobodno oslonjena na dva oslonca i opterećena u središnjem djelu silom F

Na slici 2.14 prikazani su izrazi potrebni za računanje progiba jednostavno opterećene grede i aksijalnog momenta inercije pravokutnog presjeka.

	C_1	C_2
	48	16

Section Shape	Moment I m^4
	$\frac{bh^3}{12}$

$$\delta = \frac{FL^3}{C_1EI} = \frac{ML^2}{C_1EI}$$

$$\theta = \frac{FL^2}{C_2EI} = \frac{ML}{C_2EI}$$

I = Moment inercije [m^4]
 E = Young-ov modul [N/m^2]
 δ = Progib [m]
 F = Sila [N]
 M = Moment [Nm]
 L = Duljina [m]

Slika 2.14 Izrazi za računanje progiba i aksijalnog momenta inercije jednostavno opterećene grede

Izraz za progib centralno opterećene grede oslonjene zglobo na svojim krajevima glasi:

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad 2.1$$

Korištena naprava ima razmak između oslonaca $L = 280 \text{ mm}$.

Ako se u izraz 2.1 uvrsti izraz za aksijalni moment inercije pravokutnog presjeka :

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad 2.2$$

gdje je:

- $b = 30 \text{ mm}$ širina presjeka grede (trake)
- $h = 3 \text{ mm}$ visina presjeka grede (trake)

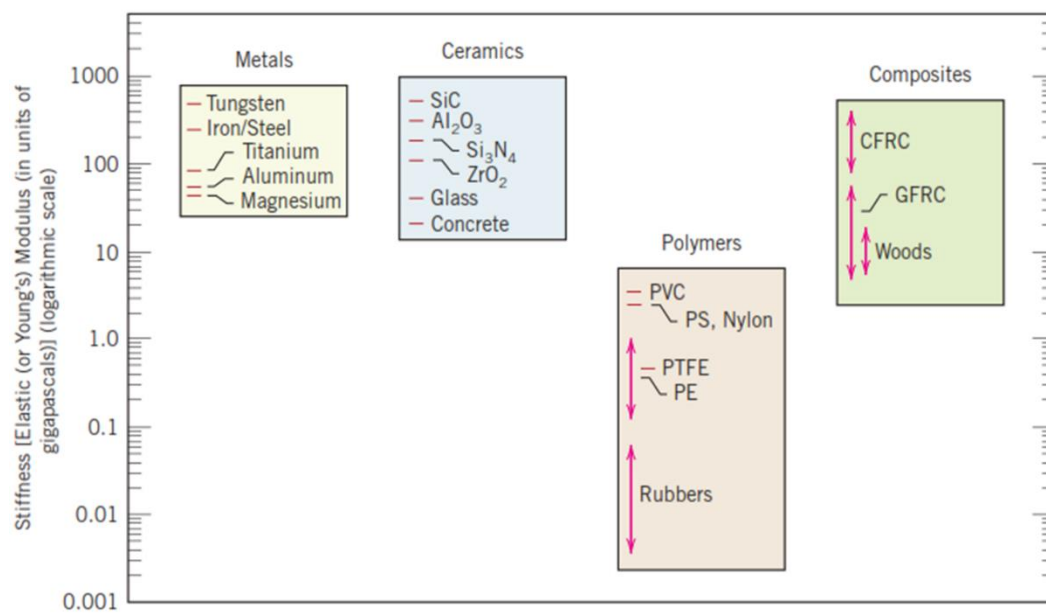
slijedi izraz za progib u središnjem dijelu grede:

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot E \cdot b \cdot h^3} \quad 2.3$$

odnosno, na temelju pokusa (opterećenje poznatom silom i izmjereni progib) iz izraza 2.3 se može odrediti svojstvo tretiranog materijala koje ukazuje na krutost/elastičnost materijala - Youngov modul elastičnosti.

$$E = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot \delta \cdot b \cdot h^3} \quad 2.4$$

Elastični materijali (gume) imaju izrazito niske vrijednosti Youngovog modula elastičnosti (reda veličine $0.01 - 0.1 \text{ GPa}$) dok metali imaju znatno veće vrijednosti ($50 - 400 \text{ GPa}$). U dijagramu na slici 2.15 prikazani su rasponi Youngovog modula elastičnosti za različite tehničke materijale.



Slika 2.15 Rasponi Youngovog modula elastičnosti

3 ALOTROPSKE MODIFIKACIJE

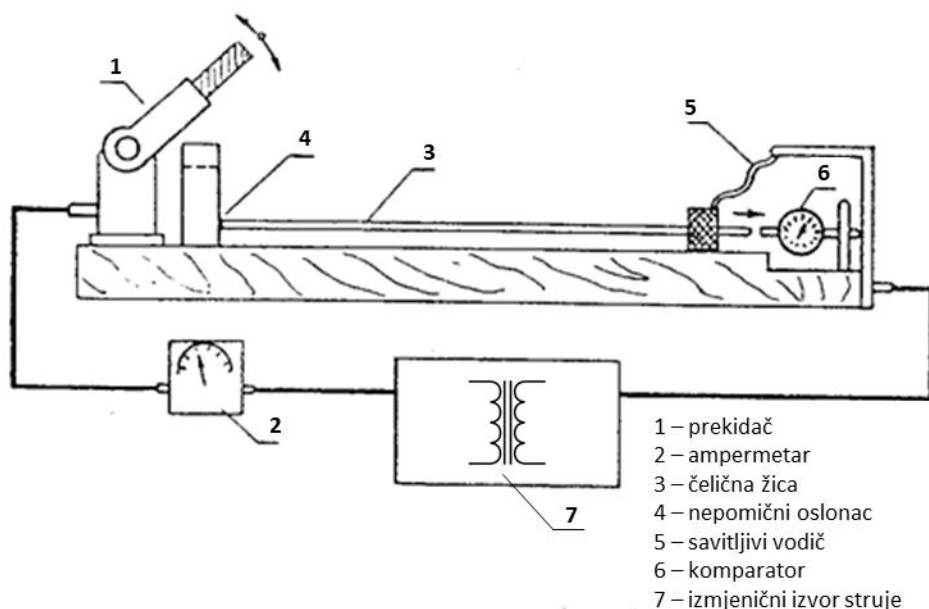
TOPLINSKA VODLJIVOST MATERIJALA

3.1 ALOTROPSKE MODIFIKACIJE

Pojedini metali pokazuju sklonost da modificiraju svoju kristalnu rešetku pri određenim temperaturama kod grijanja ili hlađenja. Metali koji pokazuju ovo svojstvo, a najčešće ih susrećemo u praksi su željezo, kositar, kobalt, nikal, mangan i titan.

Promjena rešetke vezana je uz promjenu nekih svojstava metala: specifični volumen (plošno centrirana kubna rešetka ima veću popunjenost od prostorno centrirane kubne rešetke), čvrstoća, tvrdoća, električna vodljivost...

Na slici (strana 14) je prikazana krivulja hlađenja čistog željeza sa obilježenim temperaturama alotropske modifikacije. U okviru vježbi izvodi se pokus alotropskih modifikacija čelične žice promjera 3 mm. U napravi prema slici 3.1 vrši se zagrijavanje čelične žice pomoću izmjeničnog izvora električne struje (7) (transformator za zavarivanje) preko nepomičnog električnog kontakta (4) i pomičnog električnog kontakta (5).



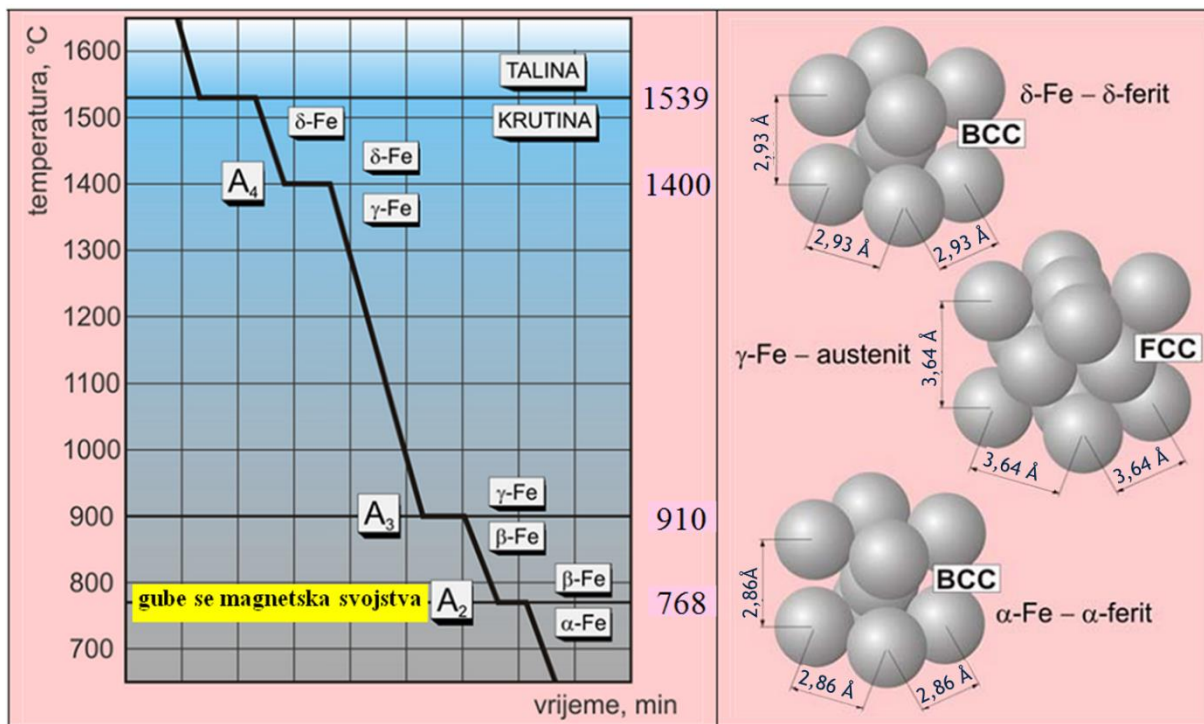
Slika 3.1 Naprava za verifikacija alotropskih modifikacija čelične žice

Uslijed električnog otpora dolazi do zagrijavanja žice (3), zbog čega raste njezin volumen, a time i njena duljina. Produljenje žice se mjeri pomoću komparatora (6) koji se nalazi prema

skici na desnom kraju žice. Obratiti pažnju na promjenu boje žice za vrijeme zagrijavanja. Zagrijavanje se vrši do približno 1000°C , nakon čega se isključi izvor struje i prati skraćenje žice uslijed njenog hlađenja.

Temperatura se procjenjuje usporedbom s panoom s bojama užarenog čelika!

Na slici 3.2 je prikazana krivulja hlađenja čistog željeza s obilježenim temperaturama alotropske modifikacije. Na slici su također naznačeni tipovi rešetke i prosječne vrijednosti veličine parametara kristalne rešetke za promatrani temperaturni interval.

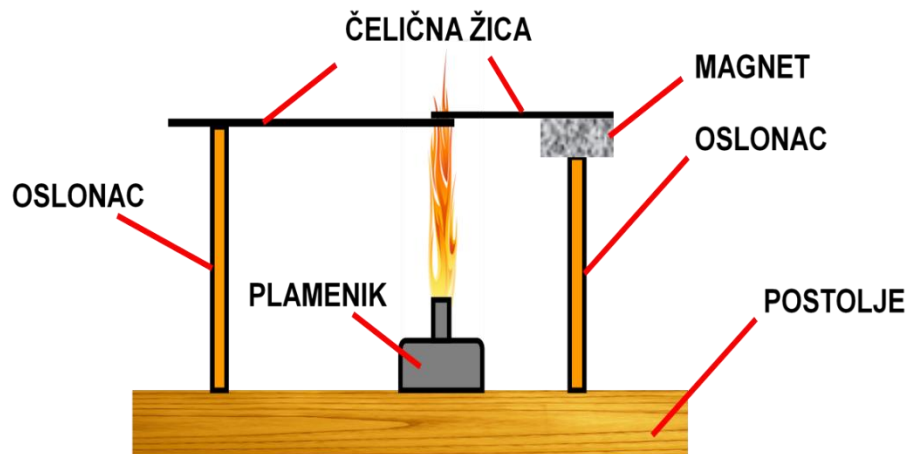


Slika 3.2 Krivulja hlađenja čistog željeza s istaknutim temperaturama alotropskih modifikacija i odgovarajućom kristalnom rešetkom u temperaturnim intervalima

3.1.1 CURIEVA TEMPERATURA KOD NISKOUGLJIČNIH ČELIKA

Poznato je da se zagrijavanjem niskougljičnih čelika pri određenoj temperaturi događa promjena magnetskih svojstava. Zagrijavanjem ovih čelika do temperature crvenog sjaja (za čisto željezo 768°C) magnetska rešetka (prostorno centrirana kubna rešetka) prelazi u nemagnetsku rešetku (prostorno centrirana kubna rešetka).

Na krivulji hlađenja (slika 3.2) na Curievoj temperaturi modifikacije se također javlja stajanje. Pokus se izvodi na način prema slici 3.3 tako se žica na jednom kraju osloni na magnet, a drugim krajem se dovede u dodir s drugom žicom koja je ekscentrično oslonjena na jednom osloncu (pri tome se vodi računa da žica koja je na magnetu mora biti s gornje strane).



Slika 3.3 Verifikacija Curie temperature

Budući da se radi o feromagnetičnom materijalu žice, magnetske silnice se prenose s magneta na žice i tako sprječavaju da jedna od njih padne.

Plamenom se zagrijava mjesto dodira dviju žica tako dugo dok se vrhovi ne zagriju do temperature crvenog sjaja što odgovara temperaturi prelaska iz magnetičnosti u nemagnetičnost.

Dostizanjem temperature modifikacije (Curieva temperatura) jedna od žica pada.

Nakon hlađenja magnetska sila će ponovno djelovati – materijal postaje feromagnetičan.

3.2 MJERENJE TOPLINSKE VODLJIVOSTI MATERIJALA

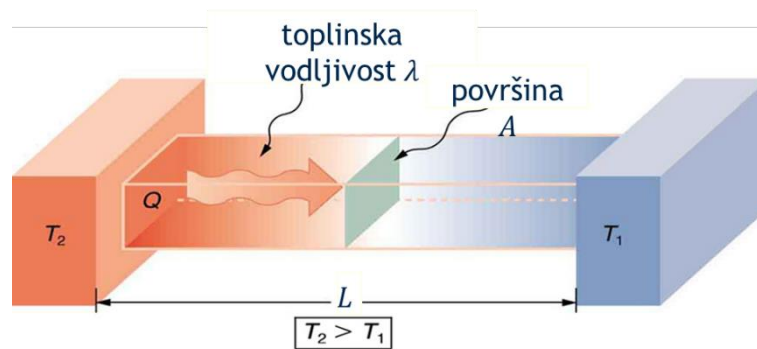
Fizikalna veličina (svojstvo materijala) koja opisuje kako toplina prolazi kroz tvar naziva se toplinska vodljivost materijala i označava se s λ . Za stacionarno provođenje topline (vremenski nepromjenjive temperature u bilo kojem djeliću volumena materijala) vrijedi izraz:

$$\dot{q} = \frac{\lambda \cdot A \cdot (T_2 - T_1)}{L} \quad 3.1$$

gdje je:

- $\dot{q}$, W količina topline koja u jedinici vremena prolazi kroz materijal
- λ , $\frac{W}{mK}$ koeficijent toplinske vodljivosti
- A , m^2 površina poprečnog presjeka
- L , m duljina toplinskog toka

Na slici 3.4 shematski je prikazan princip posrednog mjerenja toplinske vodljivosti mjerenjem temperatura hladne i tople strane uzorka. Na temelju poznate duljine uzorka i površine poprečnog presjeka primjenom izraza 3.1 može se izračunati toplinska vodljivost materijala.



Slika 3.4 Shematski prikaz principa posrednog mjerenja toplinske vodljivosti

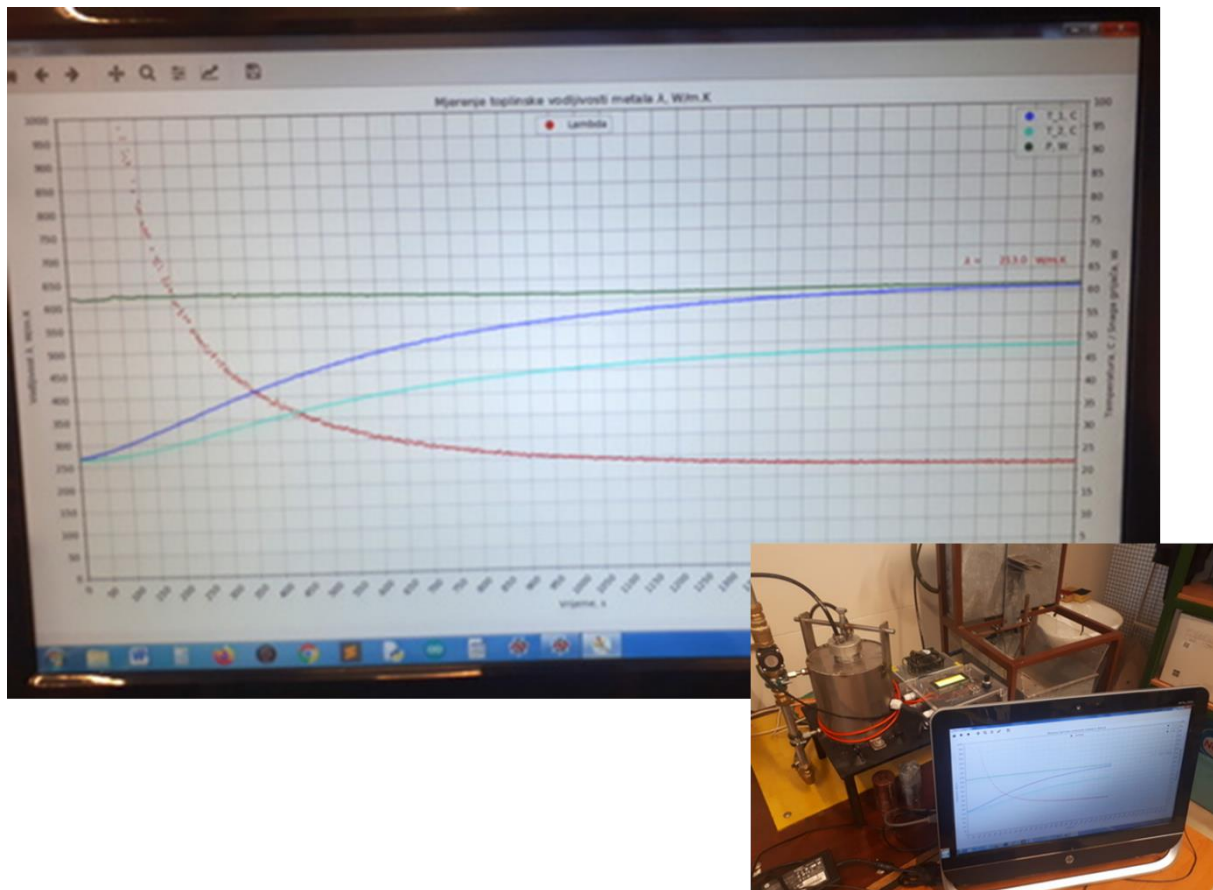
U okviru ove vježbe vrši se kvantitativno ispitivanje toplinske vodljivosti jednog ili više tehničkih metala (npr. bakar, mjed, ugljični čelik, nehrđajući čelik, sivi lijev ili aluminij).

Pokus se izvodi zagrijavanjem (uzorak $\phi 50 \times 100$ mm) jednog čela uzorka (slika 3.5 lijevo) pomoću elektrotopnog grijača i hlađenjem drugog čela pomoću hladnjaka (koji odvodi toplinu recirkulacijom vode). Uređaj za ispitivanje toplinske vodljivosti prikazan je na slici 3.5 – desno. Kada se ustalio toplinski tok može se odrediti toplinska vodljivost korištenjem izraza 3.1.



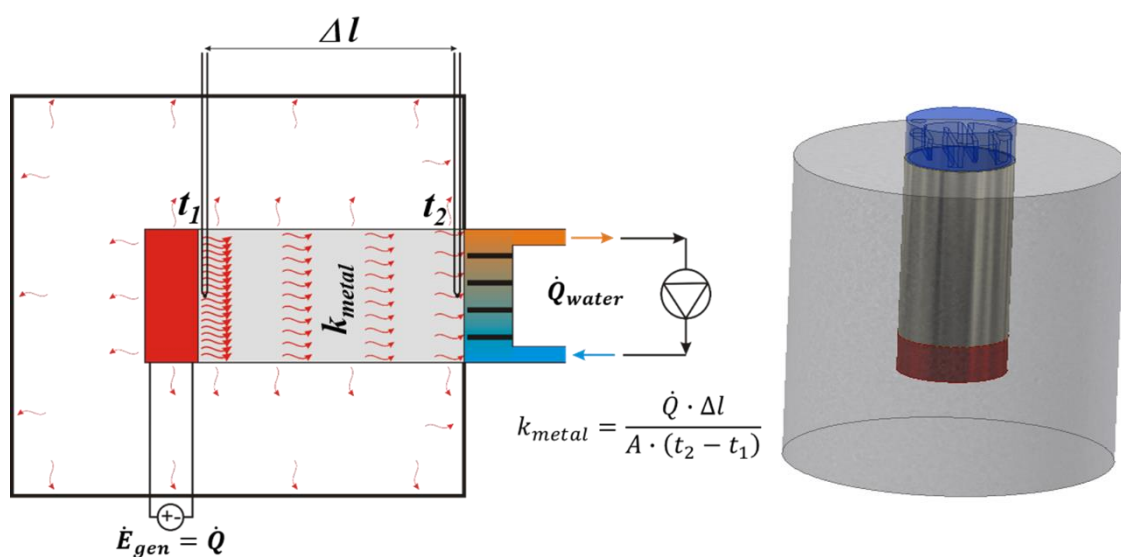
Slika 3.5 Ispitni uzorci i uređaj za ispitivanje toplinske vodljivosti metala

Uređaj je opremljen mikrokontrolerom povezanim s mjernim senzorima i računalom. Na zaslonu računala (slika 3.6) se iscrtava krivulja promjena vrijednosti temperatura, snage grijača i proračunske vrijednosti toplinske vodljivosti. Može se uočiti da se vrijednost toplinske vodljivosti (crvena krivulja) s vremenom asimptotski približava konstantnoj vrijednosti koja predstavlja toplinsku vodljivost dotičnog materijala.



Slika 3.6 Izgled zaslona računala za vrijeme ispitivanja toplinske vodljivosti

Shematski prikaz uređaja dan je na slici 3.7. U lijevom dijelu slike vidljivi su svi dobici i gubici topline za vrijeme ispitivanje, dok je na desnom dijelu slike dan pojednostavljeni 3D prikaz uređaja gdje je grijač označen crvenom bojom, a hladnjak plavom između kojih se nalazi ispitivani uzorak. Sivom bojom je označena izolacija.



Slika 3.7 Shematski prikaz uređaja za mjerenje toplinske vodljivosti

U tablici su prikazane vrijednosti toplinske vodljivosti najčešće korištenih tehničkih metala.

Tablica 3.1 Toplinska vodljivost nekih tehničkih metala

Materijal	Toplinska vodljivost λ, W/mK
Nelegirani čelik 0,1%C	59
Nehrđajući čelik 18%Cr 8%Ni	20
Aluminij	229
Bakar, čisti (99,9995%Cu)	395
Bakar, trgovački (99,5%Cu)	372
Mjed	93
Zlato	310
Srebro	417

4 KRIVULJE GRIJANJA I HLAĐENJA LEGURA

4.1 VRSTE KRISTALA KOJI NASTAJU SKRUĆIVANJEM LEGURA

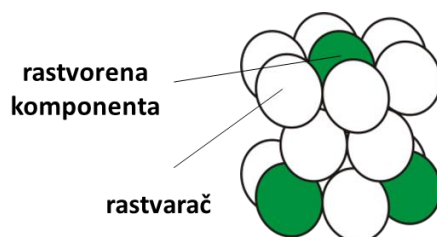
Do nastajanja legura dolazi miješanjem metala s metalima, ali i drugim elementima (komponentama). Različite komponente (kemijski elementi) se različito miješaju tj. nastaju različite vrste kristala, a ovisno o:

- rastvorivosti u krutini i
- sklonosti konstituenata formiranju kemijskih intermetalnih spojeva.

Vrste kristala koji nastaju su:

1. Kristali mješanci supstitucijskog tipa (slika 4.1)

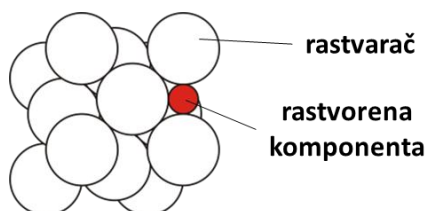
Kod kristala mješanca supstitucijskog tipa atomi rastvorene komponente zamjenjuju na pojedinim mjestima atome rastvarača, dimenzije atoma obje komponente se ne razlikuju više od 15%, element rastvarača daje tip rešetke legure.



Slika 4.1 Rešetka supstitucijskog kristala mješanca

2. Kristali mješanci intersticijskog tipa (slika 4.2)

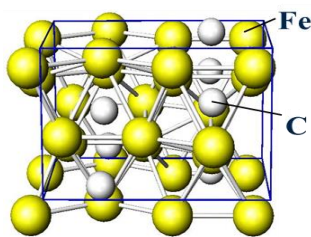
Kod kristala mješanca intersticijskog tipa atomi rastvorene komponente se uključuju u međuprostore kristalne rešetke rastvarača, atomi rastvorene komponente su znatno manjih dimenzija od atoma rastvarača, velike deformacije rešetke i kod malog sadržaja rastvorene komponente, element rastvarača daje tip rešetke.



Slika 4.2 Rešetka intersticijskog kristala mješanca

3. Kristali intermetalnog spoja (slika 4.3)

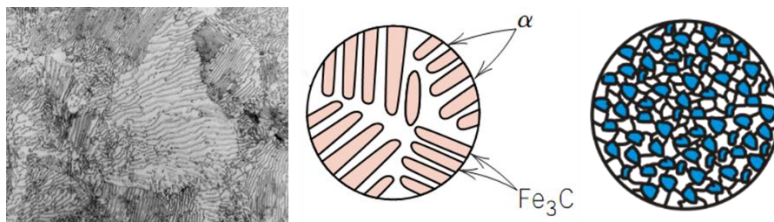
Kristali intermetalnog spoja tvore nove kristalne rešetke različite od rastvarača i rastvorene komponente, karakterističan točan omjer atoma komponenti u spoju.



Slika 4.3 Kristal kemijskog intermetalnog spoja

4. Mehaničke smjese kristala (slika 4.4)

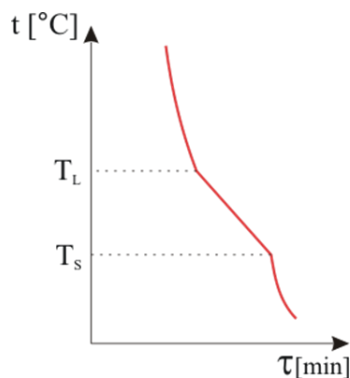
Prilikom skrućivanja na konstantnoj temperaturi nastaje fina smjesa kristala komponenata koja se može promatrati kao jedna faza – **eutektikum** (iz homogene taline nastaje fina mehanička smjesa dvije faze različitih kemijskih i fizikalnih svojstava). **Eutektoid** je mehanička smjesa koja nastaje transformacijama u krutom stanju (iz homogene krute faze nastaje fina mehanička smjesa dvije faze različitih kemijskih i fizikalnih svojstava).



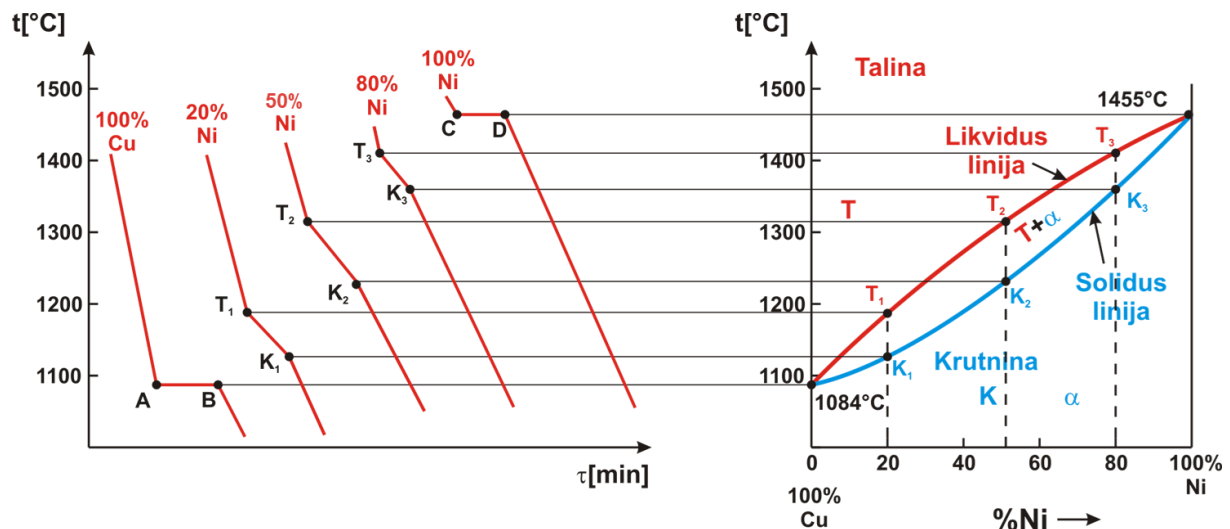
Slika 4.4 Eutektoid kod metastabilne Fe – C legure (lijevo i sredina) i eutektikum (desno)

4.2 LEGURE POTPUNE RASTVORIVOSTI U TALINI I KRUTINI

Karakteristika legura potpune rastvorivosti u krutini legura prigodom grijanja i hlađenja (za razliku od čistih metala) jest taljenje i skrućivanje u temperaturnom intervalu (slika 4.5). Izvođenjem pokusa grijanja i hlađenja različitih koncentracija ovakvih legura, tj. dobivanjem njihovih krivulja hlađenja, omogućena je izrada faznog dijagrama određenog sustava legura. U praksi se dijagrami najčešće konstruiraju binarni dijagrami slijevanja čija se konstrukcija može pojasniti na primjeru Cu-Ni legure (slika 4.6).

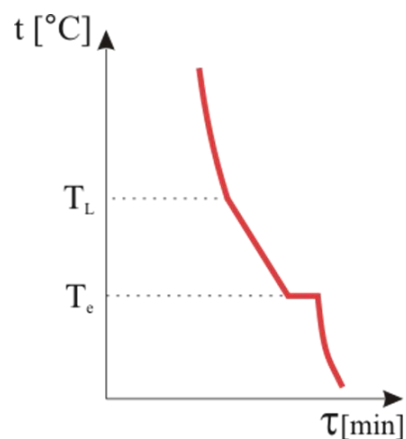


Slika 4.5 Krivulja hlađenja legura potpune rastvorivosti u krutini



Slika 4.6 Konstrukcija dijagrama Cu – Ni legure potpune rastvorivosti u krutini

Karakteristika legura djelomične rastvorivosti u krutini legura prigodom grijanja i hlađenja jest da se taljenje i skrućivanje mogu odvijati dijelom u temperaturnom intervalu, a dijelom uz pojavu stojišta na krivulji hlađenja (Slika 4.7). Izvođenjem pokusa grijanja i hlađenja različitih koncentracija ovakvih legura, tj. dobivanjem njihovih krivulja hlađenja, omogućena je izrada faznog dijagrama tretirane legure.

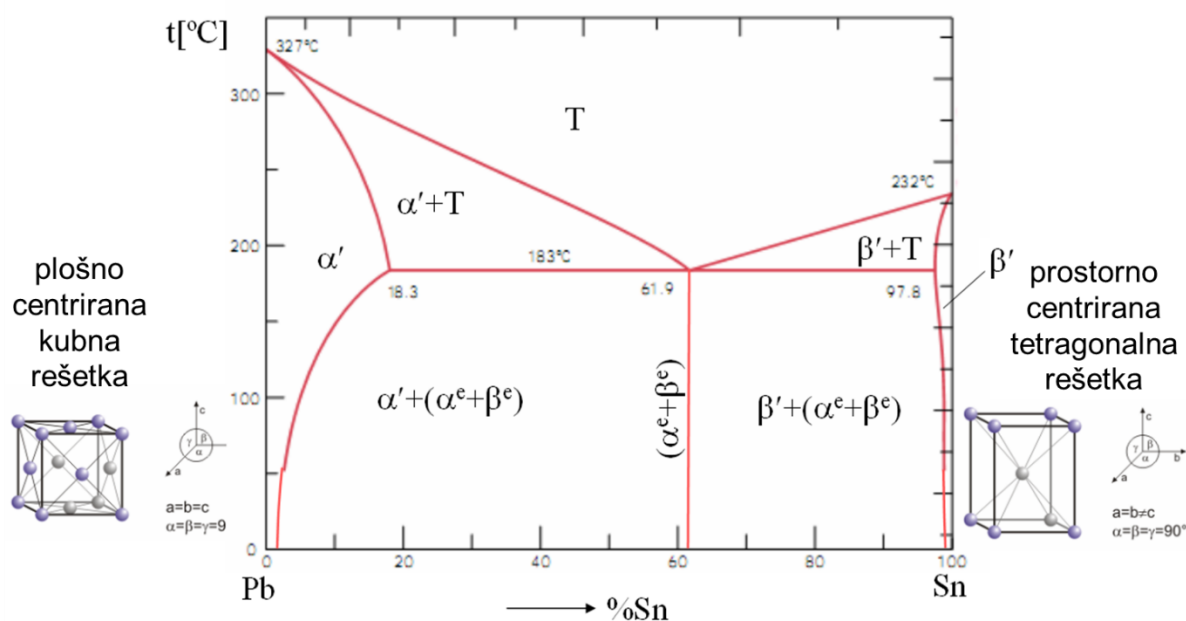


Slika 4.7 Krivulja hlađenja legura djelomične rastvorivosti u krutini

Verifikacija konkretnog binarnog dijagrama slijevanja, preuzetog iz literature (slika 4.8), u okviru laboratorijske vježbe izvodi se pomoću više uzoraka dvokomponentne legure Pb – Sn (olovo – kositar zbog relativno niskog tališta). Ove legure se u praksi često koriste kao niskotaljivi lemovi.

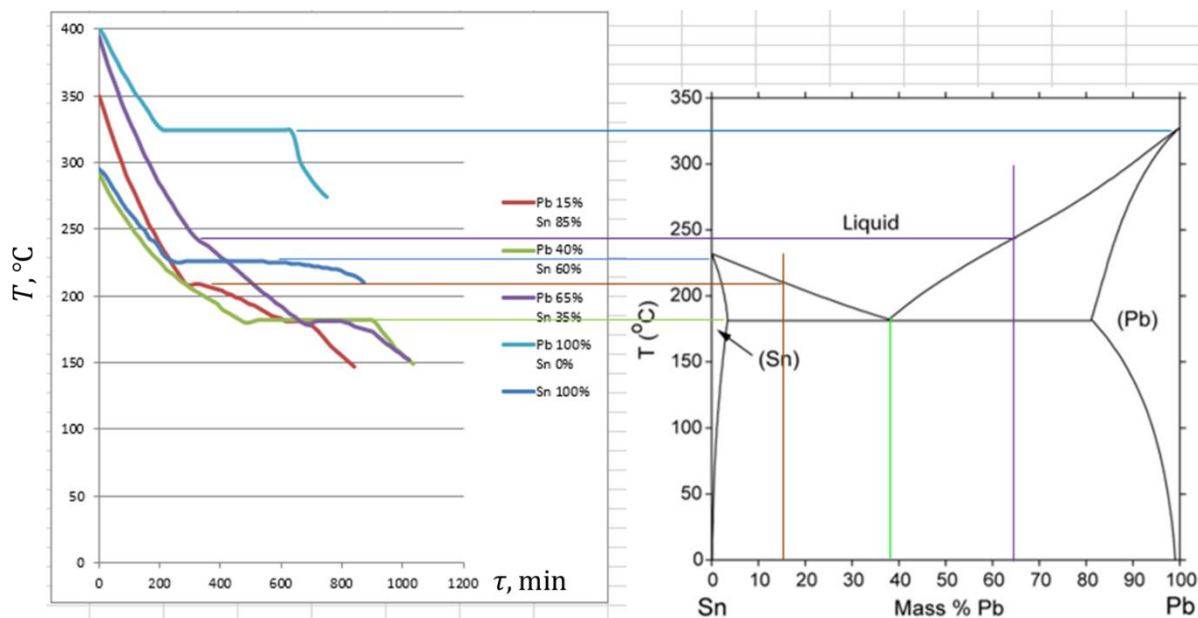
U svrhu verifikacije binarnog dijagrama odabrane su četiri uzorka za koje se vrši snimanje krivulja hlađenja i to:

1. 100%Sn;
2. 35%Sn – 65%Pb;
3. 60%Sn – 40% Pb;
4. 85%Sn – 15% Pb;



Slika 4.8 Binarni dijagram slijevanja Pb – Sn

Verifikacija binarnog dijagrama snimanjem četiri krivulje hlađenja za ranije navedene kemijske sastave. Uočava se da se stojišta i lomovi na krivuljama hlađenja (na lijevom dijelu slike 4.9) pojavljuju na karakterističnim temperaturama za odgovarajuću koncentraciju prema dijagramu na desnom dijelu slike 4.9.



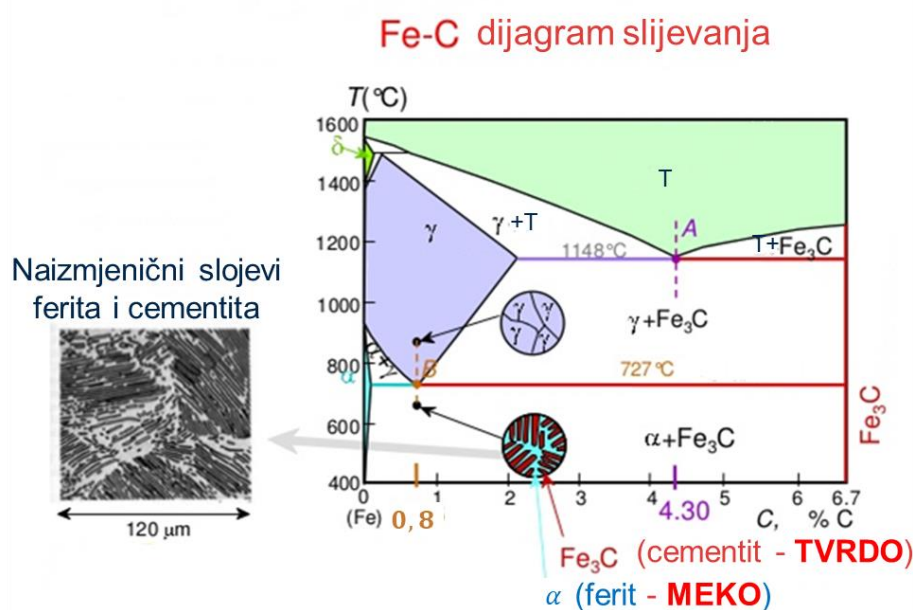
Slika 4.9 Verifikacija binarnog dijagrama slijevanja Pb – Sn

5 ANALIZA MIKROSTRUKTURE METALA

5.1 UVOD

Metalografija (proučavanje strukture metala) je dio znanosti o metalima koji se bavi vezom između dijagrama slijevanja, strukture i svojstava metala.

Na slici 5.1 dan je primjer metalografske skice za Fe-C leguru (čelik) eutektoidne koncentracije (0,8%C).

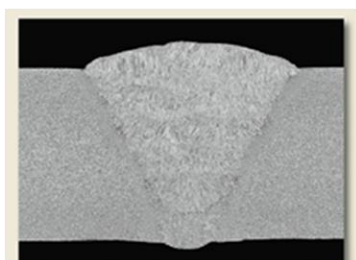
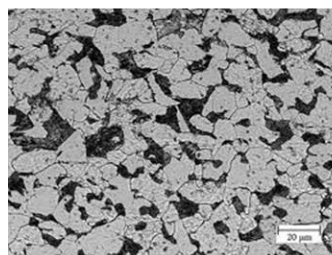


Slika 5.1 Metalografska slika (lijevo) za leguru Fe-C koncentracije 0,76%C označenu u dijagramu slijevanja (desno)

Osnovni zadatak metalografije je određivanje svojstava tj. predviđanje ponašanje materijala pri danim uvjetima opterećenja (na temelju pregleda makro/mikro strukture, a uz poznati kemijski sastav) i, za određeni proces prerade ili područje primjene, ukazivanje na najpovoljniju strukturu.

Metalografija je važan postupak kontrole kvalitete tekuće proizvodnje.

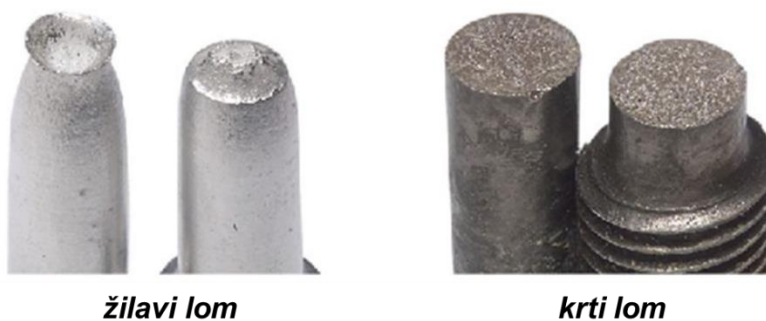
U metalografiji se prema razmjeru razlikuje ispitivanje mikrostrukture (mali razmjeri veličina uz uvećanja nekoliko stotina puta) i ispitivanje makrostrukture (veliki razmjeri veličina bez uvećanja ili uz uvećanja do 10 puta) - slika 5.2.

MAKROSTRUKTURA**Povećanje: x 6****MIKROSTRUKTURA****Povećanje: x 500**

Slika 5.2 Makrostruktura (lijevo) i mikrostruktura (desno)

5.1.1 Analiza makro strukture metala

Vizualnim pregledom površine materijala može se samo naslutiti kakvu struktura ima materijal. Površinski slojevi su često različitog kemijskog sastava od samog materijala. Potrebno ih je ukloniti radi uvida u strukturu. Bolji uvid u građu materijala dobiva se prijelomom uzorka. Iz samog izgleda površine prijeloma (vidi sliku 5.3) može se zaključiti da li je materijal žilav, krt, rastezljiv, krupnog ili sitnog zrna i sl.

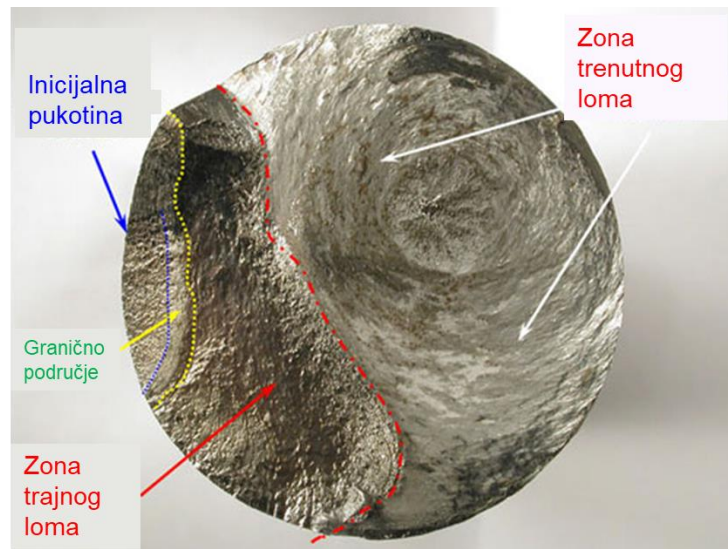


žilavi lom

krti lom

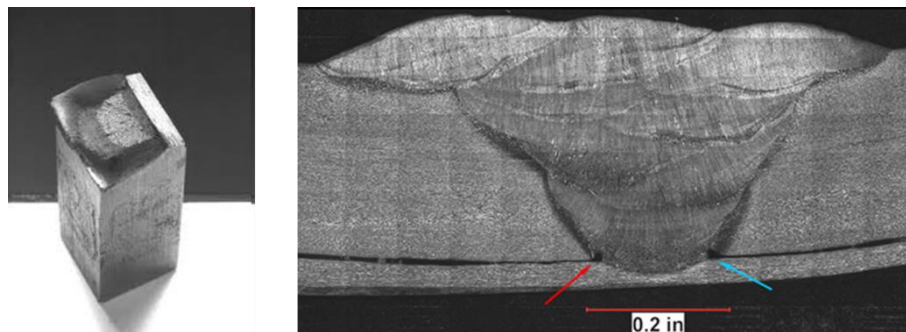
Slika 5.3 Izgled makrostrukture na primjeru izgleda prijeloma epruveta za vlačnu probu

Prema obliku prijeloma može se zaključiti i o povijesti obrade materijala - da li je materijal gnječčen, toplinski obrađivan, izotropan ili anizotropan. Na temelju izgleda površine loma može se zaključiti o kakvom se tipu loma radi (trenutni ili trajni lom) – slika 5.4.

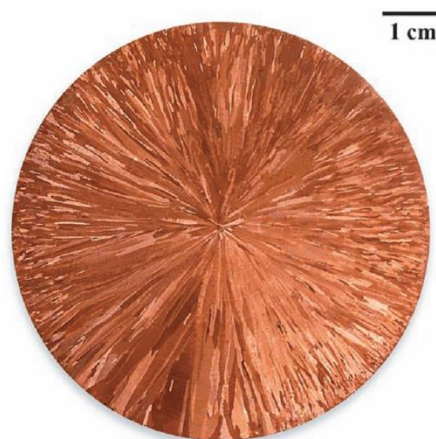


Slika 5.4 Izgled površine loma vratila uslijed torzijskog opterećenja i zamora materijala

Mogu se uočiti i neke nehomogenosti u nutrini poput pora (plinskih mjehurića, troske i sl). Povećalom se može bolje pregledati površina. Povećanje obično ne prelaze 10X. Ukoliko se površina fino brusi i nagrize kiselinom može se i golim okom opaziti makrostruktura materijala. Ovo je lijepo vidljivo kod odljevaka i zavarenih spojeva koji imaju krupnije zrno (slika 5.5 i 5.6), za razliku od gnječenih (sitnozrnastih) struktura.



Slika 5.5 Makrostruktura prijeloma epruvete za ispitivanje žilavosti (lijevo) i makrostruktura presjeka sučeonog zavora (desno)



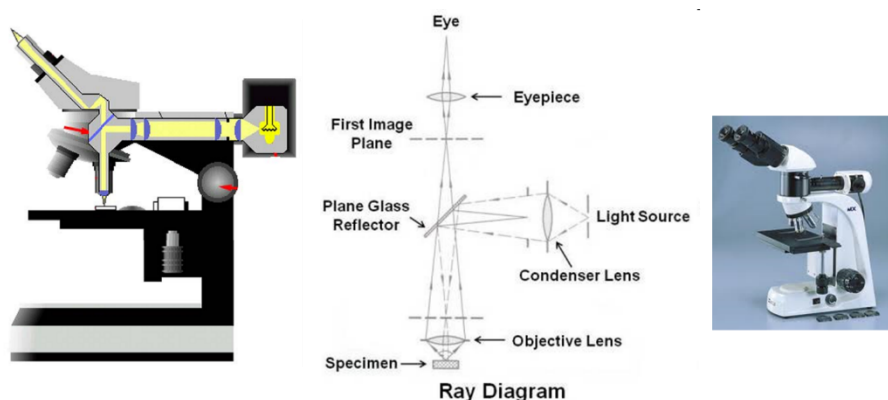
Slika 5.6 Poprečni presjek cilindričnog bakrenog ingota. Uočavaju se izduljena celularna zrna koja se šire u radijalnom smjeru. Po većem dijelu oboda je zrno sitnije (zbog bržeg hlađenja) nego u središnjem dijelu ingota.

5.2 Analiza mikrostrukture metala

Analiza mikrostrukture pomoću optičkog mikroskopa je jedna od najčešće primjenjivanih metalografskih postupaka ispitivanja. Cilj analize mikrostrukture jest što vjernije i jasnije prikazati strukturu nekog materijala te odrediti vrste, veličine, količine i raspodjelu pojedinih mikro konstituenata (faza) u strukturi. Jedan od uvjeta za kvalitetnu analizu mikrostrukture jest kvalitetna priprema ispitnih uzoraka.

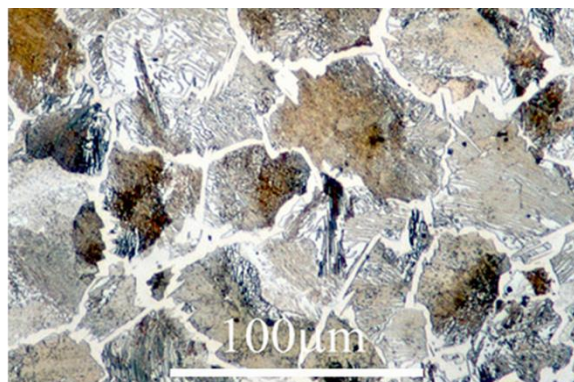
5.2.1 OPTIČKI MIKROSKOP

Većina metala ima previše sitno zrno nevidljivo golom oku. Još u XIX stoljeću izrađeni su mikroskopi s povećanjem od 1500 puta što i danas predstavlja red veličine maksimalnog povećanja optičkog mikroskopa zbog ograničenja valne duljine svjetla. Poprečni presjek metalografskog mikroskopa i princip rada prikazani su na slici 5.7.



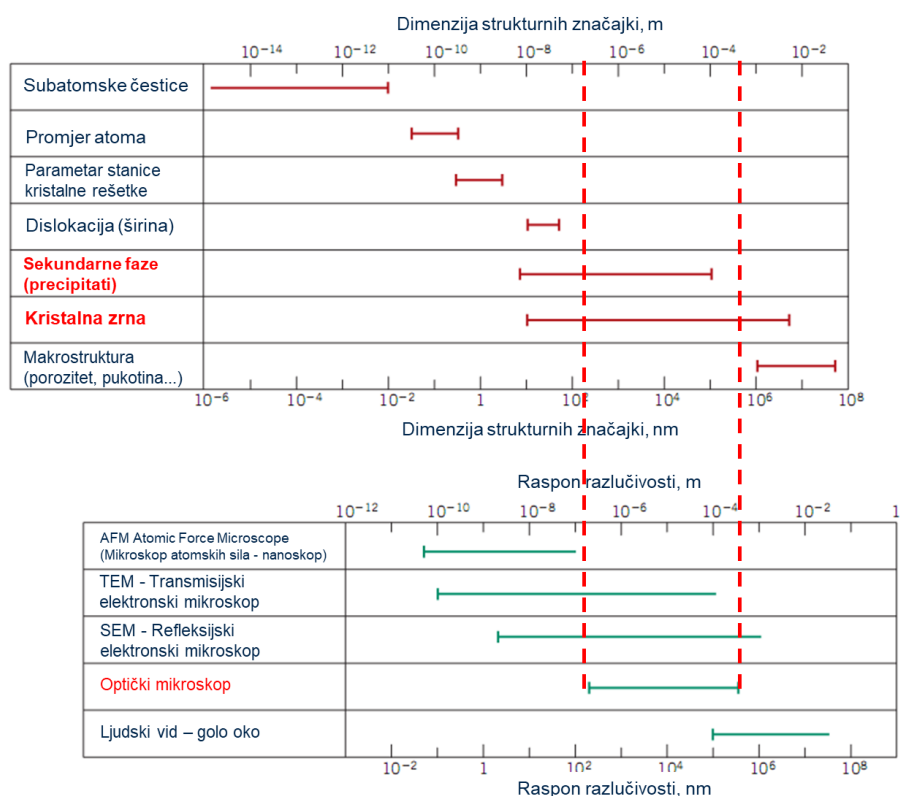
Slika 5.7 Metalografski mikroskop

Pod povećanjem do 1500X mogu se vidjeti zrna svih metala, pa i najsitnija (slika 5.8). Raspoznaju se i mnoge faze, kako primarne, tako i sekundarne. Neke faze (precipitati – sitni kristali intermetalnog spoja) se ipak ne mogu razlučiti optičkim mikroskopom, jer su presitne.



Slika 5.8 Metalografska slika mikrostrukture čelika s 1.3% ugljika

Razlučivost različitih tipova mikroskopa i odgovarajuće faze koje mogu biti vidljive prikazane su na slici 5.9. Na slici je posebno istaknuta razlučivost optičkog mikroskopa koji se najčešće koristi u strojarskoj struci. Može se uočiti da su optičkim mikroskopom vidljiva gotovo sva kristalna zrna i samo veće sekundarne faze.



Slika 5.9 Razlučivost različitih tipova mikroskopa

5.2.2 PRIPREMA UZORAKA

Uzorak za pregled na optičkom mikroskopu treba pažljivo pripremiti kako se na površini ne bi dobila slika izazvana samim procesom pripreme uzorka. Ukoliko su uzorci presitni ili složenog oblika tako da su nezgodni za prihvat u uređaju za brušenje i poliranje površine koja se želi promatrati isti se umeću u kalup i prekrivaju polimernom smjesom (slika 5.10).



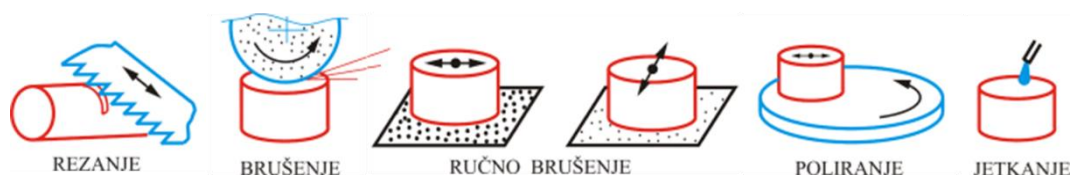
Slika 5.10 Priprema uzoraka malih dimenzija

5.2.3 FAZE PRIPREME UZORAKA

Na slici 5.11 prikazane su faze pripreme uzoraka za promatranje mikrostrukture. Izrezivanje manjeg komada se provodi s intenzivnim hlađenjem kako se ne bi izmijenila mikrostruktura. Površina se zatim fino brusi, najprije za poravnanje na brusilici s brusnim česticama, a zatim pomoću brusnih papira različitih gradacija abrazivnih čestica (od grubljih prema finijim). Pomoću mikroskopa se provjeravaju brazde nastale brušenjem.

Nakon brušenja površina se polira finim abrazivnim sredstvima. Tvrdi metali se poliraju dijamantnom pastom. Može se koristiti i fini prah glinice (aluminijev oksid) u vodenom rastvoru.

Poliranjem se uklanjaju sve brazde (tragovi brušenja) i skida površinski plastično deformirani sloj.



Slika 5.11 Faze pripreme uzoraka za metalografsko ispitivanje

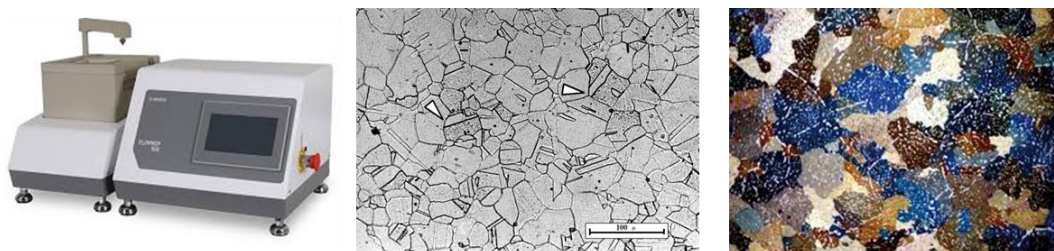
Princip poliranja uzoraka prikazan je na slici 5.12. Kod uređaja s rotirajućim diskom (lijevo na slici 5.12) rezultati poliranja ovise o iskustvu operatera. Obzirom da je sam proces vremenski zahtjevan bolja opcija su automatizirani uređaji za poliranje (slika 5.12 desno) kako zbog uštede vremena tako i zbog značajno boljih rezultata. Nedostatak je značajno viša cijena ovakvih uređaja.



Slika 5.12 Ručno poliranje uzoraka (lijevo) i automatizirano poliranje više uzoraka (desno)

Ovako pripremljeni uzorak pod mikroskopom izgleda kao svijetla ploča - dalje se priprema za promatranje nagrizanjem s odgovarajućom kiselinom koja selektivno nagriza pojedine faze. Obično se nagrizzaju granice kristalnih zrna (slika 5.13 sredina), a moguće je i nagrizzanje same površine zrna. Produkti korozije (nagrizanja) su najčešće tamniji, pa se pod mikroskopom razlikuju tamnije i svjetlije površine što daje sliku zrna, faza (slika 5.13 desno). Neke faze se mogu nagrizzanjem i obojiti. Ako su metali čisti onda se uočavaju samo granice zrna koje prilikom nagrizanja postaju tamnije.

Intenzivnije nagrizzanje se postiže postavljanjem uzorka u elektrolit i propuštanjem struje kroz uzorak i elektrodu što izaziva intenzivno elektrokemijsko nagrizzanje (korozija) - slika 5.13 lijevo. Ovo elektrolitičko nagrizzanje može zamijeniti neke stupnjeve finog brušenja i poliranje, čime se izbjegava plastična deformacija površine.

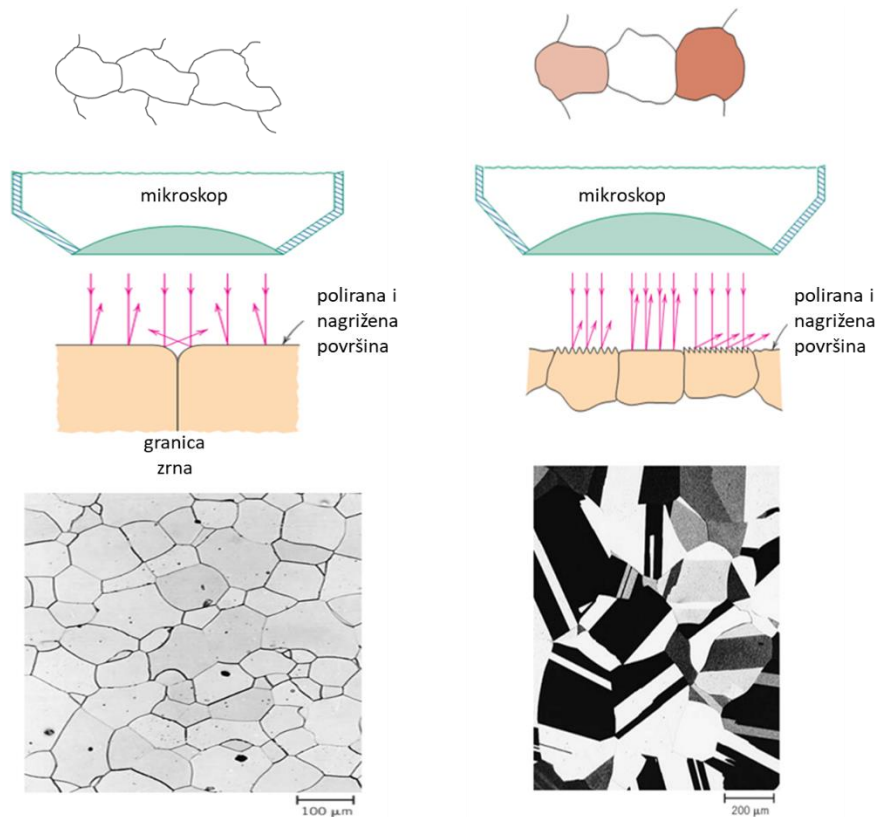


Slika 5.13 Uređaj za elektrolitičko nagrizzanje (lijevo), metalografske slike mikrostrukture (sredina i desno)

Rasvjeta promatrane površine može biti okomita, ali i kosa. Dubinska oštrina optičkog mikroskopa je vrlo mala, tako da površina mora biti jako glatka, a plohe paralelne. Većina mikroskopa ima priključenu i kameru za snimanje mikrostrukture, a često i uređaj za mjerenje mikrotvrdoće pojedinih faza u metalu.

Princip nastajanja slike granice zrna vidljiv je na slici 5.14 lijevo, a nastajanje slike kristalnog zrna na slici 5.14 desno. Ovdje treba napomenuti da ponekad kristalna zrna iste faze mogu imati drugačiji izgled zbog orijentacije kristalografskih osiju u odnosu na smjer upada svjetla. Do nastanka slike u okularu mikroskopa dolazi zbog različite refleksije svjetla na površini promatranog uzorka. Na glatkim mjestima gotovo se čitava količina svjetla reflektira i sustavom

leća i ogledala odvodi do okulara (svjetlija područja), dok se na mjestima nepravilnih geometrija svjetlost rasipa te se manja količina svjetla vraća prema okularu što rezultira tamnijim područjima.

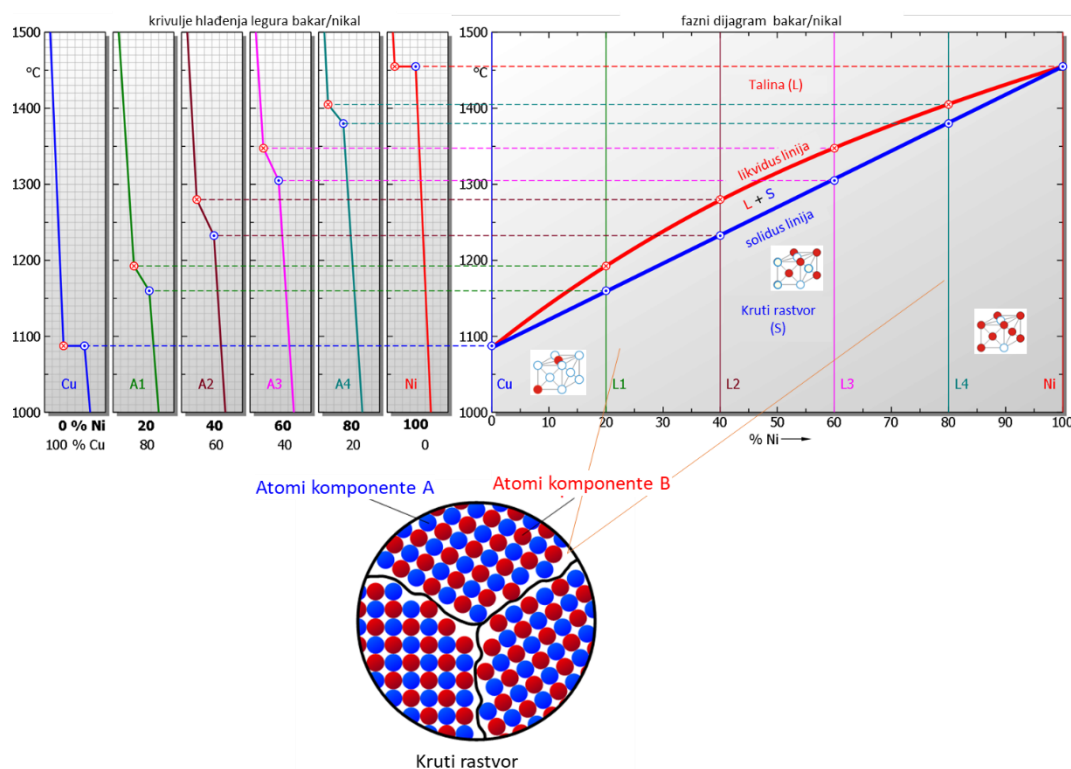


Slika 5.14 Princip nastajanja slike kod optičkog mikroskopa za čiste metale i monofazne legure (lijevo) i za višefazne legure (desno)

6 BINARNI DIJAGRAMI SLIJEVANJA POTPUNE RASTVORIVOSTI U KRUTINI I POTPUNE NERASTVORIVOSTI U KRUTINI

6.1 DIJAGRAM POTPUNE RASTVORIVOSTI U TALINI I KRUTINI

Do slučaja potpune rastvorivosti komponenti u krutini dolazi ako komponente tvore mješance istog tipa u kojima se mogu pronaći obje komponente u bilo kojem količinskom udjelu. Do ovog slučaja dolazi ako obje komponente kristaliziraju istim tipom kristalne rešetke, imaju dimenzije atom razlike ne veće od 8% te su bliske elektronegativnosti. Konstrukcija dijagrama komponenti potpune rastvorivosti u krutini prikazana je na slici 6.1. U donjem dijelu slike se vidi načelna metalografska slika koja ukazuje na nastanak kristala mješanaca bakra i nikla. Unutar svakog kristalnog zrna nalaze se atomi i jedne i druge komponente.



Slika 6.1 Konstrukcija Cu-Ni dijagrama komponenti potpune rastvorivosti u krutini

Primjena polužnog zakona za određivanje količinskih udjela faza prikazana je na slici 6.2.

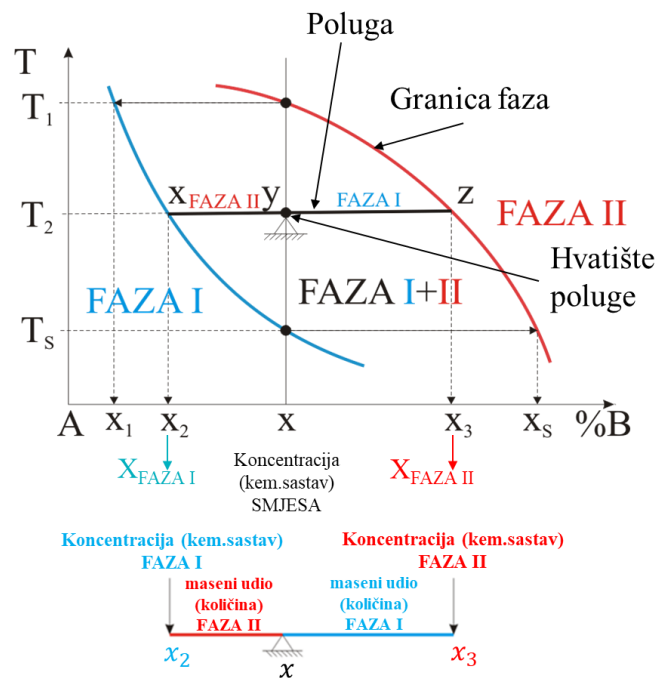
Količinski udjeli faza:

$$FAZA1 = \frac{\overline{YZ}}{\overline{XY} + \overline{YZ}} = \frac{\overline{YZ}}{\overline{XZ}} \cdot 100[\%]$$

$$FAZA1 = \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2} \cdot 100[\%]$$

$$FAZA2 = \frac{\overline{XY}}{\overline{XY} + \overline{YZ}} = \frac{\overline{XY}}{\overline{XZ}} \cdot 100[\%]$$

$$FAZA2 = \frac{x - x_2}{x_3 - x_2} \cdot 100[\%]$$

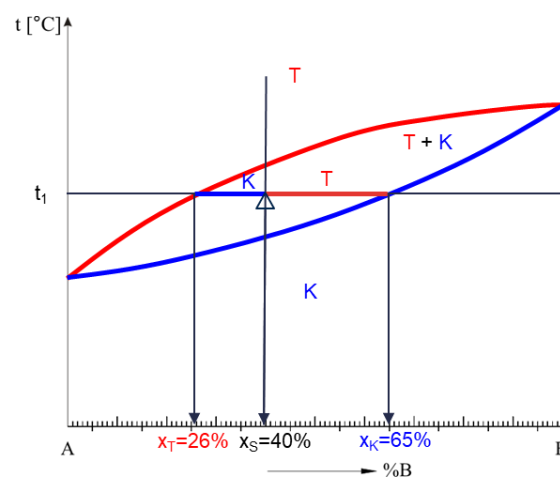
**Koncentracije faza:**

$$X_{FAZA1} = x_2 \quad X_{FAZA2} = x_3$$

Slika 6.2 Primjena polužnog zakona za određivanje količinskih udjela faza

6.1.1 Primjer proračuna količinskih udjela faza legure potpune rastvorivosti u krutini

Za zadanu koncentraciju 40% B komponente i dijagram na slici 6.3 potrebno je odrediti vrste, masene količinske udjele i kemijske sastave (koncentracije) faza.



Slika 6.3 Dijagram komponenti potpune rastvorivosti u talini i krutini

RJEŠENJE:

Za t_1 i x_S :

Proračun količinskog udjela krutine:

$$K_{65\%B} = \frac{x_S - x_T}{x_K - x_T} \cdot 100\%$$

$$K_{65\%B} = \frac{40 - 26}{65 - 26} \cdot 100\%$$

$$K_{65\%B} = 35,9\%$$

Proračun količinskog udjela taline:

$$T_{26\%B} = \frac{x_K - x_S}{x_K - x_T} \cdot 100\%$$

$$T_{26\%B} = \frac{65 - 40}{65 - 26} \cdot 100\%$$

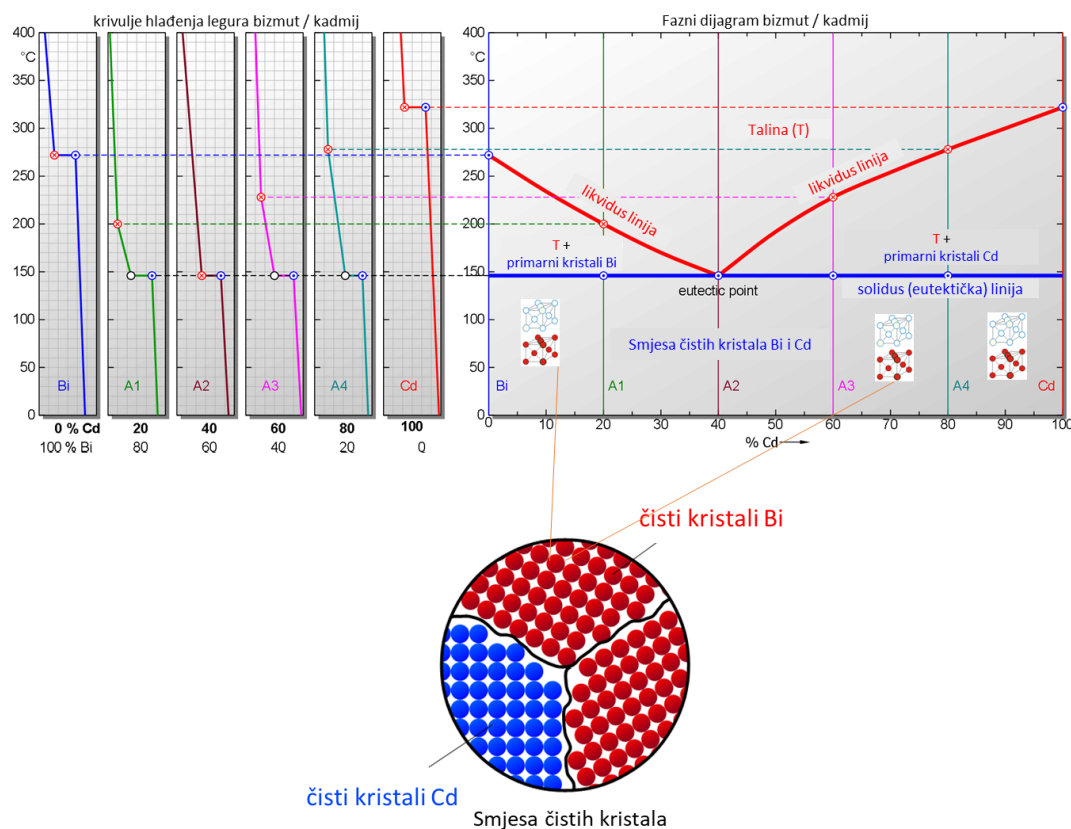
$$T_{26\%B} = 64,1\%$$

Kontrola:

$$K_{65\%B} + T_{26\%B} = 35,9\% + 64,1\% = 100\%$$

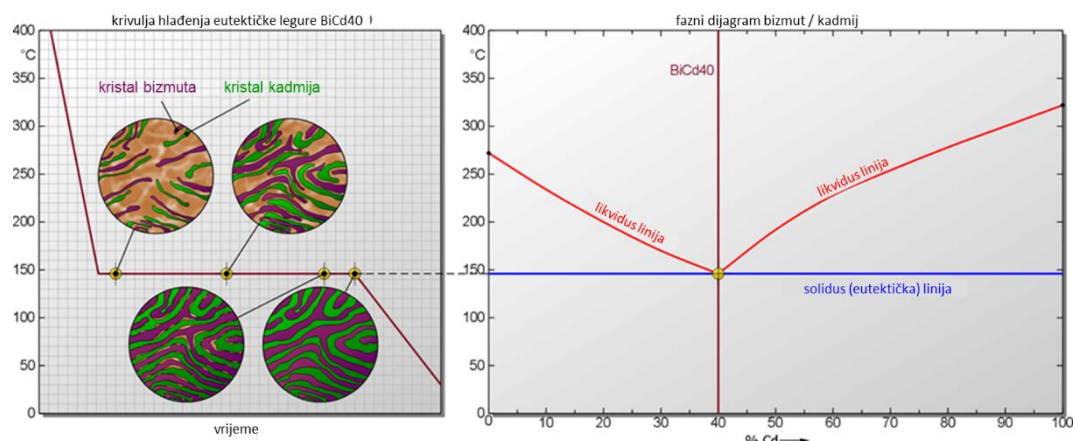
Za zadanu temperaturu i koncentraciju egzistiraju dvije faze: talina i krutina. Kemijski sastav taline je 26% B komponente, dok je kemijski sastav krutine 65% B komponente što se može očitati na apscisi dijagrama na slici 6.3. Količinski udio taline na temperaturi t_1 64,1% dok je količinski udio krutine 35,9%.

6.2 EUTEKTIČKI DIJAGRAM POTPUNE RASTVORIVOSTI U TALINI I POTPUNE NERASTVORIVOSTI U KRUTINI



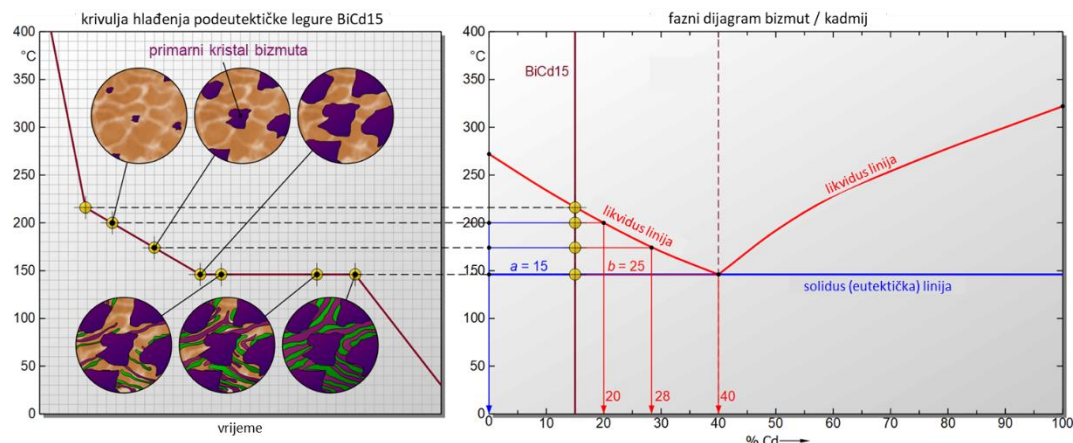
Slika 6.4 Konstrukcija dijagrama komponenti potpune nerastvorivosti u krutini s eutektikumom Bi-Cd

Do slučaja potpune nerastvorivosti komponenti u krutini dolazi ako komponente tvore isključivo čiste kristale svake od komponenti. Do ovog slučaja dolazi ako su komponente različitog tipa kristalne rešetke, imaju veću razliku radijusa atoma od 15% te su znatno različite elektronegativnosti. Konstrukcija dijagrama komponenti potpune nerastvorivosti u krutini s eutektikumom prikazana je na slici 6.4. U donjem dijelu slike se vidi načelna metalografska slika koja ukazuje na nastanak isključivo čistih kristala bizmuta i čistih kristala kadmija. Unutar svakog kristalnog zrna nalaze se atomi samo jedne od komponenti. U dijagramu hlađenja na slici 6.5 (lijevo) prikazano je postupno skrućivanje taline razvojem fine eutektičke strukture koja se sastoji iz sitnih čistih kristala obje komponente pretežno lamelarne strukture.



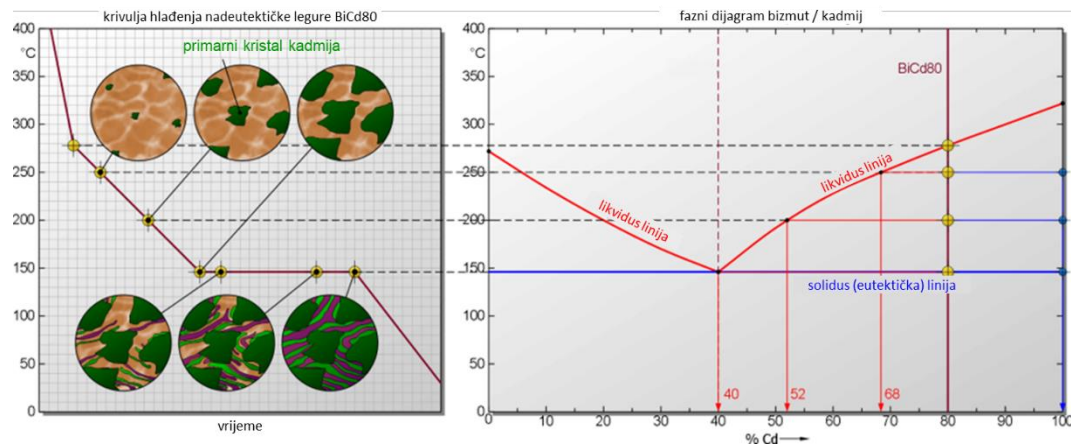
Slika 6.5 Razvoj mikrostrukture pri skrućivanju taline eutektičke koncentracije (40% Cd – 60% Bi)

Na slikama 6.6 i 6.7 prikazane su krivulje hlađenja i odgovarajuće metalografske skice u različitim trenucima skrućivanja za legure podeutektičke i nadeutektičke koncentracije. U jednom i drugom slučaju skrućivanje započinje nastankom primarnih čistih kristala u temperaturnom intervalu nakon čega slijedi stajanje na krivulji hlađenja praćeno nastankom fine eutektičke (mehaničke) smjese čistih kristala kadmija i bizmuta.



Slika 6.6 Razvoj mikrostrukture pri skrućivanju taline podeutektičke koncentracije (15% Cd – 85% Bi)

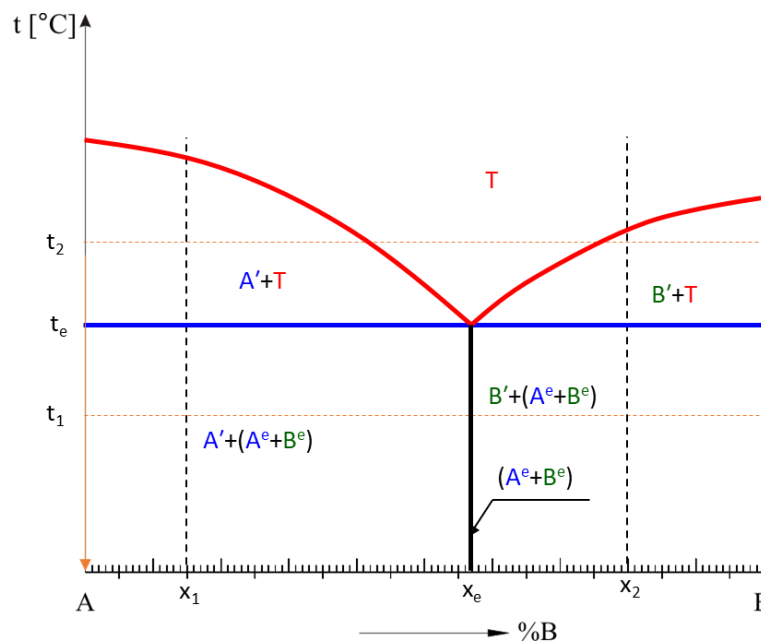
Izrazito krupni primarni kristali nastaju u slučaju kada je legura jako bogata jednom od komponenti. Približavanjem kemijskog sastava legure eutektičkoj koncentraciji veličina primarnih kristala postaje sve manja i raste udio eutektičke smjese.



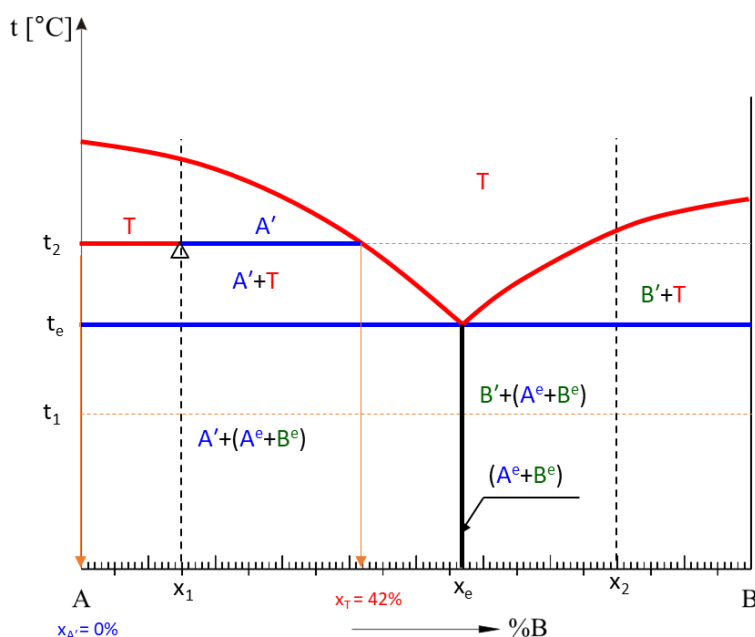
Slika 6.7 Razvoj mikrostrukture pri skrućivanju taline nadeutektičke koncentracije (80% Cd – 20% Bi)

6.2.1 Primjer proračuna količinskih udjela faza eutektičke legure potpune nerastvorivosti u krutini

Za zadane koncentracije $x_1 = 15 \%B$, $x_e = 57 \%B$ i $x_2 = 80 \%B$ i dijagram na slici 6.8 potrebno je odrediti vrste, masene količinske udjele i kemijske sastave (koncentracije) faza i to za temperaturu t_2 , eutektičku temperaturu u prvom trenutku t_e^I i eutektičku temperaturu u drugom trenutku t_e^{II} .

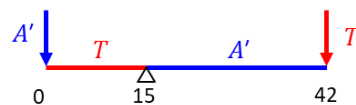


Slika 6.8 Dijagram komponenti potpune rastvorivosti u talini i krutini

RJEŠENJE:**Proračun za koncentraciju x_1** **Proračun za konstitucijsku točku t_2 i $x_1 = 15 \%B$:****Kontrola:**

$$A'_{0\%B} + T_{42\%B} = 100\%$$

$$64,29 + 35,71 = 100\%$$



$$A'_{0\%B} = \frac{x_T - x_1}{x_T - x_{A'}} \cdot 100\%$$

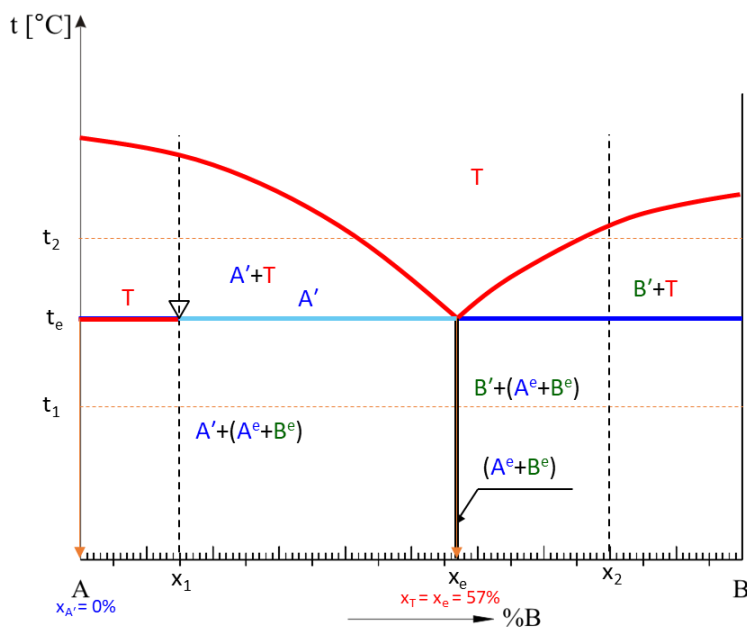
$$A'_{0\%B} = \frac{42 - 15}{42 - 0} \cdot 100\%$$

$$A'_{0\%B} = 64,29\%$$

$$T_{42\%B} = \frac{x_1 - x_{A'}}{x_T - x_{A'}} \cdot 100\%$$

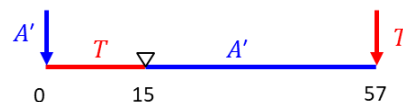
$$T_{42\%B} = \frac{15 - 0}{42 - 0} \cdot 100\%$$

$$T_{42\%B} = 35,71\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_e^I i $x_1 = 15 \%B$ (prvi trenutak!):**Kontrola:**

$$A'_{0\%B} + T_{57\%B} = 100\%$$

$$73,68 + 26,32 = 100\%$$



$$A'_{0\%B} = \frac{x_e - x_1}{x_e - x_{A'}} \cdot 100\%$$

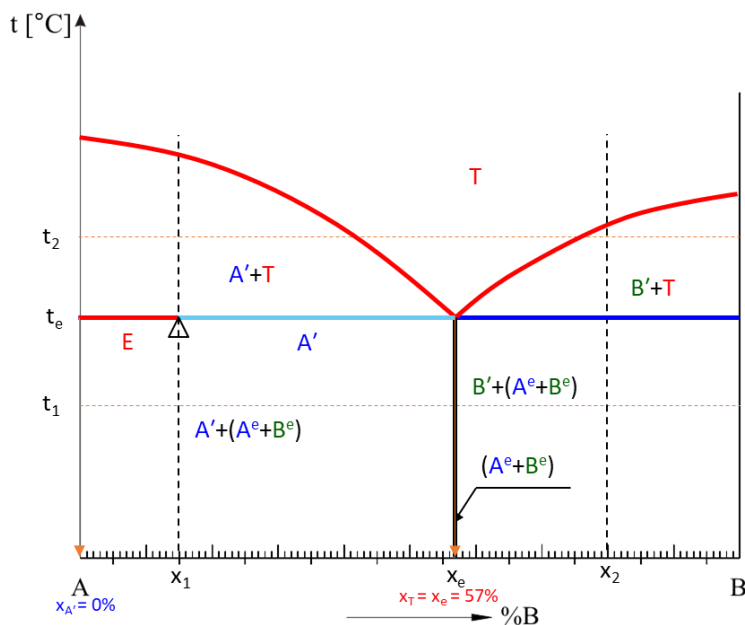
$$A'_{0\%B} = \frac{57 - 15}{57 - 0} \cdot 100\%$$

$$A'_{0\%B} = 73,68\%$$

$$T_{57\%B} = \frac{x_1 - x_{A'}}{x_e - x_{A'}} \cdot 100\%$$

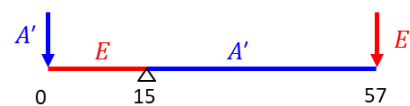
$$T_{57\%B} = \frac{15 - 0}{57 - 0} \cdot 100\%$$

$$T_{57\%B} = 26,32\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_e^H i $x_1 = 15\%B$ (drugi trenutak!):**Kontrola:**

$$A'_{0\%B} + E_{42\%B} = 100\%$$

$$73,68 + 26,32 = 100\%$$



$$A'_{0\%B} = \frac{x_e - x_1}{x_e - x_{A'}} \cdot 100\%$$

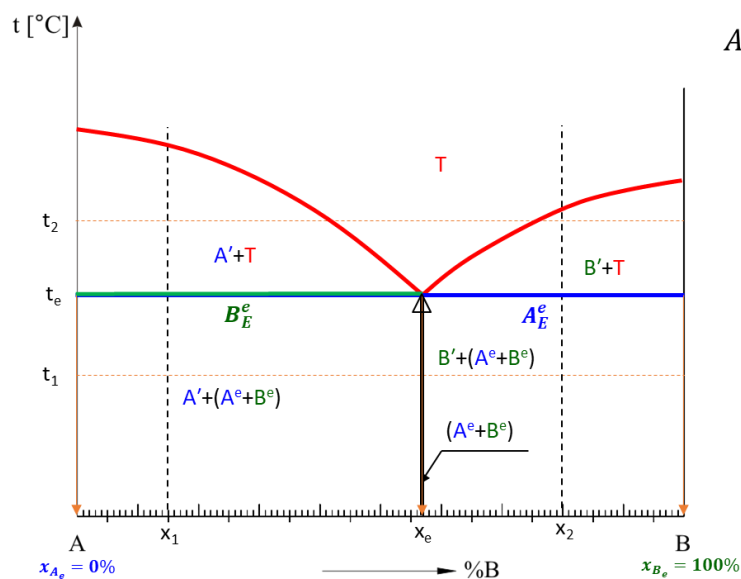
$$A'_{0\%B} = \frac{57 - 15}{57 - 0} \cdot 100\%$$

$$A'_{0\%B} = 73,68\%$$

$$E_{57\%B} = \frac{x_1 - x_{A'}}{x_e - x_{A'}} \cdot 100\%$$

$$E_{57\%B} = \frac{15 - 0}{57 - 0} \cdot 100\%$$

$$E_{57\%B} = 26,32\%$$

Određivanje količine eutektičkih kristala

$$A' = 73,68\% \quad E = 26,32\%$$



$$A_{E0\%B}^e = \frac{x_{Be} - x_e}{x_{Be} - x_{Ae}} \cdot 100\%$$

$$A_{E0\%B}^e = \frac{100 - 57}{100 - 0} \cdot 100\%$$

$$A_{E0\%B}^e = 43\%$$

$$B_{E100\%B}^e = \frac{x_e - x_{Ae}}{x_{Be} - x_{Ae}} \cdot 100\%$$

$$B_{E100\%B}^e = \frac{57 - 0}{100 - 0} \cdot 100\%$$

$$B_{E100\%B}^e = 57\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$A^e = A_{E0\%B}^e \cdot E \cdot 100\% = 0,43 \cdot 0,2632 \cdot 100\% = 11,32\%$$

$$B^e = B_{E100\%B}^e \cdot E \cdot 100\% = 0,57 \cdot 0,2632 \cdot 100\% = 15\%$$

Kontrola:

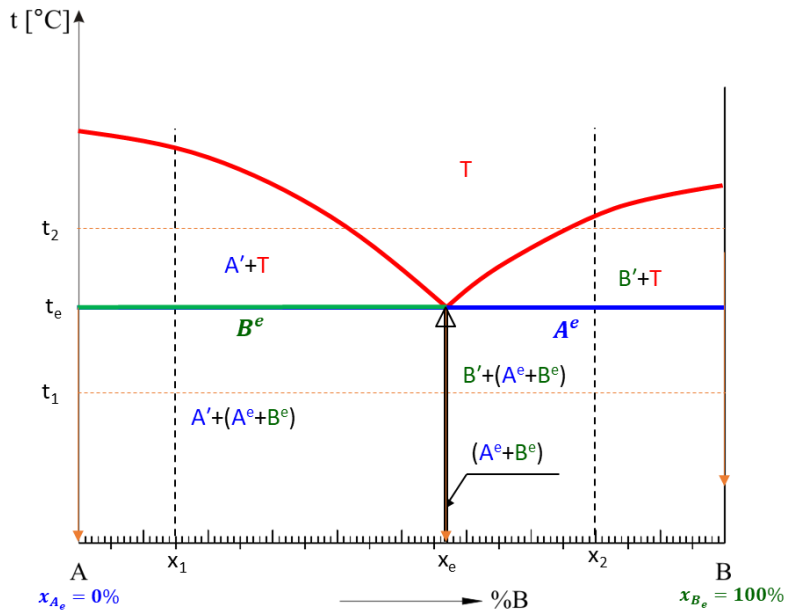
$$A' + (A^e + B^e) = 100\%$$

$$73,68 + (11,32 + 15) = 100\%$$

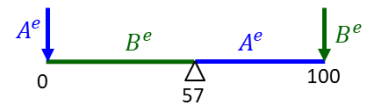
$A_{E0\%B}^e, B_{E100\%B}^e$ - relativni količinski udjeli
(unutar eutektikuma)!

Proračun za koncentraciju x_e **Proračun za konstitucijsku točku t_e^I i $x_e = 57\%B$ (prvi trenutak!):**

Proračun nije potreban jer je u prvom trenutku za eutektičku koncentraciju fazni sastav 100% talina.

Proračun za konstitucijsku točku t_e^{II} i $x_e = 57\%B$ (drugi trenutak!):**Kontrola:** $A^e + B^e = 100\%$

$$43 + 57 = 100\%$$



$$A_{0\%B}^e = \frac{x_{B_e} - x_e}{x_{B_e} - x_{A_e}} \cdot 100\%$$

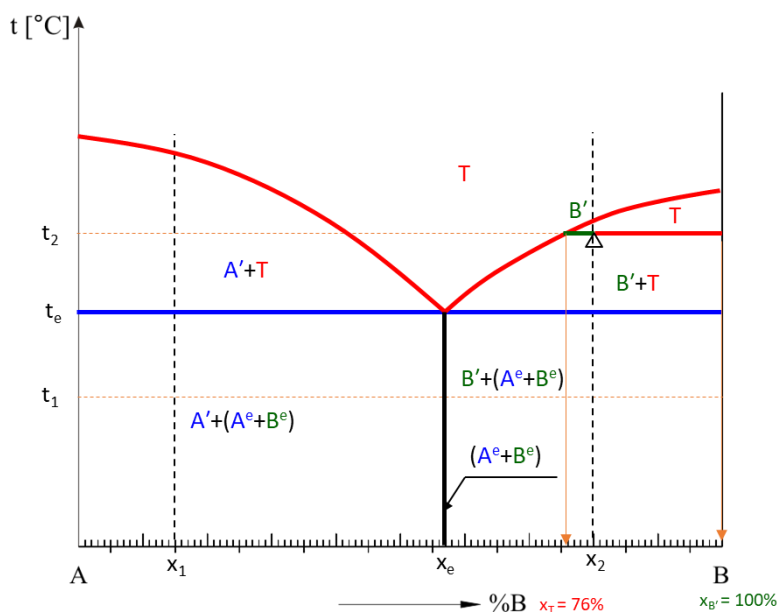
$$A_{0\%B}^e = \frac{100 - 57}{100 - 0} \cdot 100\%$$

$$A_{0\%B}^e = 43\%$$

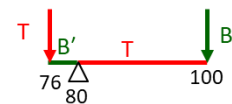
$$B_{100\%B}^e = \frac{x_e - x_{A_e}}{x_{B_e} - x_{A_e}} \cdot 100\%$$

$$B_{100\%B}^e = \frac{57 - 0}{100 - 0} \cdot 100\%$$

$$B_{100\%B}^e = 57\%$$

Proračun za koncentraciju x_2 **Proračun za konstitucijsku točku t_2 i $x_2 = 80\%B$:****Kontrola:** $B'_{100\%B} + T_{76\%B} = 100\%$

$$16,67 + 83,33 = 100\%$$



$$B'_{100\%B} = \frac{x_2 - x_T}{x_{B'} - x_T} \cdot 100\%$$

$$B'_{100\%B} = \frac{80 - 76}{100 - 76} \cdot 100\%$$

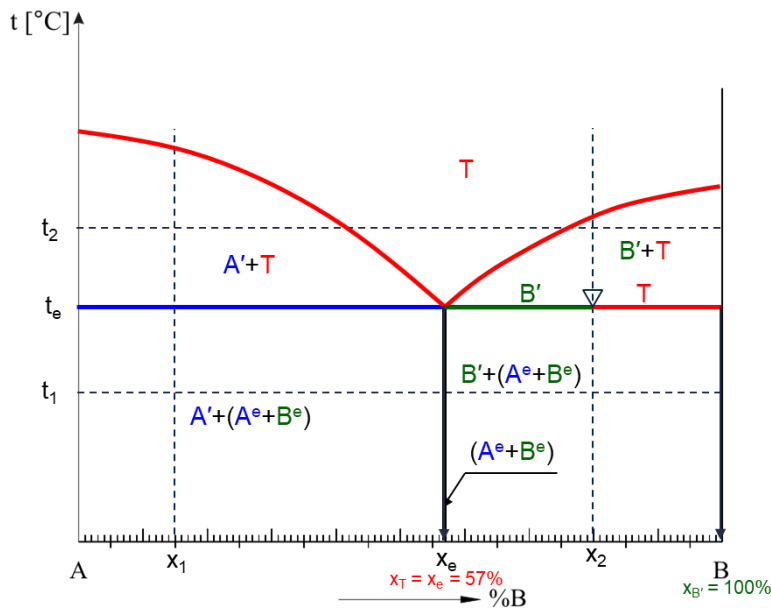
$$B'_{100\%B} = 16,67\%$$

$$T_{76\%B} = \frac{x_{B'} - x_2}{x_{B'} - x_T} \cdot 100\%$$

$$T_{76\%B} = \frac{100 - 80}{100 - 76} \cdot 100\%$$

$$T_{76\%B} = 83,33\%$$

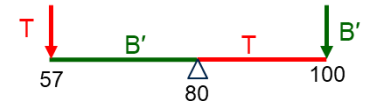
Proračun za konstitucijsku točku t_e^I i $x_2 = 80 \%B$ (prvi trenutak!):



Kontrola:

$$B'_{100\%B} + T_{57\%B} = 100\%$$

$$53,49 + 46,51 = 100\%$$



$$B'_{100\%B} = \frac{x_2 - x_e}{x_{B'} - x_e} \cdot 100\%$$

$$B'_{100\%B} = \frac{80 - 57}{100 - 57} \cdot 100\%$$

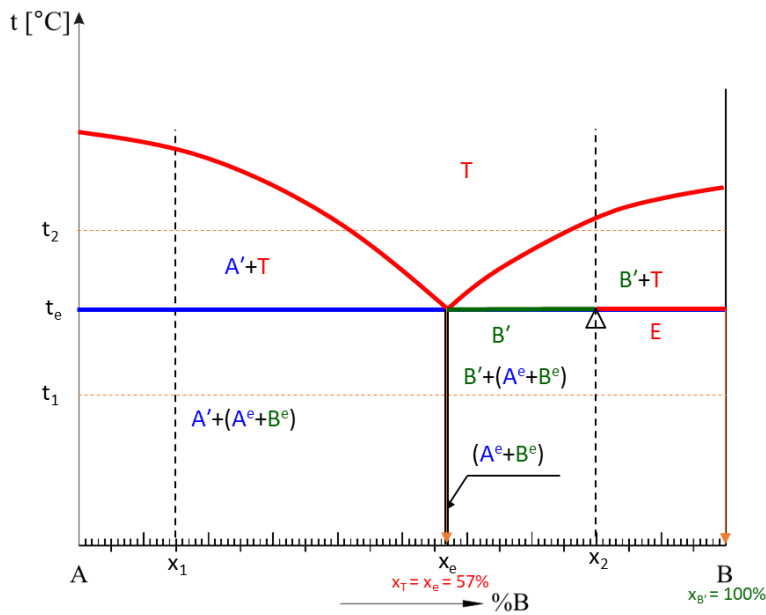
$$B'_{100\%B} = 53,49\%$$

$$T_{57\%B} = \frac{x_{B'} - x_2}{x_{B'} - x_e} \cdot 100\%$$

$$T_{57\%B} = \frac{100 - 80}{100 - 57} \cdot 100\%$$

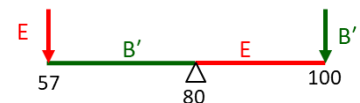
$$T_{57\%B} = 46,51\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_e^{II} i $x_2 = 80 \%B$ (drugi trenutak!):



Kontrola: $B'_{100\%B} + E_{57\%B} = 100\%$

$$53,49 + 46,51 = 100\%$$



$$B'_{100\%B} = \frac{x_2 - x_e}{x_{B'} - x_e} \cdot 100\%$$

$$B'_{100\%B} = \frac{80 - 57}{100 - 57} \cdot 100\%$$

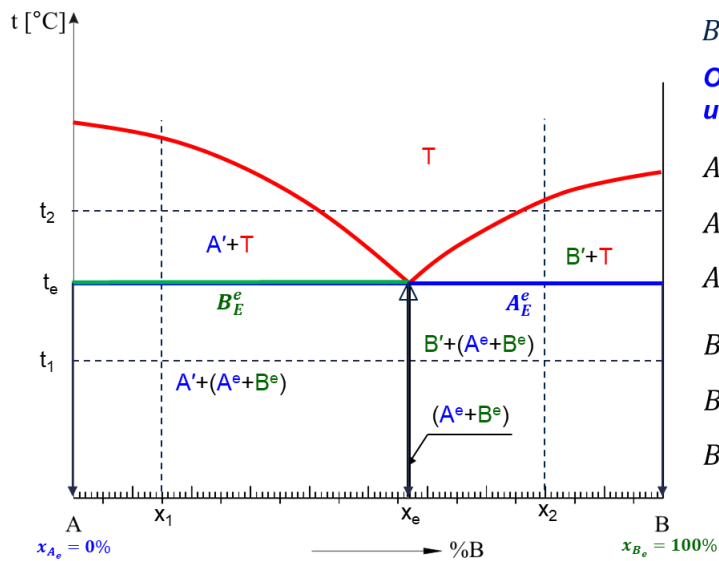
$$B'_{100\%B} = 53,49\%$$

$$E_{57\%B} = \frac{x_{B'} - x_2}{x_{B'} - x_e} \cdot 100\%$$

$$E_{57\%B} = \frac{100 - 80}{100 - 57} \cdot 100\%$$

$$E_{57\%B} = 46,51\%$$

Određivanje količine eutektičkih kristala



$$B' = 53,49\% \quad E = 46,51\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$A^e = A_E^e \cdot E \cdot 100\%$$

$$A^e = 0,43 \cdot 0,4651 \cdot 100\%$$

$$A^e = 20\%$$

$$B^e = B_E^e \cdot E \cdot 100\%$$

$$B^e = 0,57 \cdot 0,4651 \cdot 100\%$$

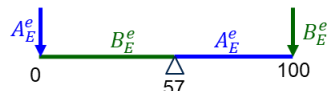
$$B^e = 26,51\%$$

Kontrola:

$$A' + (A^e + B^e) = 100\%$$

$$53,49 + (20 + 26,51) = 100\%$$

Drugi trenutak ! Za t_e'' i $x_e = 57\%B$:



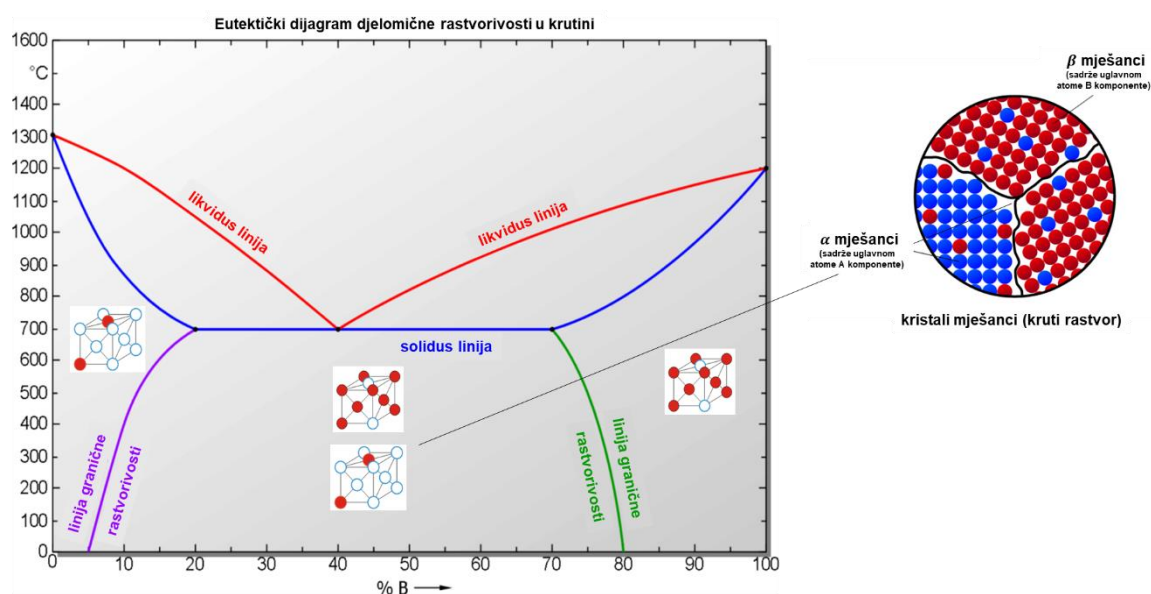
$$A_{E_{0\%B}}^e = \frac{x_{B_e} - x_e}{x_{B_e} - x_{A_e}} \cdot 100\% = \frac{100 - 57}{100 - 0} \cdot 100\% = 43\%$$

$$B_{E_{100\%B}}^e = \frac{x_e - x_{A_e}}{x_{B_e} - x_{A_e}} \cdot 100 = \frac{57 - 0}{100 - 0} \cdot 100\% = 57\%$$

Relativni količinski udjeli (unutar eutektikuma)!

7 EUTEKTIČKI DIJAGRAM DJELOMIČNE RASTVORIVOSTI U KRUTINI I POTPUNE RASTVORIVOSTI U TALINI

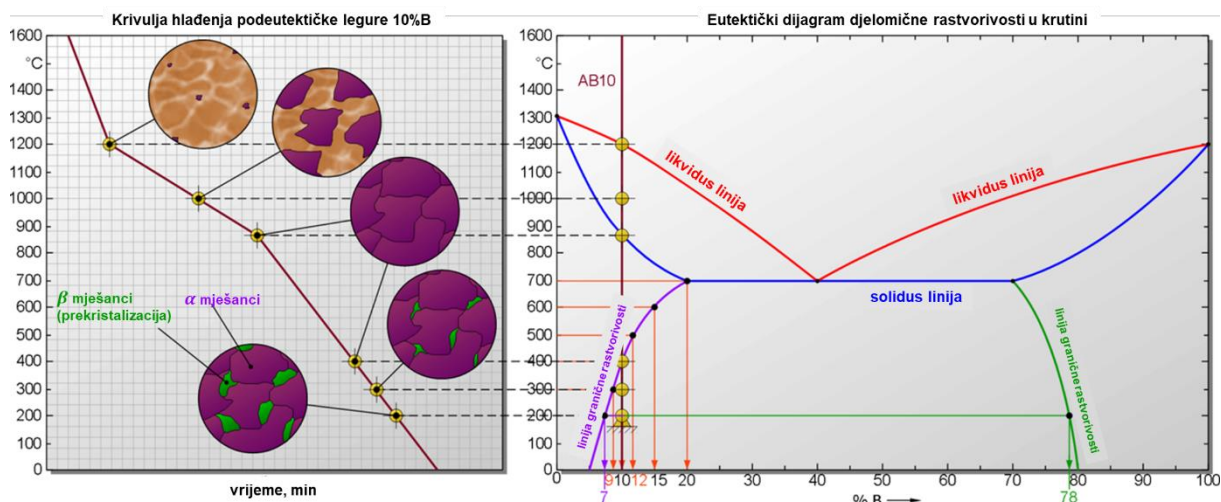
Eutektički dijagram djelomične rastvorivosti u krutini nastaje u slučaju kada komponente tvore kristale mješance, ali samo određene rastvorivosti. Nastaju dva tipa kristala mješanca i to jedne i druge komponente. Unutar oba tipa kristala pronalaze se atomi i jedne i druge komponente (vidi metalografsku skicu na desnoj strani slike 7.1). Komponente koje tvore ovaj tip dijagrama pri točno određenoj koncentraciji skrućuju sa stojištem na krivulji hlađenja u finu mehaničku smjesu kristala mješanaca obje komponente. Do ovog slučaja dolazi ako obje komponente kristaliziraju različitim tipom kristalne rešetke, i ako se dimenzije atoma komponenti ne razlikuju više od 15%. Unutar svakog kristalnog zrna nalaze se atomi i jedne i druge komponente ali samo do određene maksimalne koncentracije koja se za svaku temperaturu može očitati na presjecištu izoterme s linijama granice rastvorivosti.



Slika 7.1 Eutektički dijagram djelomične rastvorivosti u krutini i potpune rastvorivosti u talini

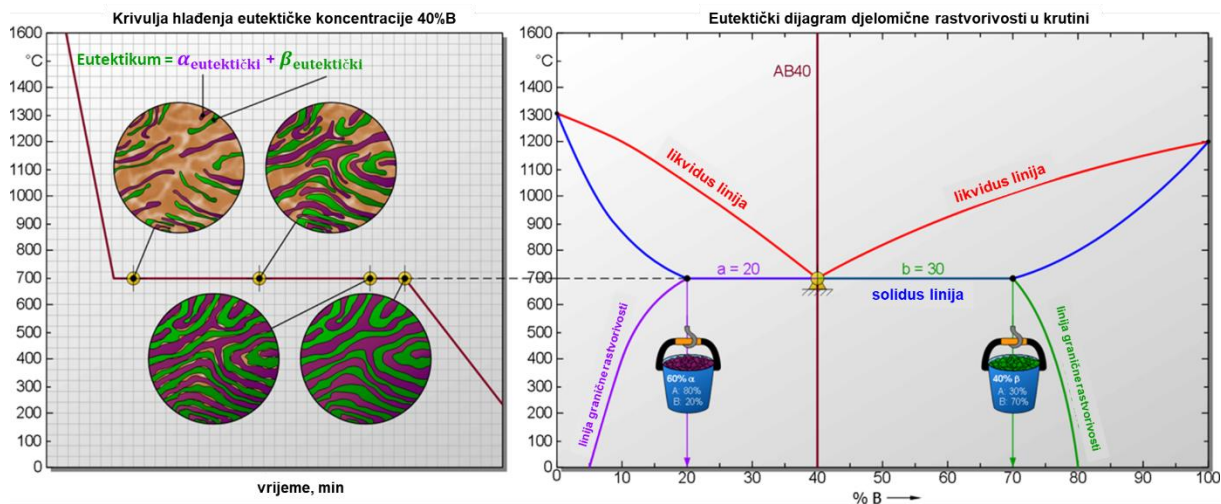
U dijagramu hlađenja na slici 7.2 (lijevo) prikazano je postupno skrućivanje taline podeutektičke koncentracije. Skrućivanje započinje nastankom primarnih kristala A komponente u temperaturnom intervalu, a potom pri stojištu na krivulji hlađenja nastaje fina mehanička smjesa kristala (eutektikum) obje komponente. Treba uočiti da skrućivanje završava nastankom samo primarnih kristala A komponente. Međutim, hlađenjem do sobne temperature, a zbog smanjenja rastvorivosti atoma B komponenta u rešetkama A komponente dolazi do

nastanka sekundarne faze sitnih β kristalića (prekristalizacija – promjena u krutom stanju) započinje na 400 °C i traje do završetka ohlađivanja.



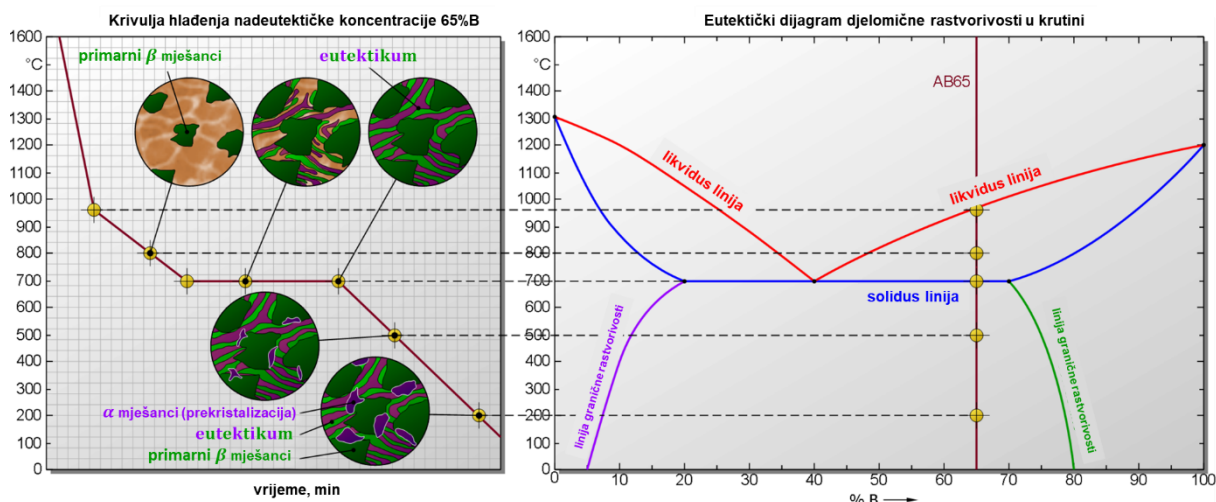
Slika 7.2 Krivulja hlađenja legure podeutektičke koncentracije (lijevo) s odgovarajućom koncentracijom koja je prikazana u faznom dijagramu (desno)

Za točno određenu koncentraciju (u ovom slučaju je to 40% B komponente) javlja se samo stojište pri čemu nastaje isključivo eutektička smjesa sitnih kristalića obje komponente (slika 7.3 lijevo).



Slika 7.3 Krivulja hlađenja legure eutektičke koncentracije (lijevo)

Na slici 7.4 (lijevo) prikazana je krivulja hlađenja taline nadeutektičke koncentracije. Skrućivanje započinje nastankom primarnih kristala B komponente u temperaturnom intervalu, nakon čega slijedi stojište na krivulji hlađenja pri čemu nastaje fina mehanička smjesa kristala (eutektikum) obje komponente. I u ovom slučaju dolazi do prekristalizacije zbog smanjenja rastvorivosti i α i β mješanaca tj. nastaju sekundarne faze.

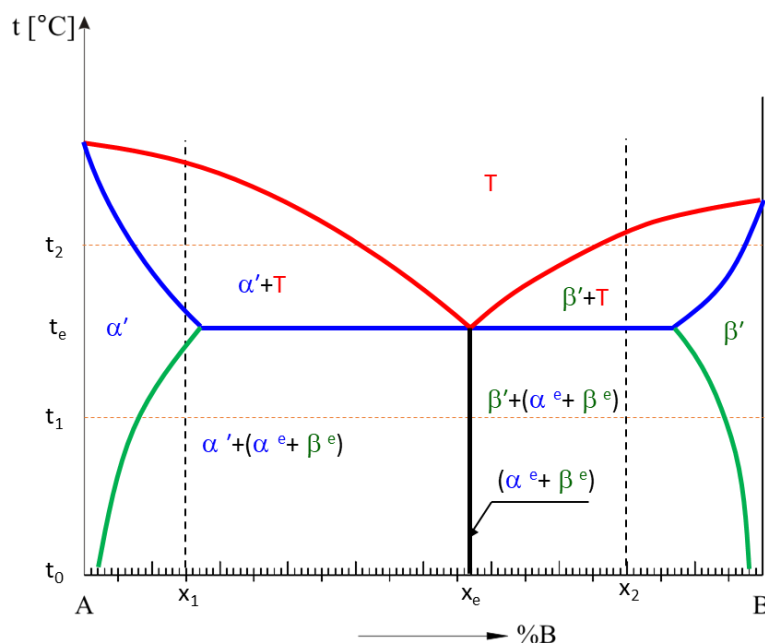


Slika 7.4 Krivulja hlađenja legure nadeutektičke koncentracije (lijevo)

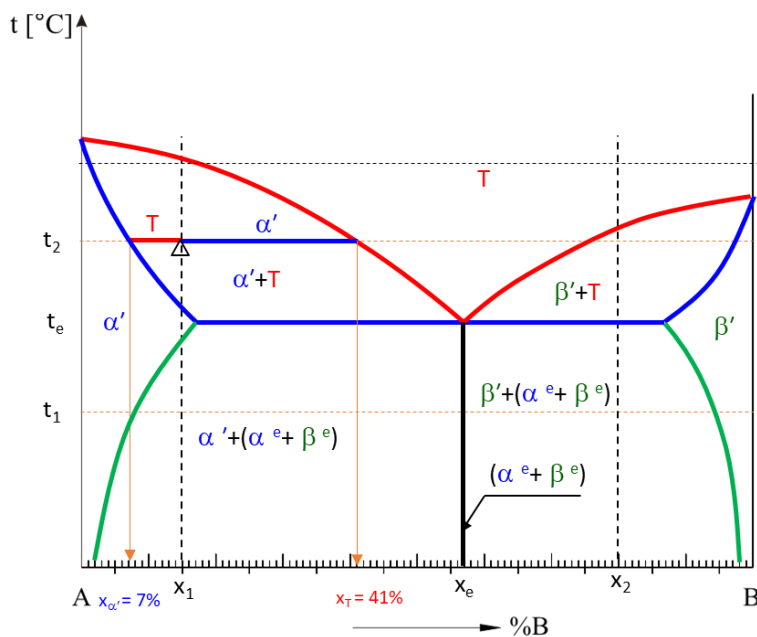
U dijagramima slijevanja sekundarne faze zbog pojednostavljenja se posebno ne naglašavaju, već se pridodaju eutektičkoj fazi.

7.1 Primjer proračuna količinskih udjela faza eutektičke legure djelomične rastvorivosti u krutini

Za zadane koncentracije $x_1 = 15 \%B$, $x_e = 57 \%B$ i $x_2 = 80 \%B$ i dijagram na slici 7.5 potrebno je odrediti vrste, masene količinske udjele i kemijske sastave (koncentracije) faza i to za temperaturu t_2 , eutektičku temperaturu u prvom trenutku t_e^I , eutektičku temperaturu u drugom trenutku t_e^{II} i t_0 .

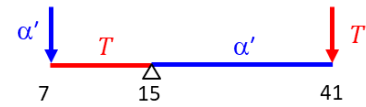


Slika 7.5 Eutektički dijagram djelomične rastvorivosti u krutini

RJEŠENJE:**Proračun za koncentraciju $x_1 = 15\% B$** **Proračun za konstitucijsku točku t_2 i $x_1 = 15\% B$:**

Kontrola: $\alpha'_{7\%B} + T_{41\%B} = 100\%$

$$76,47 + 23,53 = 100\%$$



$$\alpha'_{7\%B} = \frac{x_T - x_1}{x_T - x_{\alpha'}} \cdot 100\%$$

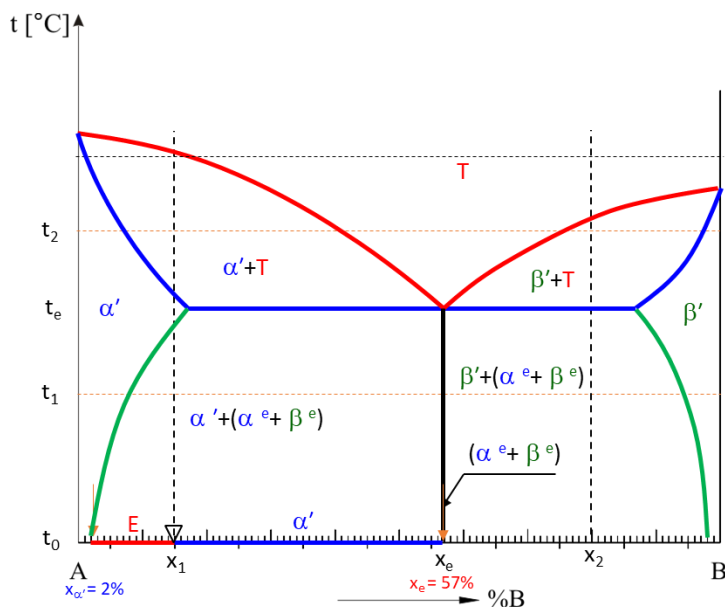
$$\alpha'_{7\%B} = \frac{41 - 15}{41 - 7} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{7\%B} = 76,47\%$$

$$T_{41\%B} = \frac{x_1 - x_{\alpha'}}{x_T - x_{\alpha'}} \cdot 100\%$$

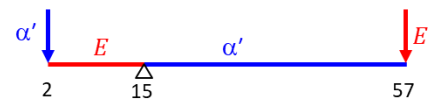
$$T_{41\%B} = \frac{15 - 7}{41 - 7} \cdot 100\%$$

$$T_{41\%B} = 23,53\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_0 i $x_1 = 15\% B$:

Kontrola: $\alpha'_{2\%B} + E_{57\%B} = 100\%$

$$76,36 + 23,64 = 100\%$$



$$\alpha'_{2\%B} = \frac{x_E - x_1}{x_E - x_{\alpha'}} \cdot 100\%$$

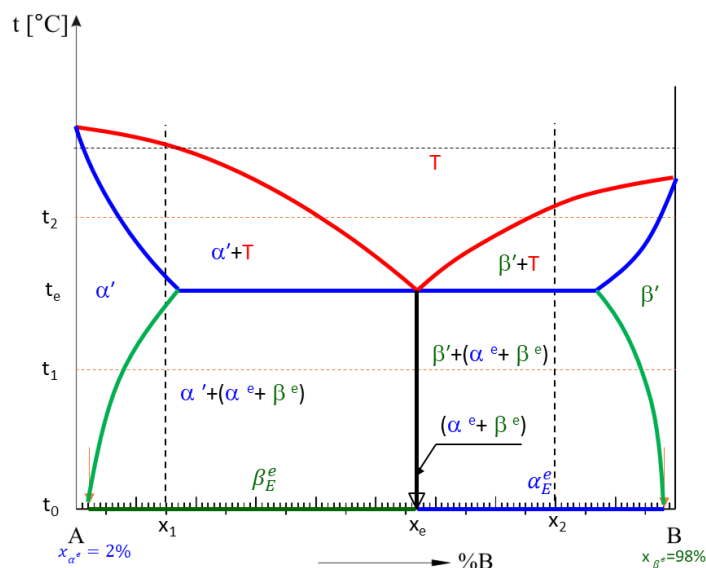
$$\alpha'_{2\%B} = \frac{57 - 15}{57 - 2} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{2\%B} = 76,36\%$$

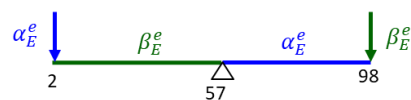
$$E_{57\%B} = \frac{x_1 - x_{\alpha'}}{x_E - x_{\alpha'}} \cdot 100\%$$

$$E_{57\%B} = \frac{15 - 2}{57 - 2} \cdot 100\%$$

$$E_{57\%B} = 23,64\%$$

Određivanje količina eutektičkih faza - konstitucijska točka t_0 i $x_e = 57\%B$:

$$\alpha'_{2\%B} = 76,36\% \quad E_{57\%B} = 23,64\%$$



$$\alpha_{E_{2\%B}}^e = \frac{x_{\beta_e} - x_e}{x_{\beta_e} - x_{\alpha_e}} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{E_{2\%B}}^e = \frac{98 - 57}{98 - 2} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{E_{2\%B}}^e = 42,71\%$$

$$\beta_{E_{98\%B}}^e = \frac{x_e - x_{\alpha_e}}{x_{\beta_e} - x_{\alpha_e}} \cdot 100\%$$

$$\beta_{E_{98\%B}}^e = \frac{57 - 2}{98 - 2} \cdot 100\%$$

$$\beta_{E_{98\%B}}^e = 57,29\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

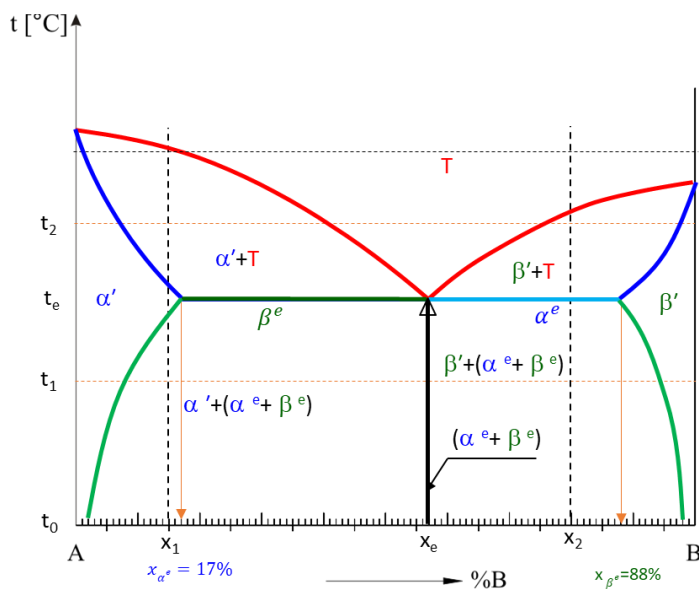
$$\alpha^e = \alpha_{E_{2\%B}}^e \cdot E \cdot 100\% = 0,4271 \cdot 0,2364 \cdot 100\% = 10,09\%$$

$$\beta^e = \beta_{E_{98\%B}}^e \cdot E \cdot 100\% = 0,5729 \cdot 0,2364 \cdot 100\% = 13,55\%$$

Kontrola: $\alpha' + (\alpha^e + \beta^e) = 100\%$

$$76,36 + (10,09 + 13,55) = 100\%$$

$\alpha_{E_{2\%B}}^e, \beta_{E_{98\%B}}^e$ - relativni količinski udjeli
(unutar eutektikuma)!

Proračun za koncentraciju $x_1 = 15\%B$ **Proračun za konstitucijsku točku t_e^H i $x_e = 57\%B$:**

Kontrola: $\alpha^e + \beta^e = 100\%$

$$43,66 + 56,34 = 100\%$$



$$\alpha_{17\%B}^e = \frac{x_{\beta_e} - x_e}{x_{\beta_e} - x_{\alpha_e}} \cdot 100\%$$

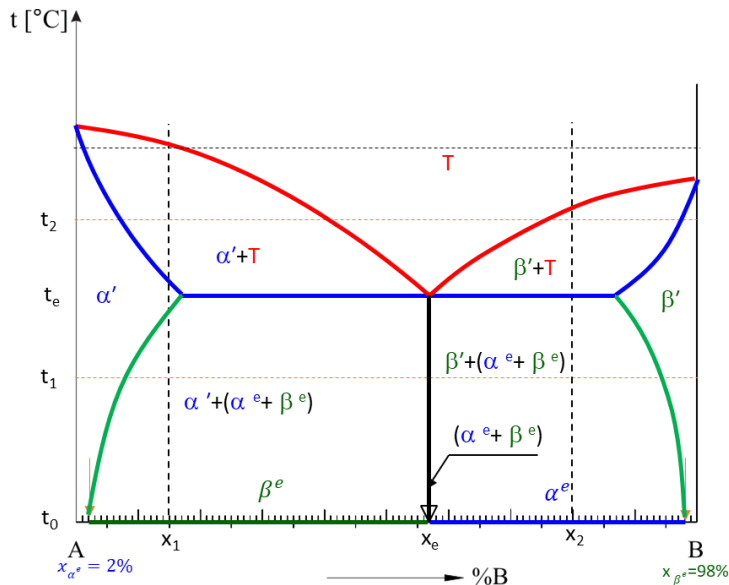
$$\alpha_{17\%B}^e = \frac{88 - 57}{88 - 17} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{17\%B}^e = 43,66\%$$

$$\beta_{88\%B}^e = \frac{x_e - x_{\alpha_e}}{x_{\beta_e} - x_{\alpha_e}} \cdot 100\%$$

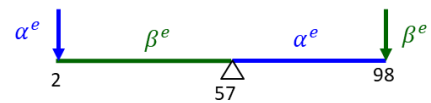
$$\beta_{88\%B}^e = \frac{57 - 17}{88 - 17} \cdot 100\%$$

$$\beta_{88\%B}^e = 56,34\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_0 i $x_e = 57\%B$:

Kontrola: $\alpha^e + \beta^e = 100\%$

$$42,71 + 57,29 = 100\%$$



$$\alpha^e_{2\%B} = \frac{x_{\beta^e} - x_e}{x_{\beta^e} - x_{\alpha^e}} \cdot 100\%$$

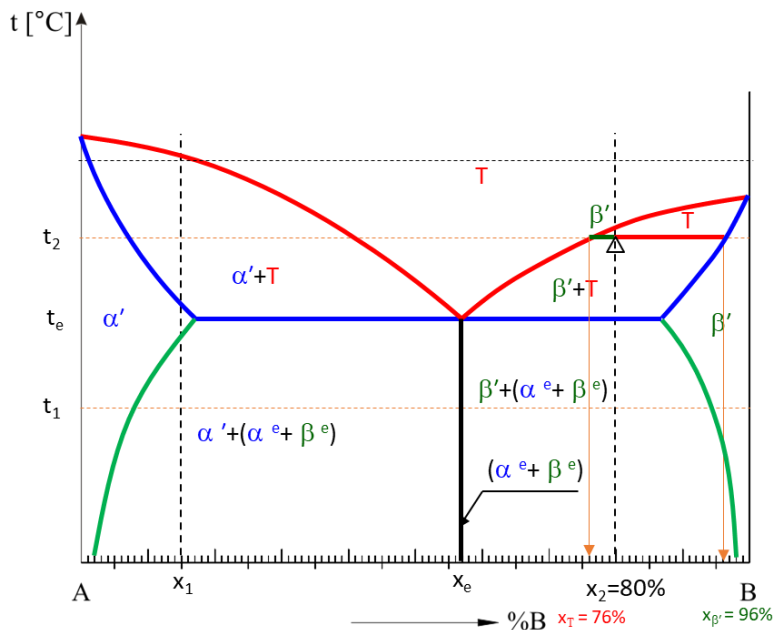
$$\alpha^e_{2\%B} = \frac{98 - 57}{98 - 2} \cdot 100\%$$

$$\alpha^e_{2\%B} = 42,71\%$$

$$\beta^e_{98\%B} = \frac{x_e - x_{\alpha^e}}{x_{\beta^e} - x_{\alpha^e}} \cdot 100\%$$

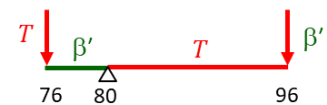
$$\beta^e_{98\%B} = \frac{57 - 2}{98 - 2} \cdot 100\%$$

$$\beta^e_{98\%B} = 57,29\%$$

Proračun za koncentraciju $x_2 = 80\%B$ **Proračun za konstitucijsku točku t_2 i $x_2 = 80\%B$:**

Kontrola: $\beta'_{96\%B} + T_{76\%B} = 100\%$

$$20 + 80 = 100\%$$



$$\beta'_{96\%B} = \frac{x_2 - x_T}{x_{\beta'} - x_T} \cdot 100\%$$

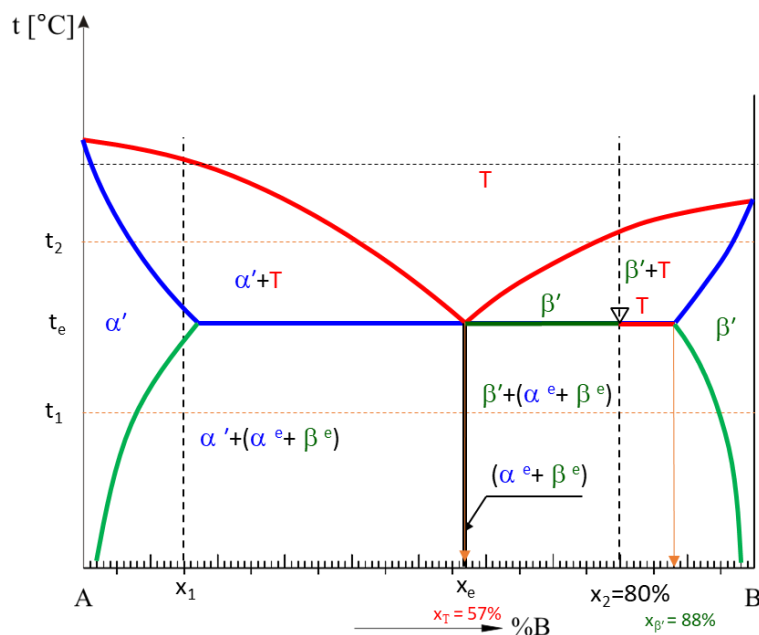
$$\beta'_{96\%B} = \frac{80 - 76}{96 - 76} \cdot 100\%$$

$$\beta'_{96\%B} = 20\%$$

$$T_{76\%B} = \frac{x_{\beta'} - x_2}{x_{\beta'} - x_T} \cdot 100\%$$

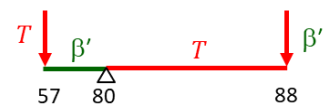
$$T_{76\%B} = \frac{96 - 80}{96 - 76} \cdot 100\%$$

$$T_{76\%B} = 80\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_e^I i $x_2 = 80\%B$:

Kontrola: $\beta'_{88\%B} + T_{57\%B} = 100\%$

$$74,19 + 25,81 = 100\%$$



$$\beta'_{88\%B} = \frac{x_2 - x_T}{x_{\beta'} - x_T} \cdot 100\%$$

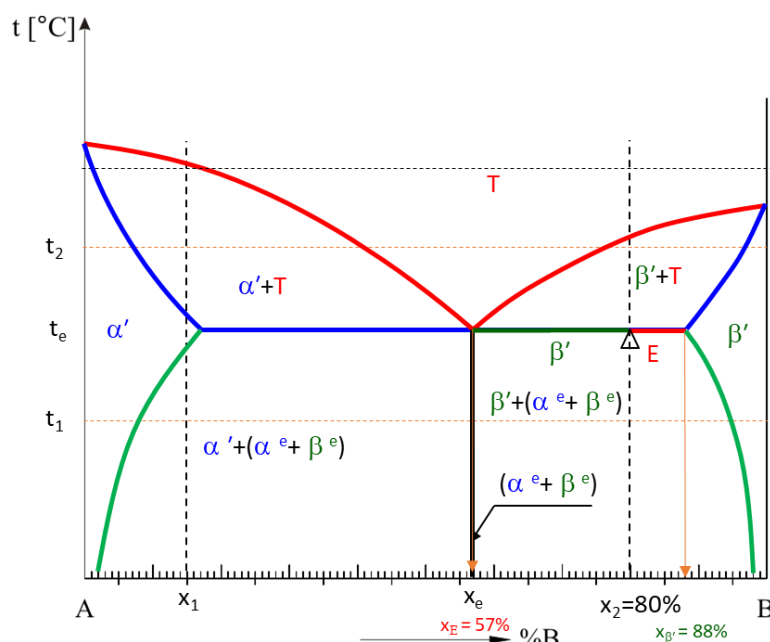
$$\beta'_{88\%B} = \frac{80 - 57}{88 - 57} \cdot 100\%$$

$$\beta'_{88\%B} = 74,19\%$$

$$T_{57\%B} = \frac{x_{\beta'} - x_2}{x_{\beta'} - x_T} \cdot 100\%$$

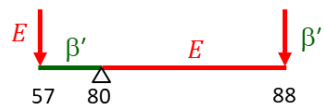
$$T_{57\%B} = \frac{88 - 80}{88 - 57} \cdot 100\%$$

$$T_{57\%B} = 25,81\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_e^{II} i $x_2 = 80\%B$:

Kontrola: $\beta'_{88\%B} + E_{57\%B} = 100\%$

$$74,19 + 25,81 = 100\%$$



$$\beta'_{88\%B} = \frac{x_2 - x_T}{x_{\beta'} - x_T} \cdot 100\%$$

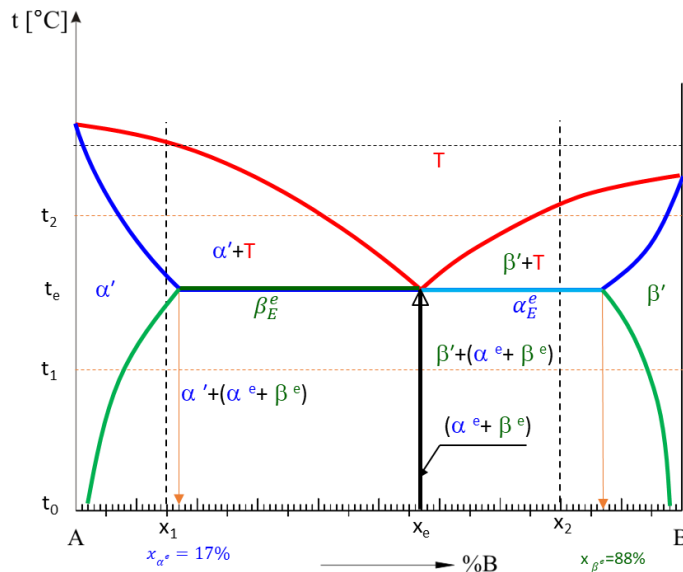
$$\beta'_{88\%B} = \frac{80 - 57}{88 - 57} \cdot 100\%$$

$$\beta'_{88\%B} = 74,19\%$$

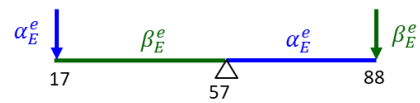
$$E_{57\%B} = \frac{x_{\beta'} - x_2}{x_{\beta'} - x_T} \cdot 100\%$$

$$E_{57\%B} = \frac{88 - 80}{88 - 57} \cdot 100\%$$

$$E_{57\%B} = 25,81\%$$

Određivanje količina eutektičkih faza - konstitucijska točka t_e^I i $x_e = 57\%B$:

$$\beta'_{88\%B} = 74,19\% \quad E_{57\%B} = 25,81\%$$



$$\alpha''_{E17\%B} = \frac{x_{\beta_e} - x_e}{x_{\beta_e} - x_{\alpha_e}} \cdot 100\%$$

$$\alpha''_{E17\%B} = \frac{88 - 57}{88 - 17} \cdot 100\%$$

$$\alpha''_{E17\%B} = 43,66\%$$

$$\beta''_{E88\%B} = \frac{x_e - x_{\alpha_e}}{x_{\beta_e} - x_{\alpha_e}} \cdot 100\%$$

$$\beta''_{E88\%B} = \frac{57 - 17}{88 - 17} \cdot 100\%$$

$$\beta''_{E88\%B} = 56,34\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

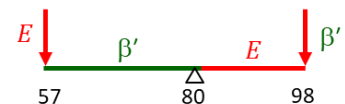
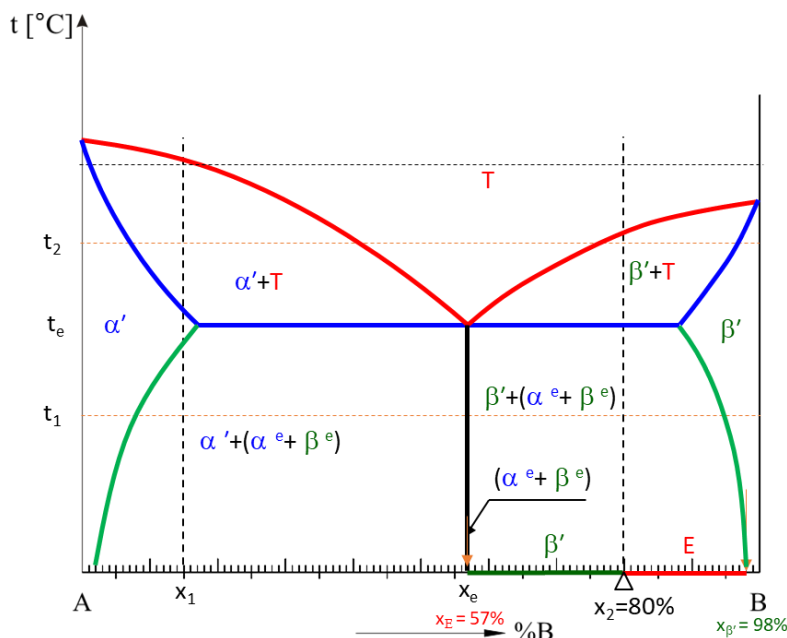
$$\alpha^e = \alpha''_{E17\%B} \cdot E \cdot 100\% = 0,4366 \cdot 0,2581 \cdot 100\% = 11,27\%$$

$$\beta^e = \beta''_{E88\%B} \cdot E \cdot 100\% = 0,5634 \cdot 0,2581 \cdot 100\% = 14,54\%$$

$$\text{Kontrola: } \beta' + (\alpha^e + \beta^e) = 100\%$$

$$74,19 + (11,27 + 14,54) = 100\%$$

$\alpha''_{E17\%B}, \beta''_{E88\%B}$ - relativni količinski udjeli (unutar eutektikuma)!

Proračun za konstitucijsku točku t_0 i $x_2 = 80\%B$:

$$\beta'_{98\%B} = \frac{x_2 - x_E}{x_{\beta'} - x_E} \cdot 100\%$$

$$\beta'_{98\%B} = \frac{80 - 57}{98 - 57} \cdot 100\%$$

$$\beta'_{98\%B} = 56,1\%$$

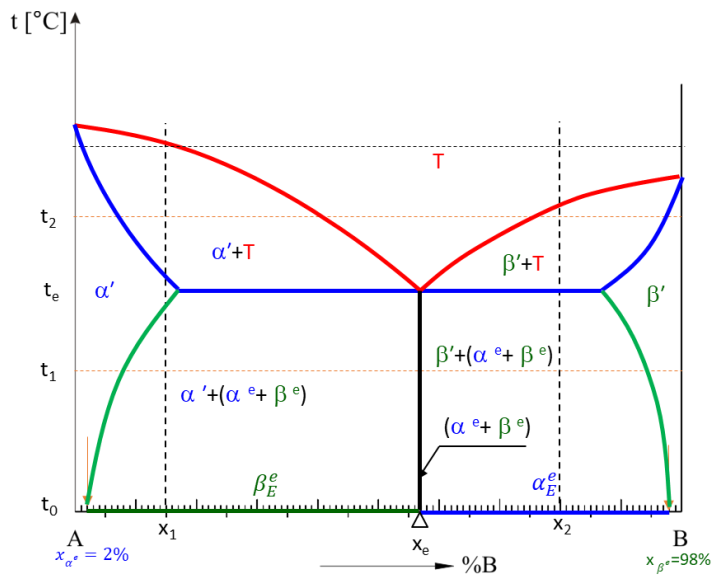
$$E_{57\%B} = \frac{x_{\beta'} - x_2}{x_{\beta'} - x_E} \cdot 100\%$$

$$E_{57\%B} = \frac{98 - 80}{98 - 57} \cdot 100\%$$

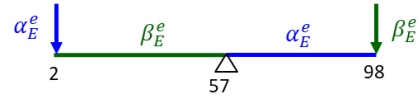
$$E_{57\%B} = 43,9\%$$

$$\text{Kontrola: } \beta'_{98\%B} + E_{57\%B} = 100\%$$

$$56,1 + 43,9 = 100\%$$

Određivanje količina eutektičkih faza - konstitucijska točka t_0 i $x_e = 57\%B$:

$$\beta'_{98\%B} = 56,1\% \quad E_{57\%B} = 43,9\%$$



$$\alpha_{E_{2\%B}}^e = \frac{x_{\beta_e} - x_e}{x_{\beta_e} - x_{\alpha_e}} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{E_{2\%B}}^e = \frac{98 - 57}{98 - 2} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{E_{2\%B}}^e = 42,71\%$$

$$\beta_{E_{98\%B}}^e = \frac{x_e - x_{\alpha_e}}{x_{\beta_e} - x_{\alpha_e}} \cdot 100\%$$

$$\beta_{E_{98\%B}}^e = \frac{57 - 2}{98 - 2} \cdot 100\%$$

$$\beta_{E_{98\%B}}^e = 57,29\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$\alpha^e = \alpha_E^e \cdot E \cdot 100\% = 0,4271 \cdot 0,439 \cdot 100\% = 18,75\%$$

$$\beta^e = \beta_E^e \cdot E \cdot 100\% = 0,5729 \cdot 0,439 \cdot 100\% = 25,15\%$$

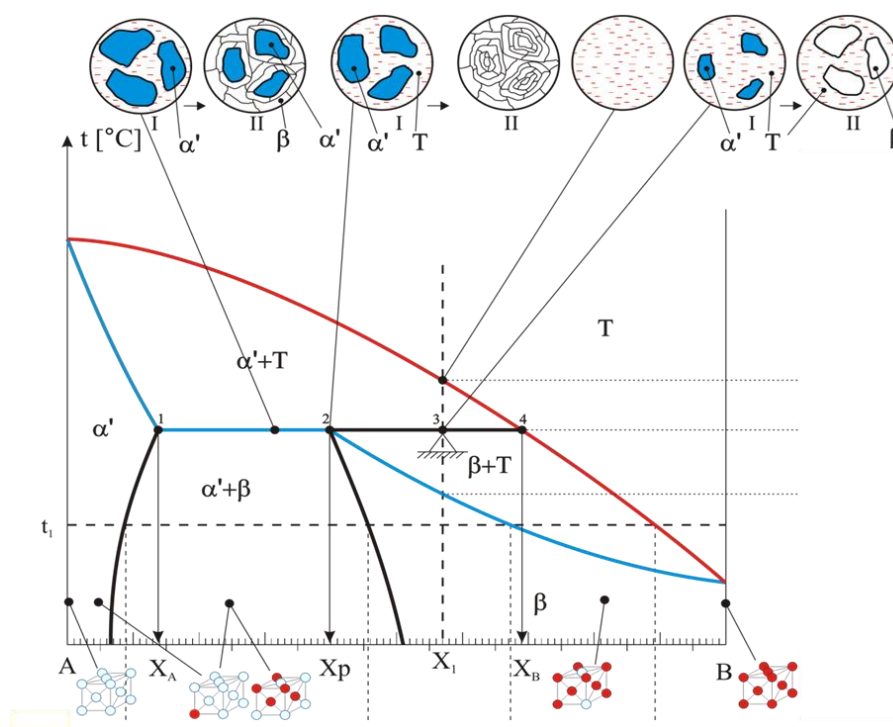
Kontrola: $\beta' + (\alpha^e + \beta^e) = 100\%$

$$56,1 + (18,75 + 25,15) = 100\%$$

$\alpha_{E_{17\%B}}^e, \beta_{E_{88\%B}}^e$ - relativni količinski udjeli (unutar eutektikuma)!

8 PERITEKTIČKI DIJAGRAM DJELOMIČNE RASTVORIVOSTI U KRUTINI I POTPUNE RASTVORIVOSTI U TALINI

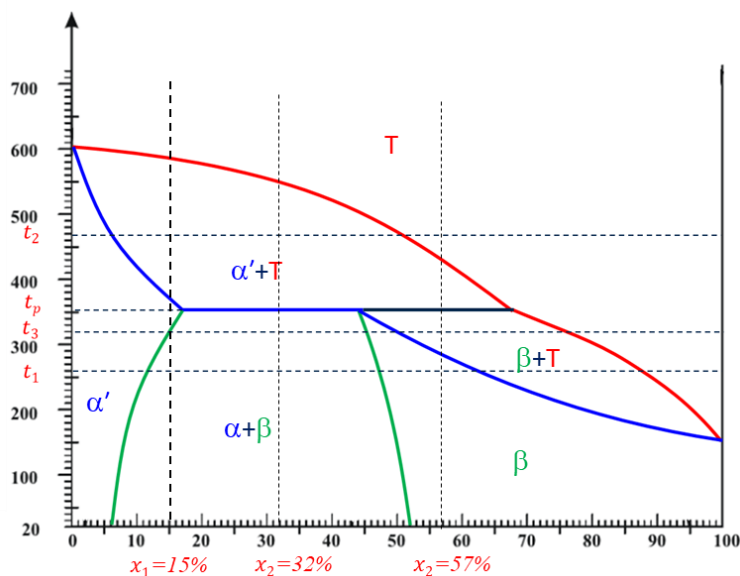
Ako su komponente bitno različite temperature tališta, onda obično nastaje peritektikum, s peritektičkom temperaturom oko sredine raspona temperatura taljenja komponenti (slika 8.1). U području niskih koncentracija jedne ili druge faze postoji područje potpune rastvorivosti, dok u području oko peritektičke koncentracije postoji dvofazno područje mješanaca obje komponente. U krutini također obično dolazi do promjena rastvorivosti mješanaca, pa su i granice rastvorivosti zakrivljene. Peritektička transformacija je karakteristična po tome što se talina i kruta faza (α' mješanci) jednog kemijskog sastava skrućuju/prekristaliziraju u fazu drugog kemijskog sastava (β mješanci).



Slika 8.1 Peritektički dijagram potpune rastvorivosti u talini i djelomične rastvorivosti u krutini

8.1 Primjer proračuna količinskih udjela faza eutektičke legure djelomične rastvorivosti u krutini

Za zadane koncentracije $x_1 = 15 \%B$, $x_2 = 32 \%B$ i $x_3 = 57 \%B$ i dijagram na slici 8.2 potrebno je odrediti vrste, masene količinske udjele i kemijske sastave (koncentracije) faza i to za temperaturu t_2 , peritektičku temperaturu u prvom trenutku t_p^I , peritektičku temperaturu u drugom trenutku t_p^{II} i sobnu temperaturu t_0 .

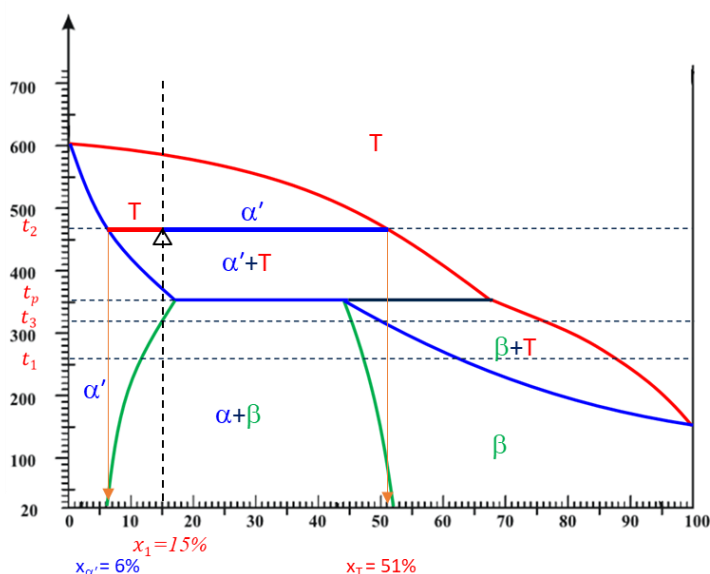


Slika 8.2 Eutektički dijagram djelomične rastvorivosti u krutini

RJEŠENJE:

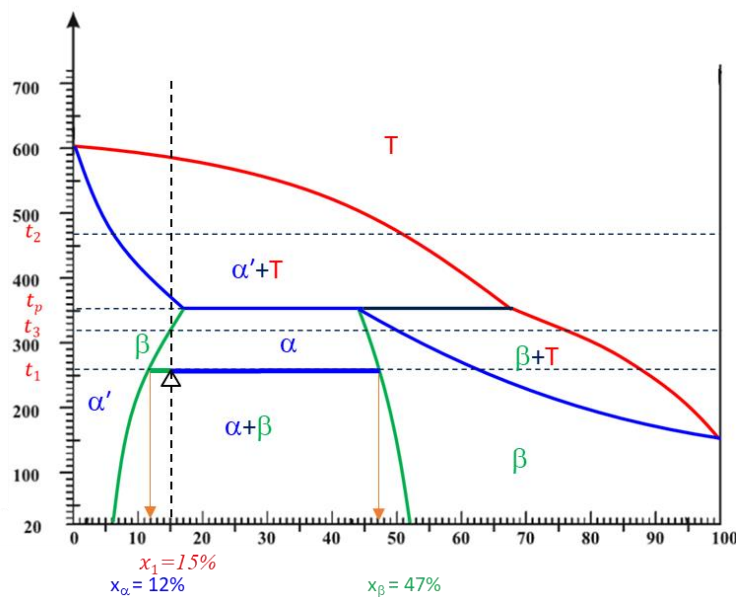
Proračun za koncentraciju $x_1 = 15 \% B$

Proračun za konstitucijsku točku t_2 i $x_1 = 15 \% B$:



Kontrola: $\alpha'_{6\%B} + T_{51\%B} = 100\%$
 $80 + 20 = 100\%$

$$\begin{aligned} \alpha'_{6\%B} &= \frac{x_T - x_1}{x_T - x_{\alpha'}} \cdot 100\% \\ \alpha'_{6\%B} &= \frac{51 - 15}{51 - 6} \cdot 100\% \\ \alpha'_{6\%B} &= 80\% \\ T_{51\%B} &= \frac{x_1 - x_{\alpha'}}{x_T - x_{\alpha'}} \cdot 100\% \\ T_{51\%B} &= \frac{15 - 6}{51 - 6} \cdot 100\% \\ T_{51\%B} &= 20\% \end{aligned}$$

Proračun za konstitucijsku točku t_1 i $x_1 = 15\%B$:

Kontrola: $\alpha_{12\%B} + \beta_{47\%B} = 100\%$

$$91,43 + 8,57 = 100\%$$

$$\alpha_{12\%B} = \frac{x_\beta - x_1}{x_\beta - x_\alpha} \cdot 100\%$$

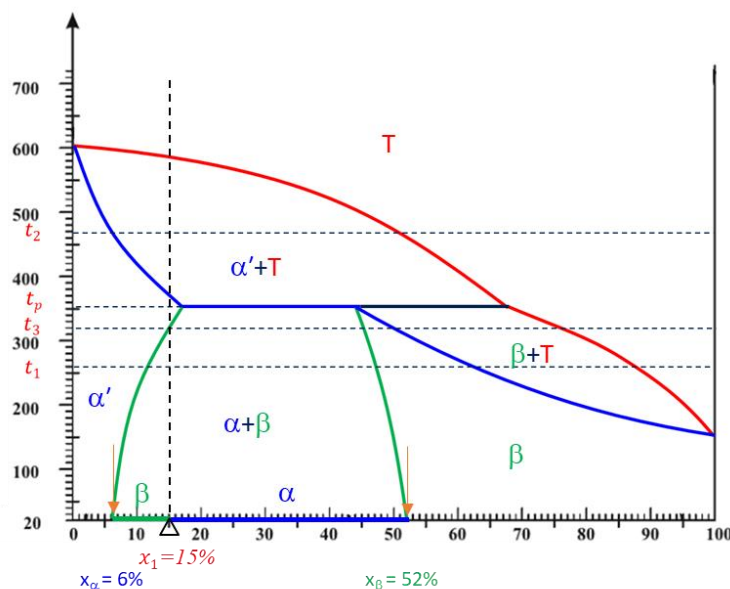
$$\alpha_{12\%B} = \frac{47 - 15}{47 - 12} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{12\%B} = 91,43\%$$

$$\beta_{47\%B} = \frac{x_1 - x_\alpha}{x_\beta - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\beta_{47\%B} = \frac{15 - 12}{47 - 12} \cdot 100\%$$

$$\beta_{47\%B} = 8,57\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_0 = 20^\circ\text{C}$ i $x_1 = 15\%B$:

Kontrola: $\alpha_{6\%B} + \beta_{52\%B} = 100\%$

$$80,43 + 19,57 = 100\%$$

$$\alpha_{6\%B} = \frac{x_\beta - x_1}{x_\beta - x_\alpha} \cdot 100\%$$

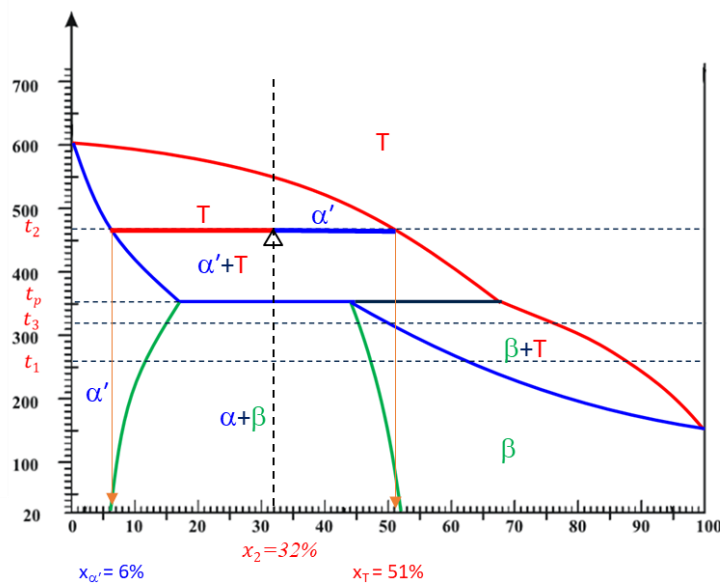
$$\alpha_{6\%B} = \frac{52 - 15}{52 - 6} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{6\%B} = 80,43\%$$

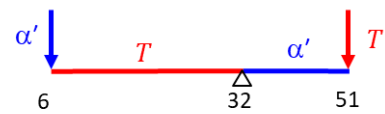
$$\beta_{52\%B} = \frac{x_1 - x_\alpha}{x_\beta - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\beta_{52\%B} = \frac{15 - 6}{52 - 6} \cdot 100\%$$

$$\beta_{52\%B} = 19,57\%$$

Proračun za koncentraciju $x_2 = 32\% B$ **Proračun za konstitucijsku točku t_2 i $x_2 = 32\% B$:****Kontrola:** $\alpha'_{6\%B} + T_{51\%B} = 100\%$

$$42,22 + 57,78 = 100\%$$



$$\alpha'_{6\%B} = \frac{x_T - x_2}{x_T - x_{\alpha'}} \cdot 100\%$$

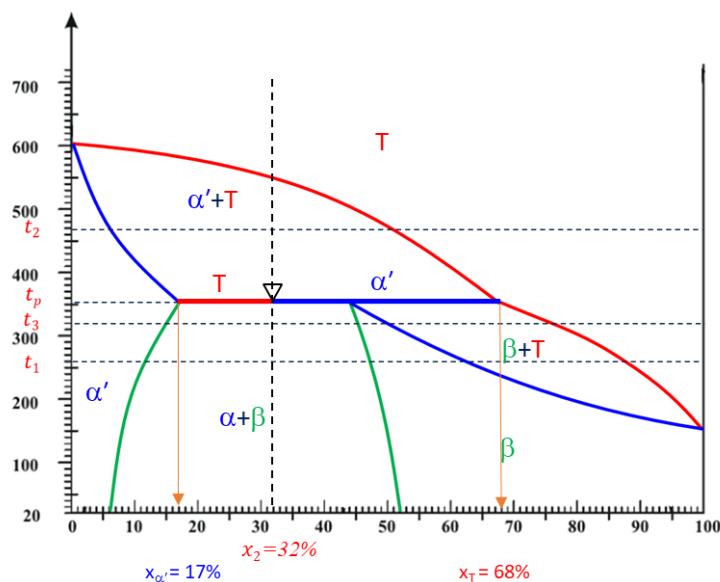
$$\alpha'_{6\%B} = \frac{51 - 32}{51 - 6} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{6\%B} = 42,22\%$$

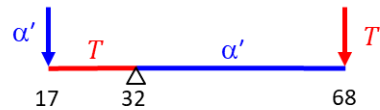
$$T_{51\%B} = \frac{x_2 - x_{\alpha'}}{x_T - x_{\alpha'}} \cdot 100\%$$

$$T_{51\%B} = \frac{32 - 6}{51 - 6} \cdot 100\%$$

$$T_{51\%B} = 57,78\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_p i $x_2 = 32\% B$:**Kontrola:** $\alpha'_{17\%B} + T_{68\%B} = 100\%$

$$70,59 + 29,41 = 100\%$$



$$\alpha'_{17\%B} = \frac{x_T - x_2}{x_T - x_{\alpha'}} \cdot 100\%$$

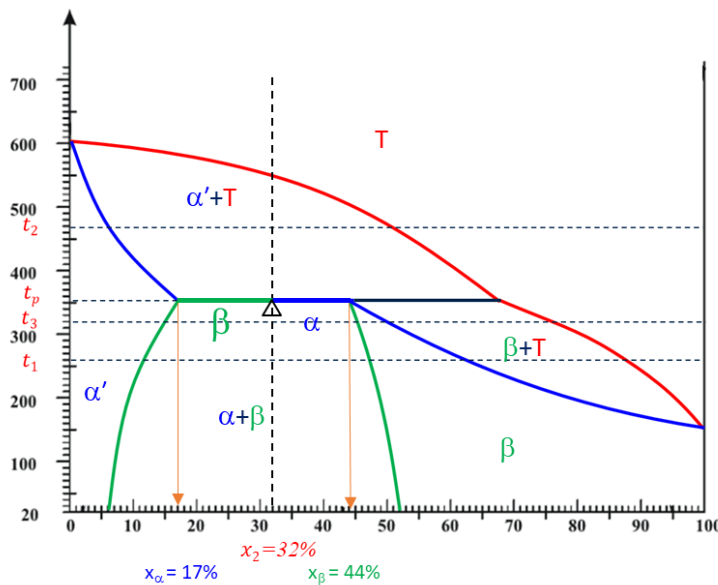
$$\alpha'_{17\%B} = \frac{68 - 32}{68 - 17} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{17\%B} = 70,59\%$$

$$T_{68\%B} = \frac{x_2 - x_{\alpha'}}{x_T - x_{\alpha'}} \cdot 100\%$$

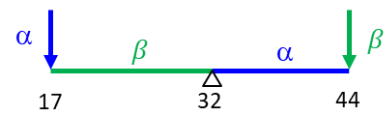
$$T_{68\%B} = \frac{32 - 17}{68 - 17} \cdot 100\%$$

$$T_{68\%B} = 29,41\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_p^II i $x_2 = 32\%B$:

Kontrola: $\alpha_{17\%B} + \beta_{44\%B} = 100\%$

$$44,44 + 55,56 = 100\%$$



$$\alpha_{17\%B} = \frac{x_\beta - x_2}{x_\beta - x_\alpha} \cdot 100\%$$

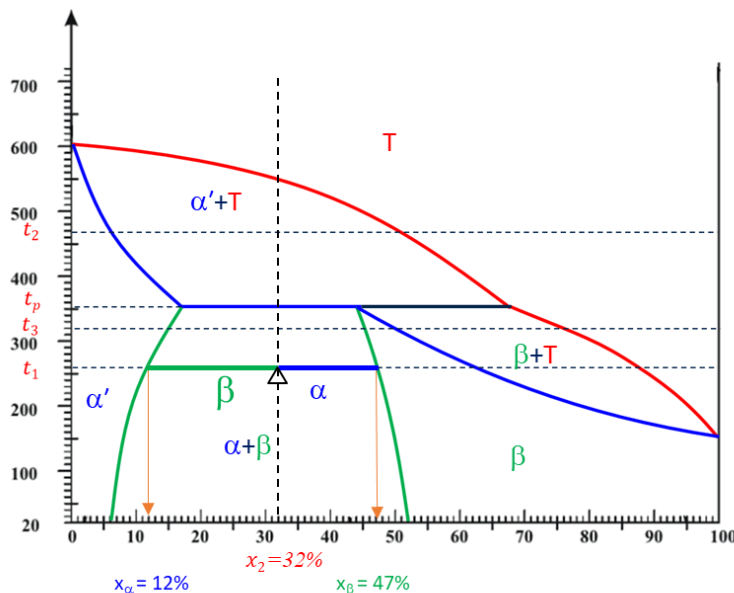
$$\alpha_{17\%B} = \frac{44 - 32}{44 - 17} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{17\%B} = 44,44\%$$

$$\beta_{44\%B} = \frac{x_2 - x_\alpha}{x_\beta - x_\alpha} \cdot 100\%$$

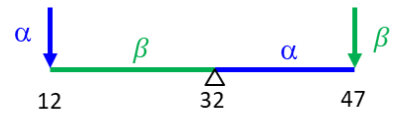
$$\beta_{44\%B} = \frac{32 - 17}{44 - 17} \cdot 100\%$$

$$\beta_{44\%B} = 55,56\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_1 i $x_2 = 32\%B$:

Kontrola: $\alpha_{12\%B} + \beta_{47\%B} = 100\%$

$$42,86 + 57,14 = 100\%$$



$$\alpha_{12\%B} = \frac{x_\beta - x_2}{x_\beta - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{12\%B} = \frac{47 - 32}{47 - 12} \cdot 100\%$$

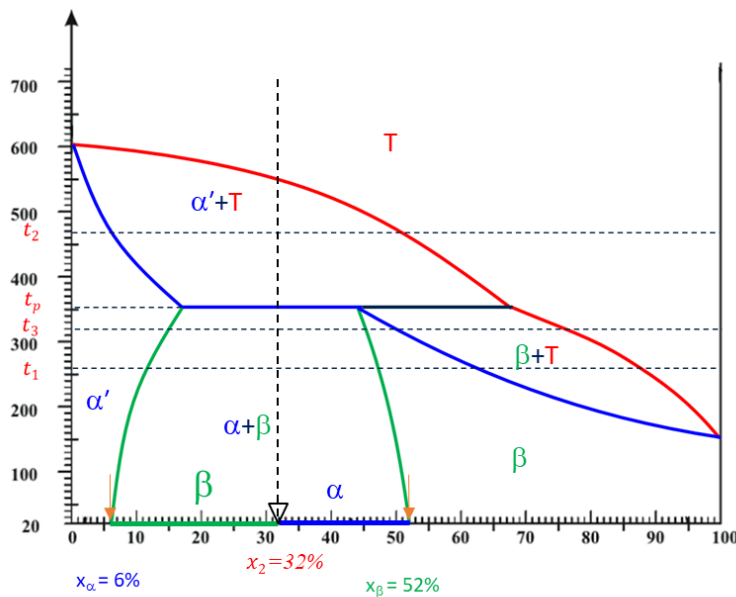
$$\alpha_{12\%B} = 42,86\%$$

$$\beta_{47\%B} = \frac{x_2 - x_\alpha}{x_\beta - x_\alpha} \cdot 100\%$$

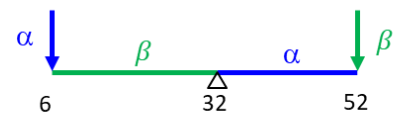
$$\beta_{47\%B} = \frac{32 - 12}{47 - 12} \cdot 100\%$$

$$\beta_{47\%B} = 57,14\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_0 = 20^\circ\text{C}$ i $x_2 = 32\%B$:



Kontrola: $\alpha_{6\%B} + \beta_{52\%B} = 100\%$
 $43,48 + 56,52 = 100\%$



$$\alpha_{6\%B} = \frac{x_\beta - x_2}{x_\beta - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{6\%B} = \frac{52 - 32}{52 - 6} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{6\%B} = 43,48\%$$

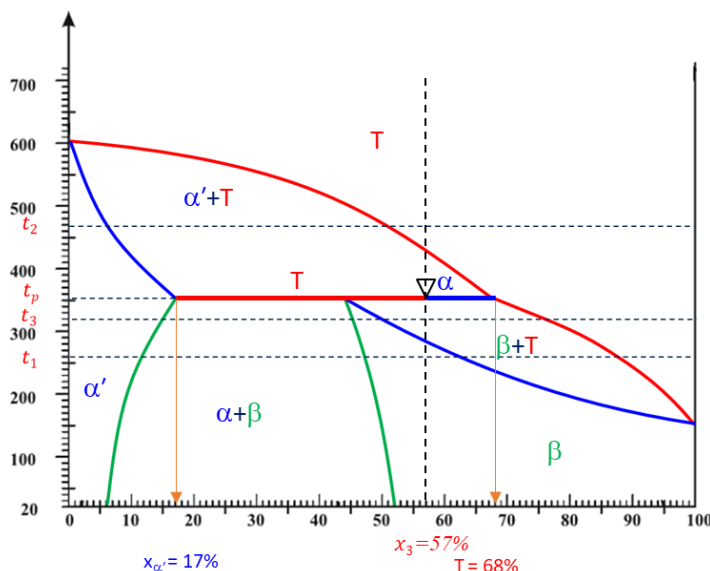
$$\beta_{52\%B} = \frac{x_2 - x_\alpha}{x_\beta - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\beta_{52\%B} = \frac{32 - 6}{52 - 6} \cdot 100\%$$

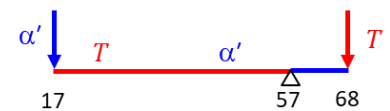
$$\beta_{52\%B} = 56,52\%$$

Proračun za koncentraciju $x_3 = 57\% B$

Proračun za konstitucijsku točku t_p^I i $x_3 = 57\% B$:



Kontrola: $\alpha'_{17\%B} + T_{68\%B} = 100\%$
 $21,57 + 78,43 = 100\%$



$$\alpha'_{17\%B} = \frac{x_T - x_3}{x_T - x_\alpha} \cdot 100\%$$

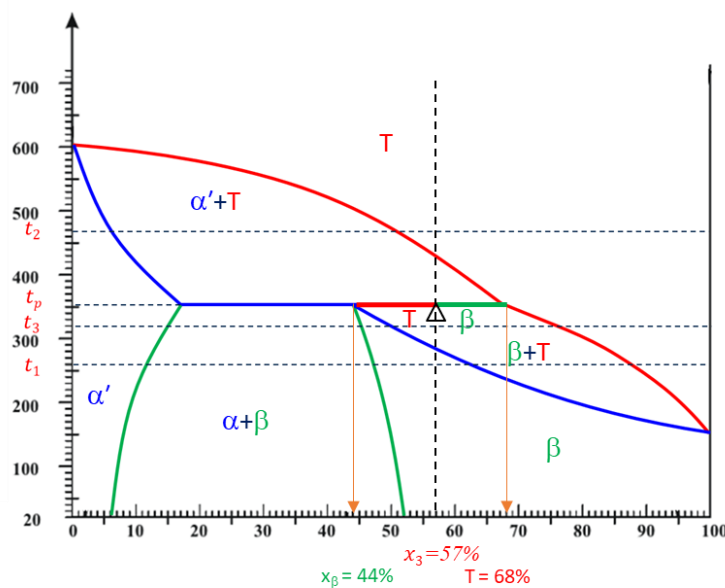
$$\alpha'_{17\%B} = \frac{68 - 57}{68 - 17} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{17\%B} = 21,57\%$$

$$T_{68\%B} = \frac{x_3 - x_\alpha}{x_T - x_\alpha} \cdot 100\%$$

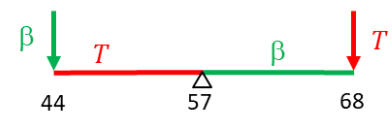
$$T_{68\%B} = \frac{57 - 17}{68 - 17} \cdot 100\%$$

$$T_{68\%B} = 78,43\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_p^H i $x_3 = 57\%B$:

Kontrola: $\beta_{44\%B} + T_{68\%B} = 100\%$

$$45,83 + 54,17 = 100\%$$



$$\beta_{44\%B} = \frac{x_T - x_3}{x_T - x_\beta} \cdot 100\%$$

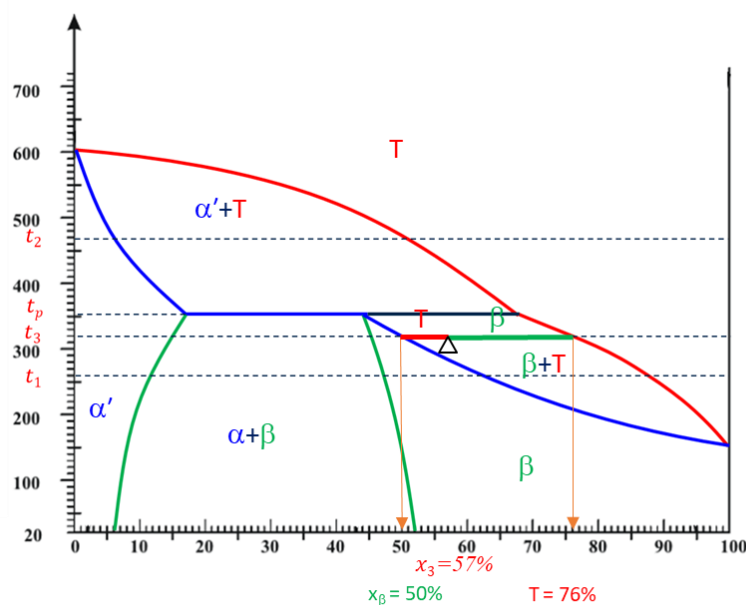
$$\beta_{44\%B} = \frac{68 - 57}{68 - 44} \cdot 100\%$$

$$\beta_{44\%B} = 45,83\%$$

$$T_{68\%B} = \frac{x_3 - x_\beta}{x_T - x_\beta} \cdot 100\%$$

$$T_{68\%B} = \frac{57 - 44}{68 - 44} \cdot 100\%$$

$$T_{68\%B} = 54,17\%$$

Proračun za konstitucijsku točku t_3 i $x_3 = 57\%B$:

Kontrola: $\beta_{50\%B} + T_{76\%B} = 100\%$

$$45,83 + 54,17 = 100\%$$



$$\beta_{50\%B} = \frac{x_T - x_3}{x_T - x_\beta} \cdot 100\%$$

$$\beta_{50\%B} = \frac{76 - 57}{76 - 50} \cdot 100\%$$

$$\beta_{50\%B} = 45,83\%$$

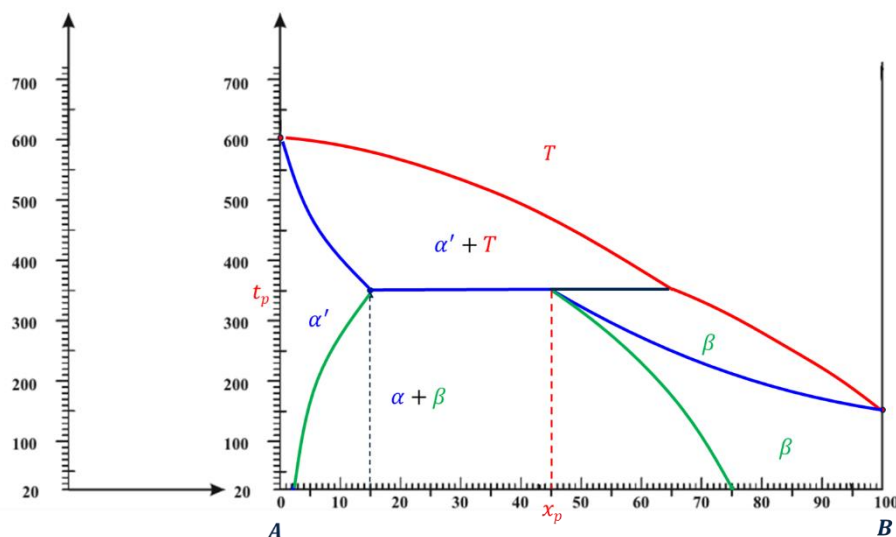
$$T_{76\%B} = \frac{x_3 - x_\beta}{x_T - x_\beta} \cdot 100\%$$

$$T_{76\%B} = \frac{57 - 50}{76 - 50} \cdot 100\%$$

$$T_{76\%B} = 54,17\%$$

8.2 Primjer crtanja krivulja hlađenja i metalografskih skica

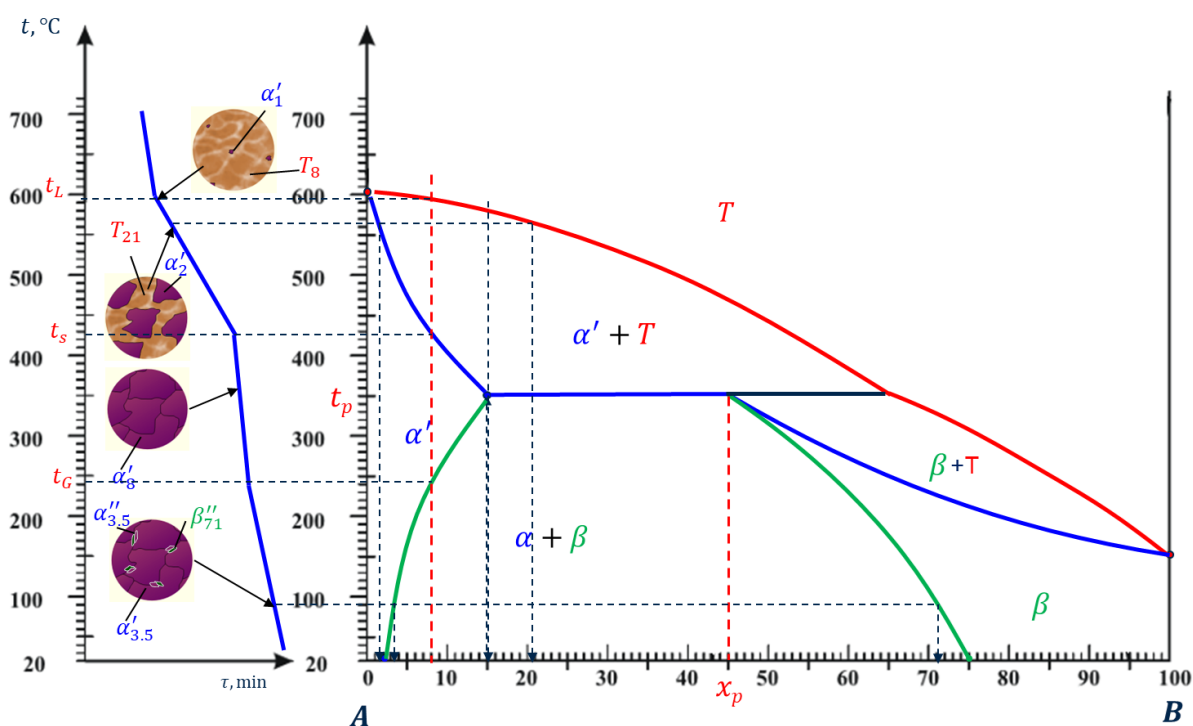
Za dijagram zadan prema slici 8.3 i koncentracije $x_1=8\%B$; $x_2=25\%B$, $x_3=x_p=45\%B$, $x_4=55\%B$, $x_5=70\%B$ i $x_6=90\%B$ treba nacrtati krivulje hlađenja i metalografske skice za karakteristične temperature. U metalografskim skicama označiti faze i kemijski sastav faza.



Slika 8.3 Zadani peritektički dijagram

Krivulja hlađenja i metalografske skice za $x_1 = 8\%B$:

U dijagramu hlađenja na slici 8.4 (lijevo) ucrtana je krivulja hlađenja te su za četiri karakteristične temperature ucrtane metalografske skice s označenim fazama i kemijskim sastavima faza (brojka u indeksu oznake faze označava maseni udio B komponente).

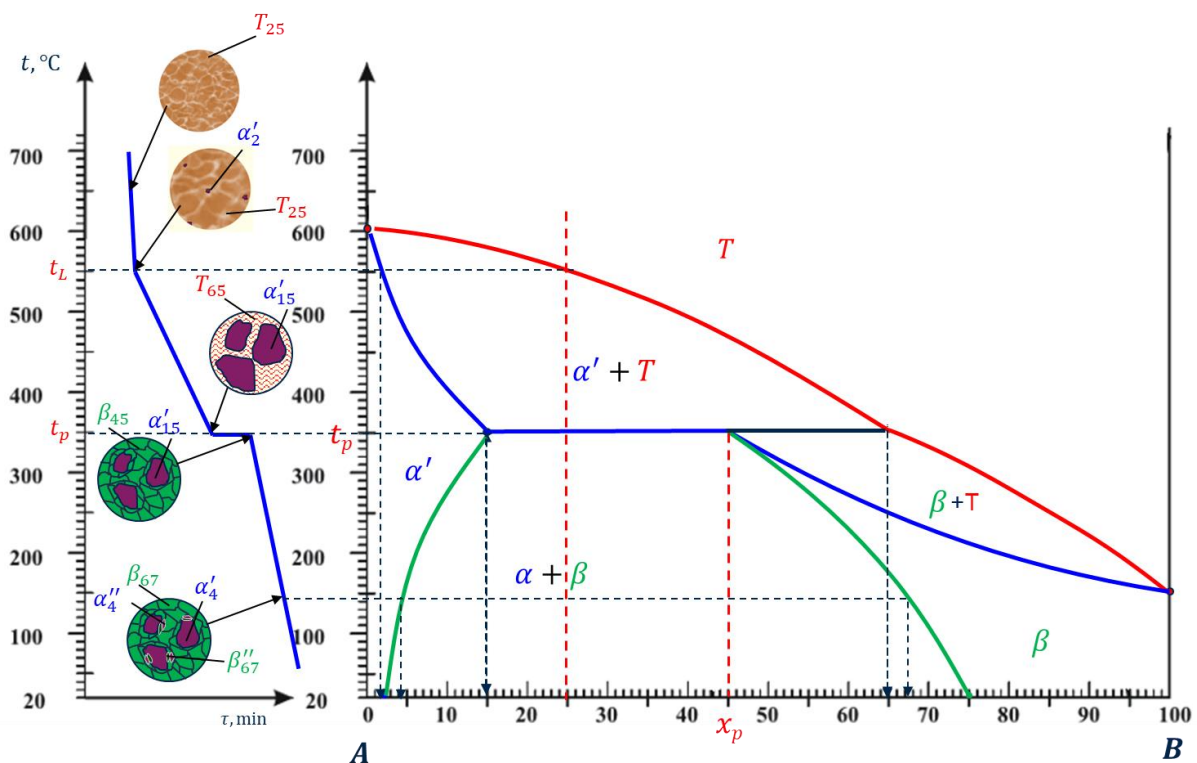


Slika 8.4 Krivulja hlađenja i metalografske skice za koncentraciju 8% B

Za uočiti je da ova legura završava skrućivanje nastankom isključivo primarne α faze. Na nižim temperaturama (ispod 245 °C prema slici) zbog dostizanja granične rastvorivosti u α mješancu dolazi do izlučivanja sekundarnih faza.

Krivulja hlađenja i metalografske skice za $x_2 = 25\% B$:

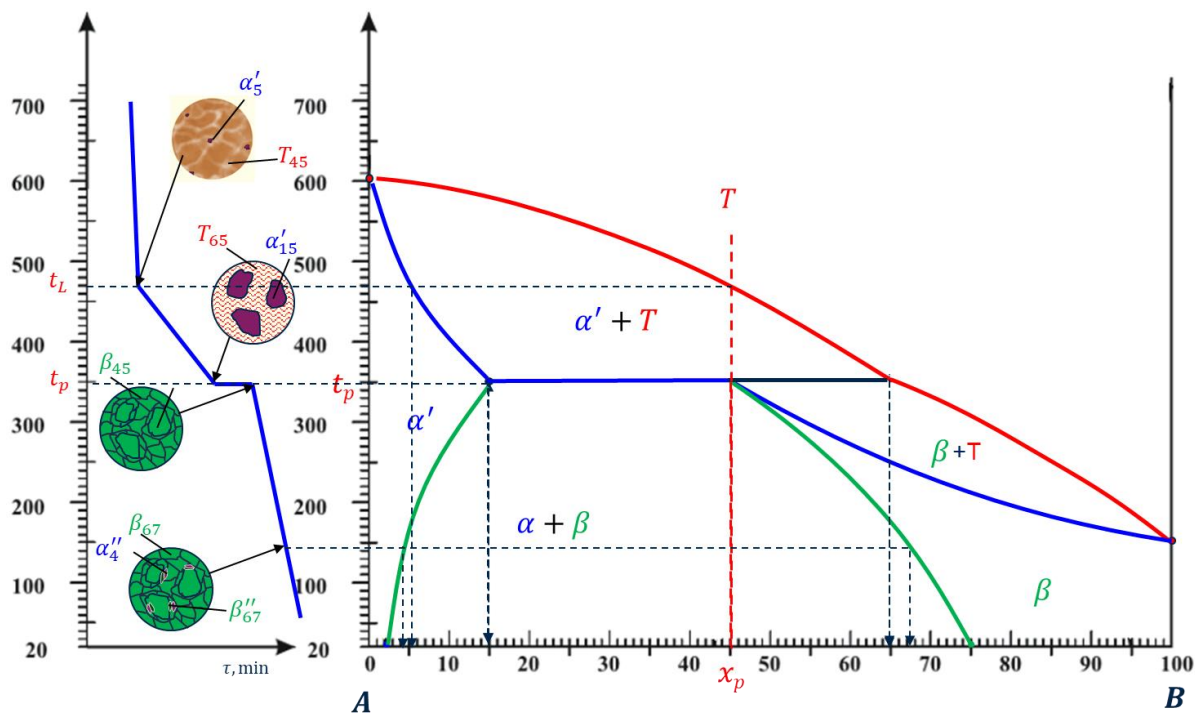
Na slici 8.5 prikazana je krivulja hlađenja s metalografskim skicama legure koncentracije 25% B. Kod ove legure na peritektičkoj temperaturi se javlja stojište na krivulji hlađenja koje ukazuje na peritektičku pretvorbu. U prvom trenutku na peritektičkoj temperaturi egzistira heterogena smjesa taline i primarnih α mješanaca. Peritektičkom transformacijom iz taline jako bogate atomima B komponente nastaju β mješanci siromašniji na atomima B komponente. Ovo je moguće jer jedan dio atoma B komponente iz taline difuzijom obogaćuje α mješance B atomima koji zbog toga djelomično prekristaliziraju u β mješance. Na kraju peritektičke pretvorbe smjesa se sastoji iz α i β mješanaca. Količina α faze je značajno manja nego u prvom trenutku (početak stojišta na krivulji hlađenja). Do sobne temperature nastaju sekundarne faze prekristalizacijom zbog kontinuiranog smanjenja rastvorivosti snižavanjem temperature u α i β mješancima.



Slika 8.5 Krivulja hlađenja i metalografske skice za koncentraciju 25% B

Krivulja hlađenja i metalografske skice za $x_3 = 45\%B$:

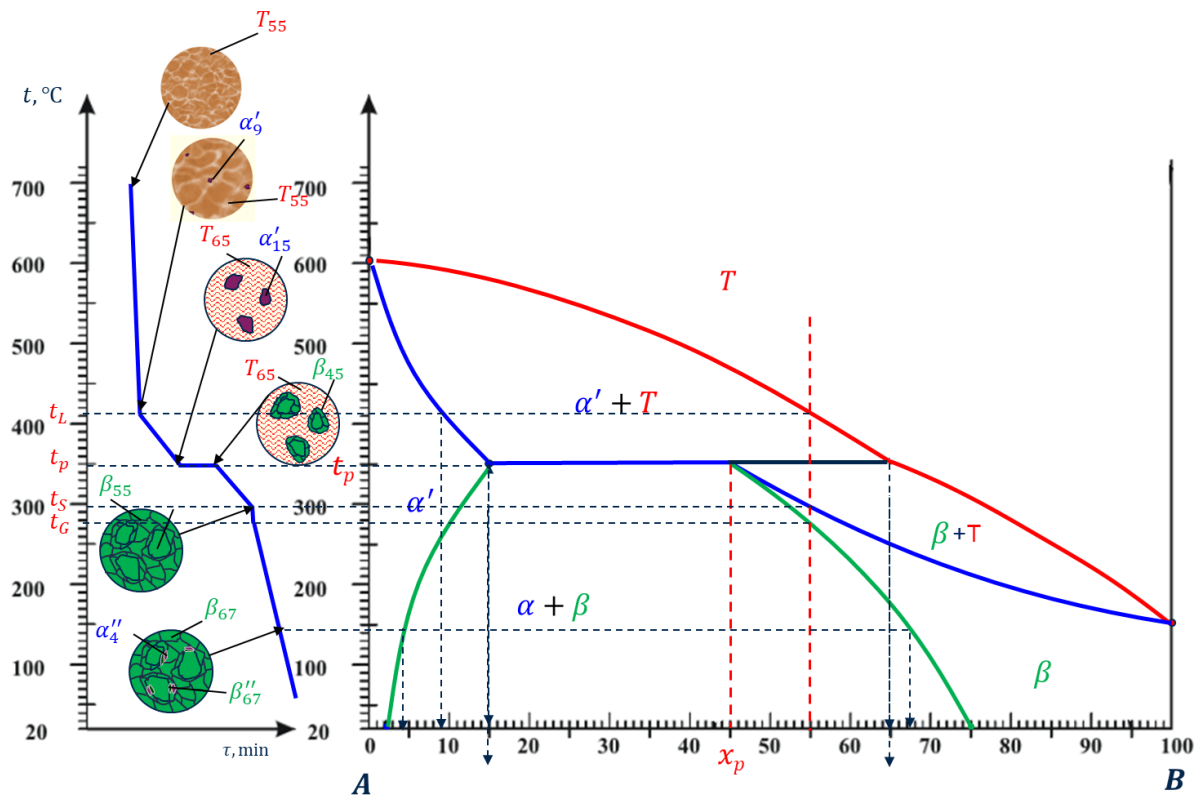
Koncentracija 45% B se naziva peritektička koncentracija i karakteristična je po tome što se čitava količina α faze peritektičkom pretvorbom transformira u β fazu. Pojava je prikazana metalografskim skicama (slika 8.6) za početak i završetak stojišta na krivulji hlađenja. Do sobne temperature nastaju sekundarne faze prekrizacijom zbog kontinuiranog smanjenja rastvorivosti snižavanjem temperature u α i β mješancima.



Slika 8.6 Krivulja hlađenja i metalografske skice za peritektičku koncentraciju 45% B

Krivulja hlađenja i metalografske skice za $x_4 = 55\%B$:

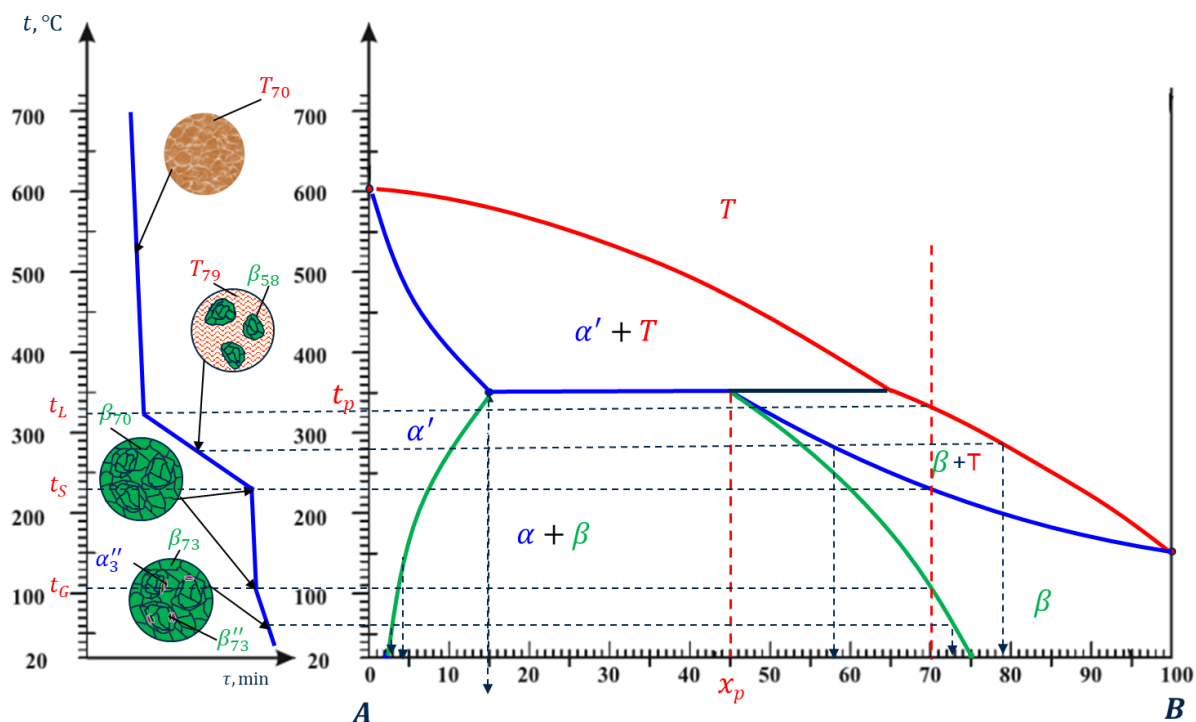
Za ovu koncentraciju je svojstveno na skrućivanje ne završava peritektičkom transformacijom. Peritektičkom pretvorbom dolazi do skrućivanja samo dijela taline, dok se čitava količina α faze peritektičkom pretvorbom transformira u β fazu. Ostatak taline se skrućuje na nižoj temperaturi dostizanjem solidus linije (plava linija na slici 8.7). Do sobne temperature nastaju sekundarne faze prekrizacijom zbog smanjenja rastvorivosti snižavanjem temperature u β fazi.



Slika 8.7 Krivulja hlađenja i metalografske skice za koncentraciju 55% B

Krivulja hlađenja i metalografske skice za $x_5 = 70\% B$:

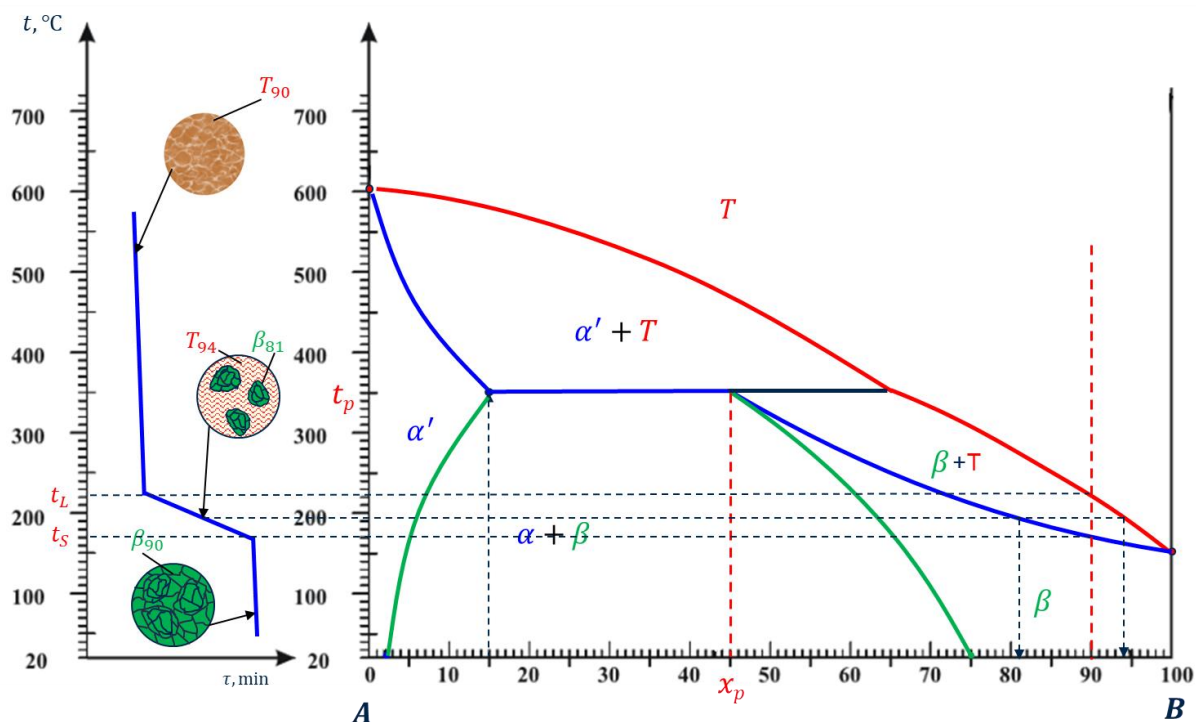
U slučaju ove legure nema peritektičke pretvorbe – nema stojišta na krivulji hlađenja (slika 8.8). Skrućivanje se odvija u temperaturnom intervalu kada iz homogene taline nastaje homogena β faza. Do sobne temperature (ispod 110°C) nastaju sekundarne faze prekrizacijom zbog smanjenja rastvorivosti snižavanjem temperature u β fazi.



Slika 8.8 Krivulja hlađenja i metalografske skice za koncentraciju 70% B

Krivulja hlađenja i metalografske skice za $x_B = 90\%$ B:

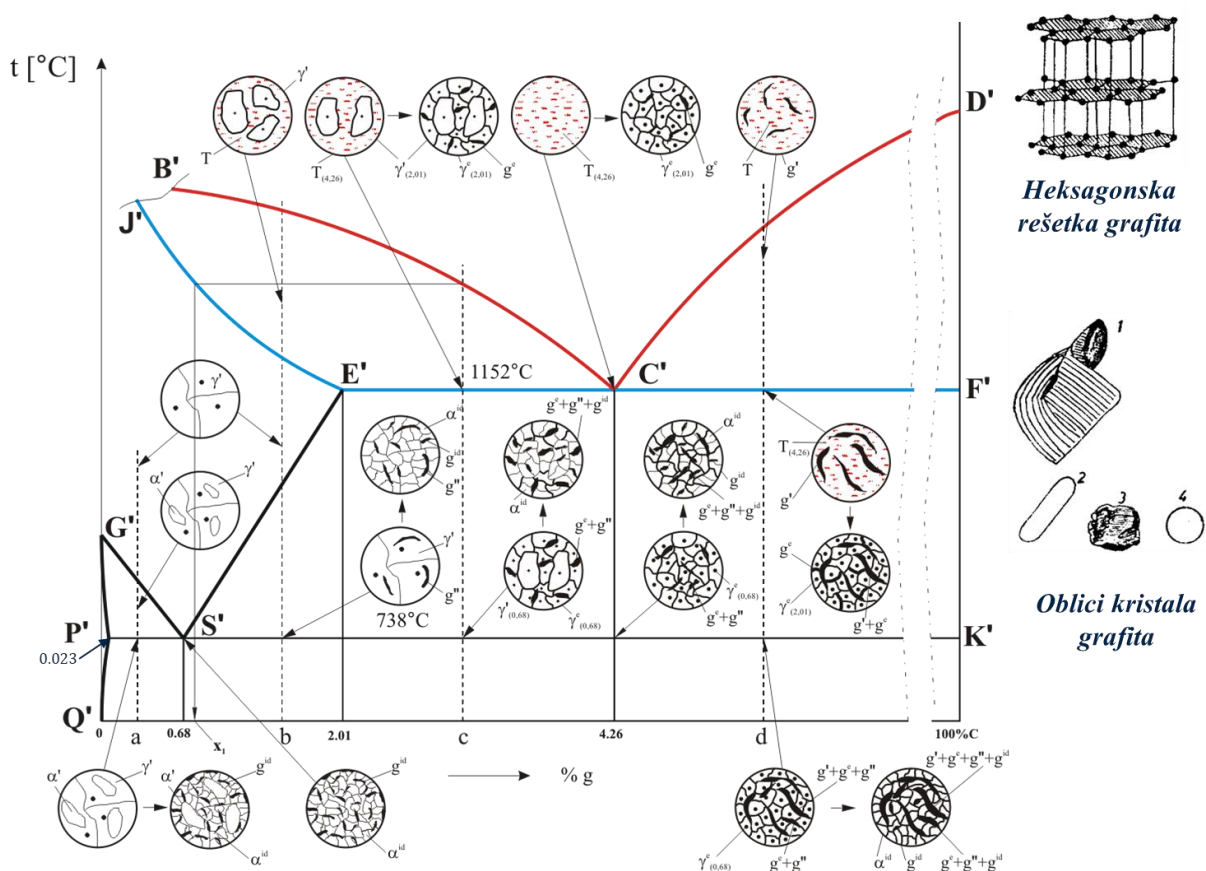
Legura s 90 %B komponente se skrućuje poput legura potpune rastvorivosti. Na krivulji hlađenja (slika 8.9) se uočavaju samo dva loma (početak i završetak skrućivanja) kada iz homogene taline nastaje homogena β faza. Do sobne temperature nema promjena jer se ne dostiže granična rastvorivost u β mješancu.



Slika 8.9 Krivulja hlađenja i metalografske skice za koncentraciju 90% B

9 STABILNI Fe-C DIJAGRAM SLIJEVANJA

Na slici 9.1 prikazan je stabilni Fe-C dijagram slijevanja s naznačenim karakterističnim temperaturama i koncentracijama. U dijagramu se ističu dvije temperature pri kojoj se javljaju stojišta na krivuljama hlađenja i to eutektička (1152 °C) i eutektoidna (738 °C). Također ovdje se ističu i eutektoidna (0,68 %C) i eutektička koncentracija (4,26 %C). U dijagramu je označena i koncentracija koje označava maksimalnu rastvorivost u γ mješancu – austenitu (2,01 %C) te koncentracija koje označava maksimalnu rastvorivost u α mješancu – feritu (0,023 %C)



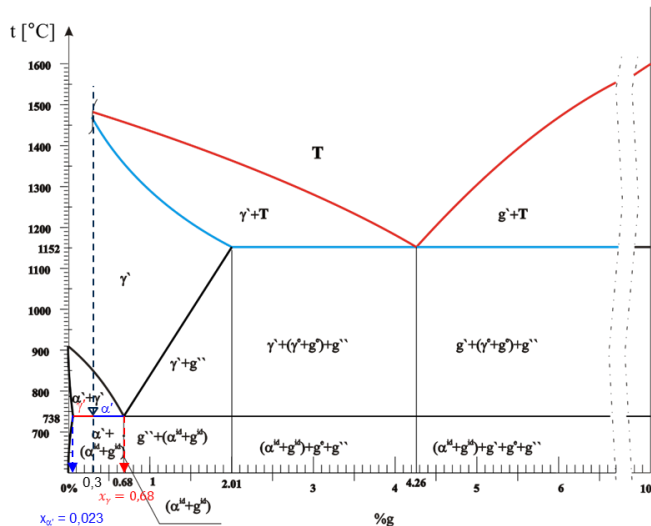
Slika 9.1 Stabilni Fe-C dijagram slijevanja

9.1 Proračun količinskih udjela faza

Za zadane koncentracije 0,3%C, 1,5%C, 3%C i 5,5%C stabilne legure Fe-C potrebno je odrediti vrste, masene količinske udjele i kemijske sastave (koncentracije) faza.

PRORAČUN ZA KONCENTRACIJU $x = 0,3\% \text{ C}$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^I = 738^\circ\text{C}$ i $x = 0,3\% \text{ C}$:



Kontrola:

$$\alpha'_{0,023\%C} + \gamma'_{0,68\%C} = 100\%$$

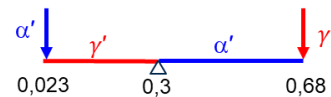
$$57,84 + 42,16 = 100\%$$

Za $t_{ID}^I = 738^\circ\text{C}$ i $x = 0,3\% \text{ C}$:

$$\alpha'_{0,023\%C} = 57,84\%$$

$$ID = \gamma'_{0,68\%C} = 42,16\%$$

Za $t_{ID}^I = 738^\circ\text{C}$ i $x = 0,3\% \text{ C}$:



$$\alpha'_{0,023\%C} = \frac{x_{\gamma} - x}{x_{\gamma} - x_{\alpha}} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{0,023\%C} = \frac{0,68 - 0,3}{0,68 - 0,023} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{0,023\%C} = 57,84\%$$

$$\gamma'_{0,68\%C} = \frac{x - x_{\alpha}}{x_{\gamma} - x_{\alpha}} \cdot 100\%$$

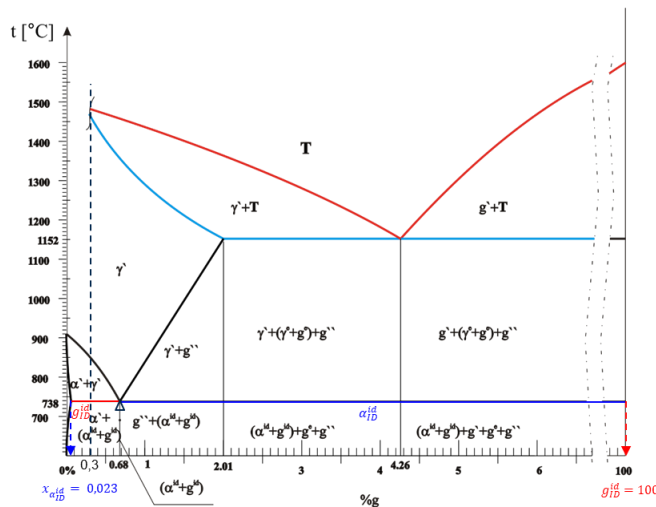
$$\gamma'_{0,68\%C} = \frac{0,3 - 0,023}{0,68 - 0,023} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{0,68\%C} = 42,16\%$$

ID

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^H = 738^\circ\text{C}$ i $x_{id} = 0,68\% \text{ C}$:

Ranije utvrđeno: $ID = 42,16\%$



Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$\alpha_{0,023\%C}^{id} = \alpha_{ID}^{id} \cdot ID \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0,023\%C}^{id} = 0,9934 \cdot 0,4216 \cdot 100\% = 41,88\%$$

$$g_{100\%C}^{id} = g_{ID}^{id} \cdot ID \cdot 100\%$$

$$g_{100\%C}^{id} = 0,0066 \cdot 0,4216 \cdot 100\% = 0,28\%$$

Za $t_{ID}^H = 738^\circ\text{C}$ i $x = 0,68\% \text{ C}$:

$$\alpha_{ID,0,023\%C}^{id} = \frac{x_g - x}{x_g - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{ID,0,023\%C}^{id} = \frac{100 - 0,68}{100 - 0,023} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{ID,0,023\%C}^{id} = 99,34\%$$

$$g_{ID,100\%C}^{id} = \frac{x - x_\alpha}{x_g - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$g_{ID,100\%C}^{id} = \frac{0,68 - 0,023}{100 - 0,023} \cdot 100\%$$

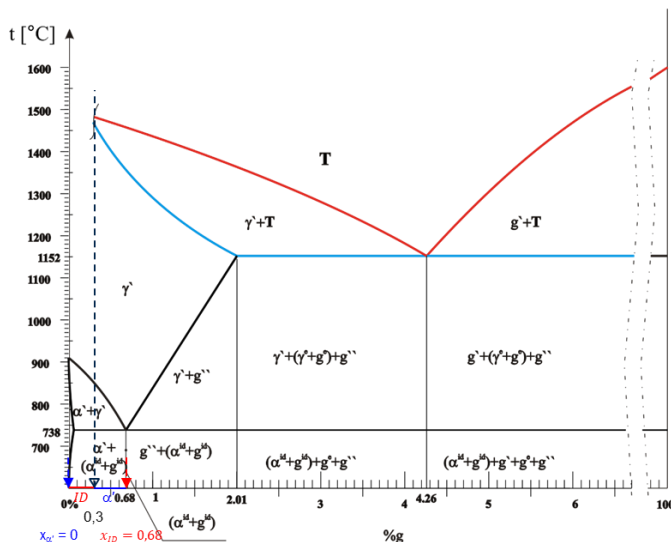
$$g_{ID,100\%C}^{id} = 0,66\%$$

Kontrola:

$$\alpha_{ID,0,025\%C}^{id} + g_{ID,100\%C}^{id} = 100\%$$

$$99,34 + 0,66 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ok} = 20^\circ\text{C}$ i $x_{id} = 0,68\% \text{ C}$:



Za $t_{ok} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 0,3\% \text{ C}$:

$$\alpha'_{0\%C} = \frac{x_{ID} - x}{x_{ID} - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{0\%C} = \frac{0,68 - 0,3}{0,68 - 0} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{0\%C} = 55,88\%$$

$$ID_{0,68\%C} = \frac{x - x_\alpha}{x_{ID} - x_\alpha} \cdot 100\%$$

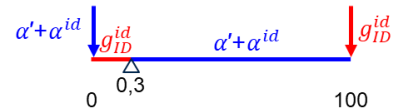
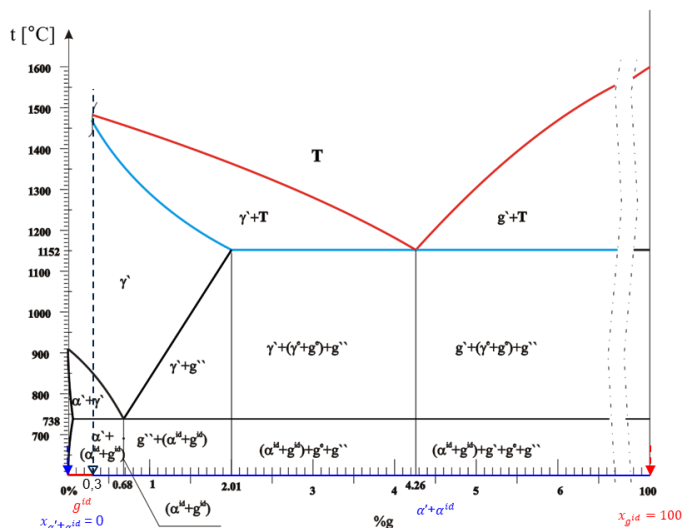
$$ID_{0,68\%C} = \frac{0,3 - 0}{0,68 - 0} \cdot 100\%$$

$$ID_{0,68\%C} = 44,12\%$$

Kontrola:

$$\alpha'_{0\%C} + ID_{0,68\%C} = 100\%$$

$$55,88 + 44,12 = 100\%$$

Ranije utvrđeno: $\alpha'_{0\%C} = 55,88\%$ $ID_{0,68\%C} = 44,12\%$ **Za $t_{ok} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 0,3\%C$:**

$$g_{100\%C}^{id} = \frac{x_{ID} - x}{x_{ID} - x_{\alpha}} \cdot 100\%$$

$$g_{100\%C}^{id} = \frac{0,3 - 0}{100 - 0} \cdot 100\%$$

$$g_{100\%C}^{id} = 0,3\%$$

$$\alpha_{0\%C}^{id} = ID_{0,68\%C} - g_{100\%C}^{id}$$

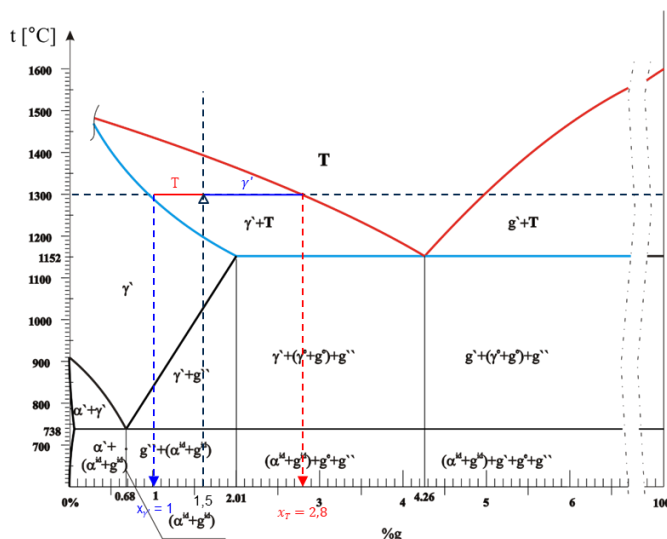
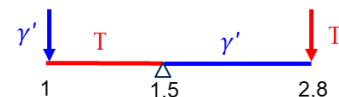
$$\alpha_{0\%C}^{id} = 44,12 - 0,3$$

$$\alpha_{0\%C}^{id} = 43,82\%$$

Kontrola:

$$\alpha'_{0\%C} + \alpha_{0\%C}^{id} + g_{100\%C}^{id} = 100\%$$

$$55,88 + 43,82 + 0,3 = 100\%$$

PRORAČUN ZA KONCENTRACIJU i $x = 1,5\%C$ Proračun za konstitucijsku točku $t = 1300^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\%C$:**Za $t = 1300^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\%C$:**

$$\gamma'_{1\%C} = \frac{x_T - x}{x_T - x_{\gamma}} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{1\%C} = \frac{2,8 - 1,5}{2,8 - 1} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{1\%C} = 72,22\%$$

$$T_{2,8\%C} = \frac{x - x_{\alpha}}{x_{\gamma} - x_{\alpha}} \cdot 100\%$$

$$T_{2,8\%C} = \frac{1,5 - 1}{2,8 - 1} \cdot 100\%$$

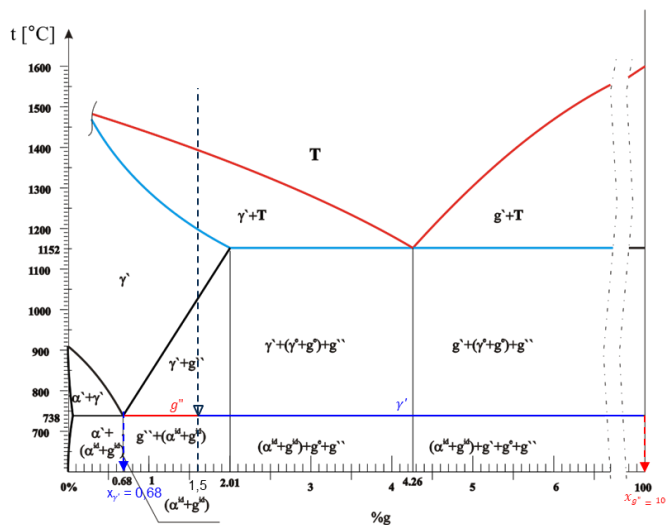
$$T_{2,8\%C} = 27,78\%$$

Kontrola:

$$\gamma'_{1\%C} + T_{2,8\%C} = 100\%$$

$$72,22 + 27,78 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^I = 738^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\% \text{ C}$:



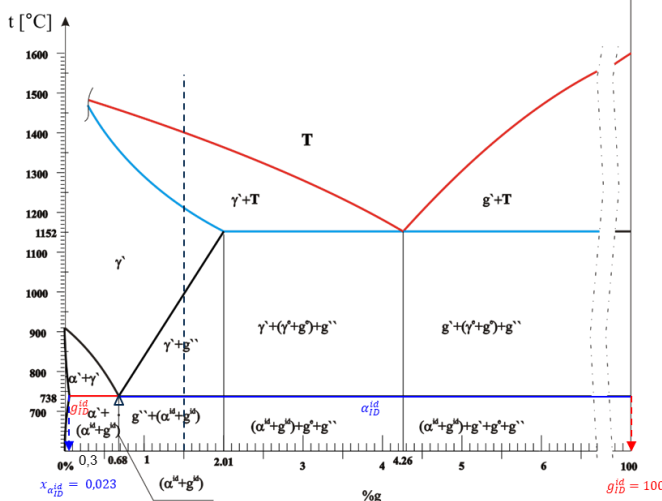
Kontrola:

$$\gamma'_{0,68\%C} + g''_{100\%C} = 100\%$$

$$99,17 + 0,83 = 100\%$$

Količina austenita iz 1. trenutka $\gamma'_{0,68\%C} = 99,17\%$ odgovara količini eutektoida ID u 2. trenutku na eutektoidnoj temperaturi tj. $ID_{0,68\%C} = 99,17\%$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^{II} = 738^\circ\text{C}$ i $x_{id} = 0,68\% \text{ C}$:



Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$\alpha^{id} = \alpha_{ID}^{id} \cdot ID \cdot 100\%$$

$$\alpha^{id} = 0,9934 \cdot 0,9917 \cdot 100\% = 98,52\%$$

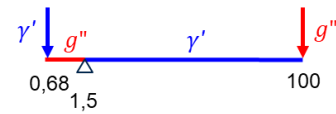
$$g^{id} = g_{ID}^{id} \cdot ID \cdot 100\%$$

$$g^{id} = 0,0066 \cdot 0,9917 \cdot 100\% = 0,65\%$$

Kontrola:

$$\alpha^{id} + g^{id} + g'' = 98,52 + 0,65 + 0,83 = 100\%$$

Za $t_{ID}^I = 738^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\% \text{ C}$:



$$\gamma'_{0,68\%C} = \frac{x_{g''} - x}{x_{g''} - x_{\gamma}} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{0,68\%C} = \frac{100 - 1,5}{100 - 0,68} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{0,68\%C} = 99,17\%$$

ID

$$g''_{100\%C} = \frac{x - x_{\gamma}}{x_{g''} - x_{\gamma}} \cdot 100\%$$

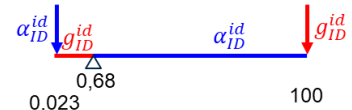
$$g''_{100\%C} = \frac{1,5 - 0,68}{100 - 0,68} \cdot 100\%$$

$$g''_{100\%C} = 0,83\%$$

Ranije utvrđeno: $ID_{0,68\%C} = 99,17\%$

$$g''_{100\%C} = 0,83\%$$

Za $t_{ID}^{II} = 738^\circ\text{C}$ i $x = 0,68\% \text{ C}$:



$$\alpha_{ID,0,023\%C}^{id} = \frac{g_{ID}^{id} - x}{g_{ID}^{id} - \alpha_{ID}^{id}} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{ID,0,023\%C}^{id} = \frac{100 - 0,68}{100 - 0,023} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{ID,0,023\%C}^{id} = 99,34\%$$

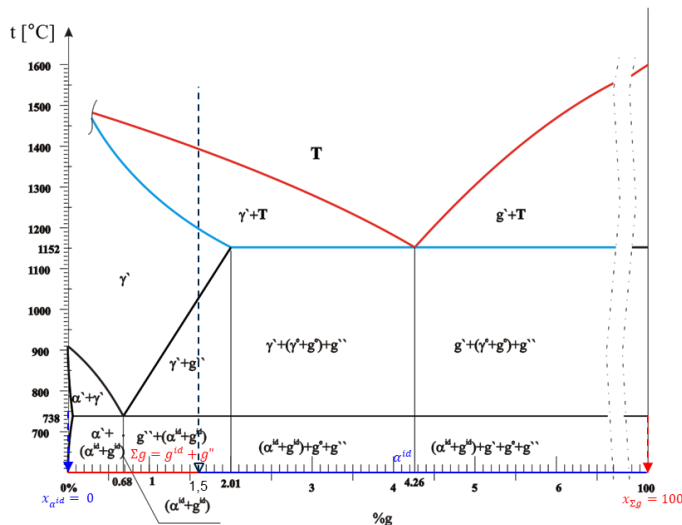
$$g_{ID,100\%C}^{id} = \frac{x - x_{\alpha'}}{x_{\gamma} - x_{\alpha}} \cdot 100\%$$

$$g_{ID,100\%C}^{id} = \frac{0,68 - 0,023}{100 - 0,023} \cdot 100\%$$

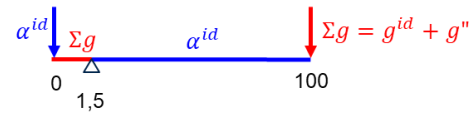
$$g_{ID,100\%C}^{id} = 0,66\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_0 = 20^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\%$ C:

Ranije utvrđeno: $g''_{100\%C} = 0,83\%$



Za $t_0 = 20^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\%$ C:



$$\alpha^{id}_{0\%C} = \frac{x_{\Sigma g} - x}{x_{\Sigma g} - x_{\alpha^{id}}} \cdot 100\%$$

$$\alpha^{id}_{0\%C} = \frac{100 - 1,5}{100 - 0} \cdot 100\%$$

$$\alpha^{id}_{0\%C} = 98,5\%$$

$$\Sigma g_{100\%C} = 100\% - \alpha^{id}_{0\%C}$$

$$\Sigma g_{100\%C} = 100 - 98,5 = 1,5\%$$

$$g^{id}_{100\%C} = \Sigma g_{100\%C} - g''_{100\%C}$$

$$g^{id}_{100\%C} = 1,5 - 0,83 = 0,67\%$$

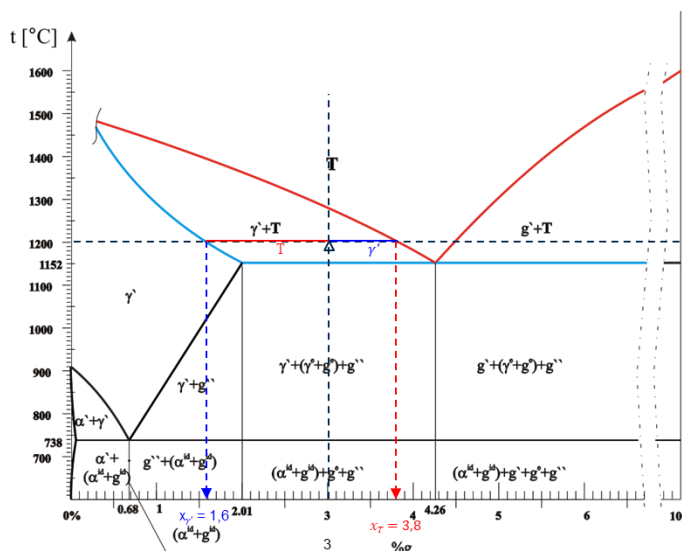
Kontrola:

$$\alpha^{id}_{0\%C} + g^{id}_{100\%C} + g''_{100\%C} = 100\%$$

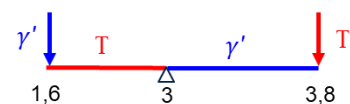
$$98,5 + 0,67 + 0,83 = 100\%$$

PRORAČUN ZA KONCENTRACIJU i $x = 3\%$ C

Proračun za konstitucijsku točku $t = 1200^\circ\text{C}$ i $x = 3\%$ C:



Za $t = 1200^\circ\text{C}$ i $x = 3\%$ C:



$$\gamma'_{1,6\%C} = \frac{x_T - x}{x_T - x_{\gamma}} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{1,6\%C} = \frac{3,8 - 3}{3,8 - 1,6} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{1,6\%C} = 36,36\%$$

$$T_{3,8\%C} = \frac{x - x_{\gamma}}{x_T - x_{\gamma}} \cdot 100\%$$

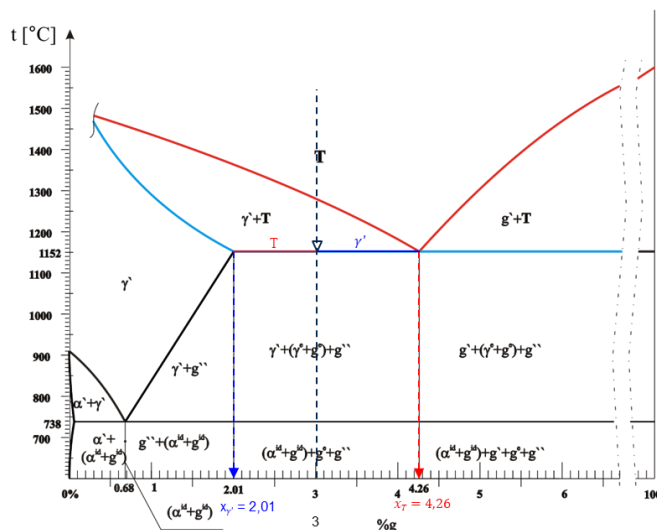
$$T_{3,8\%C} = \frac{3 - 1,6}{3,8 - 1,6} \cdot 100\%$$

$$T_{3,8\%C} = 63,64\%$$

Kontrola:

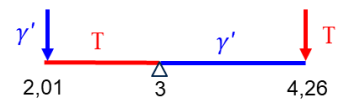
$$\gamma'_{1,6\%C} + T_{3,8\%C} = 100\%$$

$$36,36\% + 63,64\% = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_E^I = 1152^\circ\text{C}$ i $x = 3\%C$:**Kontrola:**

$$\gamma'_{2,01\%C} + T_{4,26\%C} = 100\%$$

$$56\% + 44\% = 100\%$$

Za $t_E^I = 1152^\circ\text{C}$ i $x = 3\%C$:

$$\gamma'_{2,01\%C} = \frac{x_T - x}{x_T - x_{\gamma}} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{2,01\%C} = \frac{4,26 - 3}{4,26 - 2,01} \cdot 100\%$$

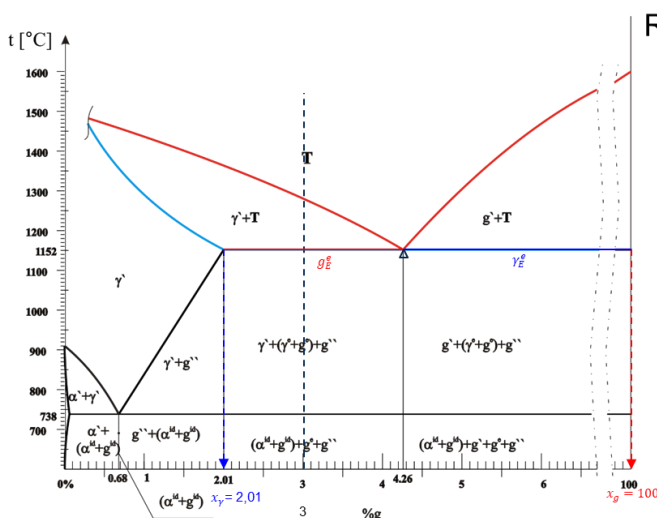
$$\gamma'_{2,01\%C} = 56\%$$

$$T_{4,26\%C} = \frac{x - x_{\gamma}}{x_T - x_{\gamma}} \cdot 100\%$$

$$T_{4,26\%C} = \frac{3 - 2,01}{4,26 - 2,01} \cdot 100\%$$

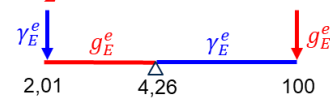
$$T_{4,26\%C} = 44\% \quad \leftarrow E$$

Količina taline iz 1. trenutka $T_{4,26\%C} = 44\%$ odgovara količini eutektikuma E u 2. trenutku na eutektičkoj temperaturi tj. $E_{4,26\%C} = 44\%$

Proračun za konstitucijsku točku $t_E^II = 1152^\circ\text{C}$ i $x_e = 4,26\%C$:

Ranije utvrđeno: $\gamma'_{2,01\%C} = 56\%$

$$E_{4,26\%C} = 44\%$$

Za $t_E^II = 1152^\circ\text{C}$ i $x = 4,26\%C$:

$$\gamma_{E,2,01\%C}^e = \frac{x_g - x}{x_g - x_{\gamma}} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{E,2,01\%C}^e = \frac{100 - 4,26}{100 - 2,01} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{E,2,01\%C}^e = 97,7\%$$

$$g_{E,100\%C}^e = \frac{x - x_{\gamma}}{x_g - x_{\gamma}} \cdot 100\%$$

$$g_{E,100\%C}^e = \frac{4,26 - 2,01}{100 - 2,01} \cdot 100\%$$

$$g_{E,100\%C}^e = 2,3\%$$

Ukupna količina austenita:

$$A_{1152} = \gamma' + \gamma^e = 56 + 42,99$$

$$A_{1152} = 98,99\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$\gamma_{2,01\%C}^e = \gamma_{E,2,01\%C}^e \cdot E \cdot 100\%$$

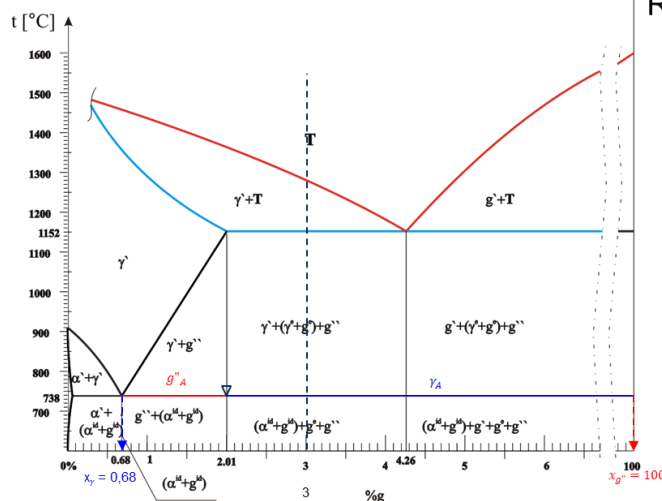
$$\gamma_{2,01\%C}^e = 0,977 \cdot 0,44 \cdot 100\% = 42,99\%$$

$$g_{100\%C}^e = g_{E,100\%C}^e \cdot E \cdot 100\%$$

$$g_{100\%C}^e = 0,023 \cdot 0,44 \cdot 100\% = 1,01\%$$

Kontrola:

$$\gamma'_{2,01\%C} + (\gamma^e + g^e) = 56 + (42,99 + 1,01) = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^I = 738^\circ\text{C}$ i $x = 2,01\% \text{C}$:Ranije utvrđeno: $A = A_{1152} = 98,99\%$

$$g^e = 1,01\%$$

Za $t_{ID}^I = 738^\circ\text{C}$ i $x = 2,01\% \text{C}$:

$$\gamma_{0,68\% \text{C}} = \frac{x_g - x}{x_g - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{0,68\% \text{C}} = \frac{100 - 2,01}{100 - 0,68} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{0,68\% \text{C}} = 98,66\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$\gamma = \gamma_A \cdot A \cdot 100\%$$

$$\gamma = 0,9866 \cdot 0,9899 \cdot 100\% = 97,66\%$$

$$g'' = g''_A \cdot A \cdot 100\%$$

$$g'' = 0,0134 \cdot 0,9899 \cdot 100\% = 1,33\%$$

 $ID = A_{738}$

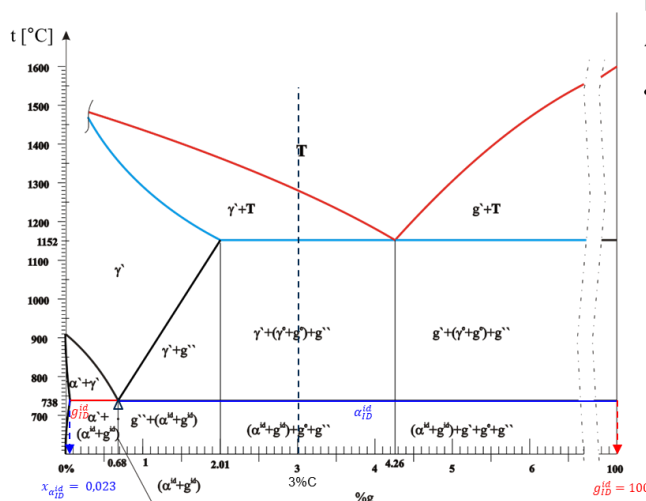
$$g''_{A_{100\% \text{C}}} = \frac{x - x_\gamma}{x_g - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$g''_{A_{100\% \text{C}}} = \frac{2,01 - 0,68}{100 - 0,68} \cdot 100\%$$

$$g''_{A_{100\% \text{C}}} = 1,34\%$$

Kontrola:

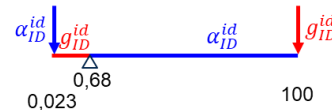
$$\gamma_{0,68\% \text{C}} + g''_{100\% \text{C}} + g^e_{100\% \text{C}} = 97,66 + 1,33 + 1,01 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^{II} = 738^\circ\text{C}$ i $x_{id} = 0,68\% \text{C}$:

Ranije utvrđeno:

$$ID_{0,68\% \text{C}} = A_{738} = 97,66\%$$

$$g^e = 1,01\% ; g'' = 1,33\%$$

Za $t_{ID}^{II} = 738^\circ\text{C}$ i $x = 0,68\% \text{C}$:**Relativni količinski udjeli faza:**

$$\alpha_{ID_{0,023\% \text{C}}}^{id} = \frac{g_{ID}^{id} - x}{g_{ID}^{id} - \alpha_{ID}^{id}} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{ID_{0,023\% \text{C}}}^{id} = \frac{100 - 0,68}{100 - 0,023} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{ID_{0,023\% \text{C}}}^{id} = 99,34\%$$

$$g_{ID_{100\% \text{C}}}^{id} = \frac{x - x_{\alpha'}}{x_\gamma - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$g_{ID_{100\% \text{C}}}^{id} = \frac{0,68 - 0,023}{100 - 0,023} \cdot 100\%$$

$$g_{ID_{100\% \text{C}}}^{id} = 0,66\%$$

Apsolutni količinski udjeli:

$$\alpha^{id} = \alpha_{ID}^{id} \cdot ID \cdot 100\%$$

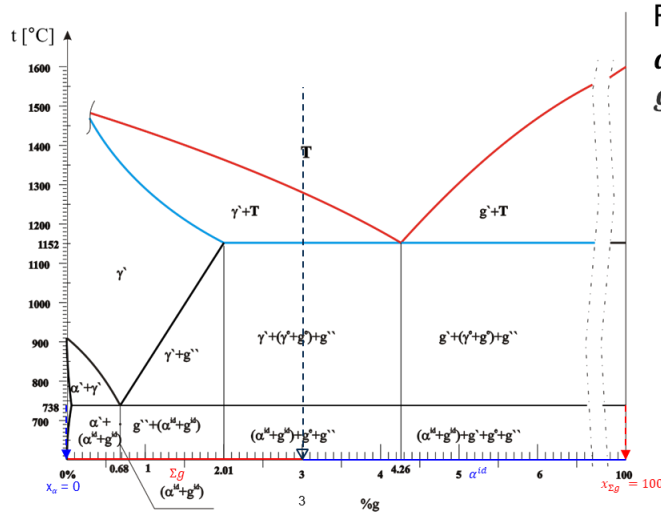
$$\alpha^{id} = 0,9934 \cdot 0,9766 \cdot 100\% = 97,02\%$$

$$g^{id} = g_{ID}^{id} \cdot ID \cdot 100\%$$

$$g^{id} = 0,0066 \cdot 0,9766 \cdot 100\% = 0,64\%$$

Kontrola:

$$\alpha^{id} + g^{id} + g'' + g^e = 97,02 + 0,64 + 1,33 + 1,01 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{OK} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 3\%C$:

Ranije utvrđeno:

$$\alpha^{id} = 97,02\% ; g^e = 1,01\% ; g'' = 1,33\%$$

Za $t_{OK} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 3\%C$:

$$\alpha_{0\%C}^{id} = \frac{x_g - x}{x_g - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0\%C}^{id} = \frac{100 - 3}{100 - 0} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0\%C}^{id} = 97\%$$

Kontrola:

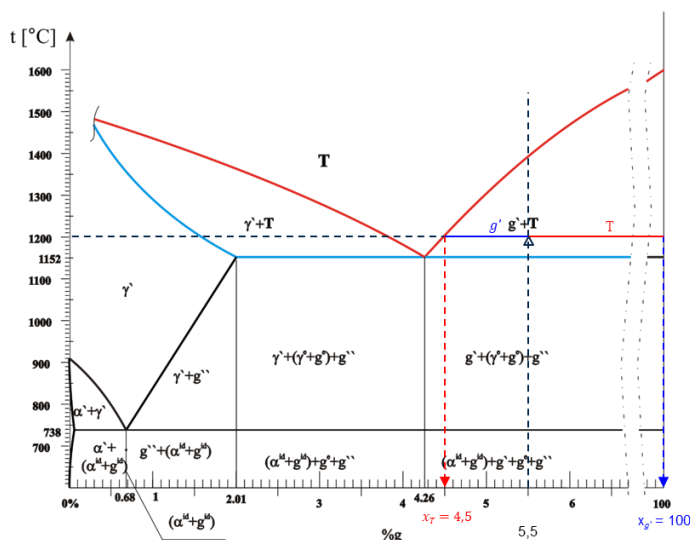
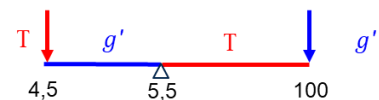
$$\alpha_{0\%C}^{id} + g_{100\%C}^{id} + g''_{100\%C} + g^e_{100\%C} = 100\%$$

$$97 + 0,66 + 1,33 + 1,01 = 100\%$$

$$g_{100\%C}^{id} = 100\% - \alpha^{id} - g'' - g^e$$

$$g_{100\%C}^{id} = 100 - 97 - 1,33 - 1,01$$

$$g_{100\%C}^{id} = 0,66\%$$

PRORAČUN ZA KONCENTRACIJU i $x = 5,5\%C$ **Proračun za konstitucijsku točku $t = 1200^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\%C$:****Za $t = 1200^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\%C$:**

$$g'_{100\%C} = \frac{x - x_T}{x_g - x_T} \cdot 100\%$$

$$g'_{100\%C} = \frac{5,5 - 4,5}{100 - 4,5} \cdot 100\%$$

$$g'_{100\%C} = 1,05\%$$

$$T_{4,5\%C} = \frac{x_g - x}{x_g - x_T} \cdot 100\%$$

$$T_{4,5\%C} = \frac{100 - 5,5}{100 - 4,5} \cdot 100\%$$

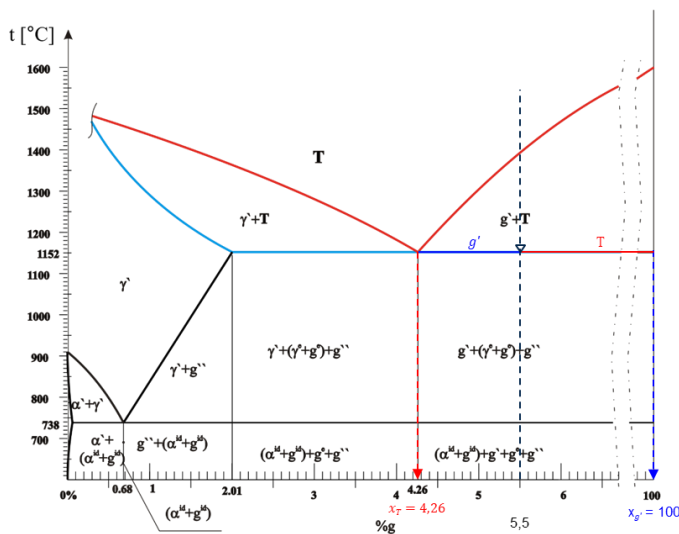
$$T_{4,5\%C} = 98,95\%$$

Kontrola:

$$g'_{100\%C} + T_{4,5\%C} = 100\%$$

$$1,05 + 98,95 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_E^I = 1152^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\%C$:

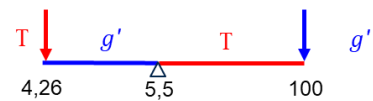


Kontrola:

$$g'_{100\%C} + T_{4,26\%C} = 100\%$$

$$1,3 + 98,7 = 100\%$$

Za $t_E^I = 1152^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\%C$:



$$g'_{100\%C} = \frac{x - x_T}{x_g - x_T} \cdot 100\%$$

$$g'_{100\%C} = \frac{5,5 - 4,26}{100 - 4,26} \cdot 100\%$$

$$g'_{100\%C} = 1,3\%$$

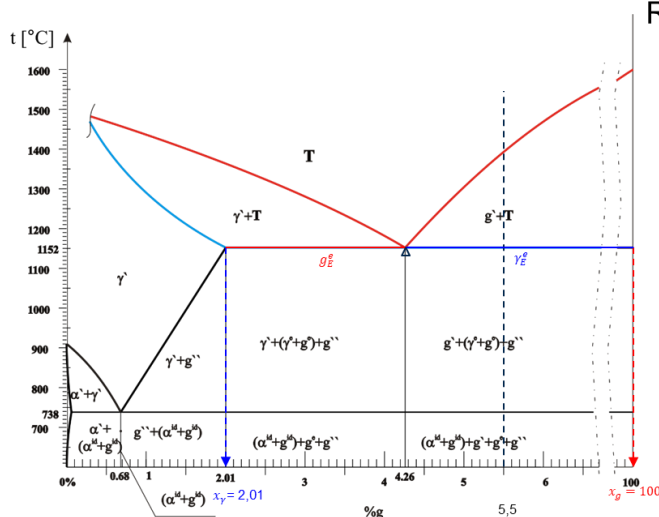
$$T_{4,26\%C} = \frac{x_g - x}{x_g - x_T} \cdot 100\%$$

$$T_{4,26\%C} = \frac{100 - 5,5}{100 - 4,26} \cdot 100\%$$

$$T_{4,26\%C} = 98,7\%$$

E

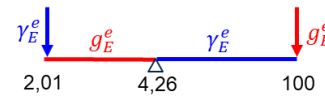
Proračun za konstitucijsku točku $t_E^II = 1152^\circ\text{C}$ i $x_e = 4,26\%C$:



Ranije utvrđeno: $g'_{100\%C} = 1,3\%$

$$E_{4,26\%C} = 98,7\%$$

Za $t_E^II = 1152^\circ\text{C}$ i $x = 4,26\%C$:



$$\gamma_{E,2,01\%C}^e = \frac{x_g - x}{x_g - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{E,2,01\%C}^e = \frac{100 - 4,26}{100 - 2,01} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{E,2,01\%C}^e = 97,7\%$$

$$g_{E,100\%C}^e = \frac{x - x_\gamma}{x_g - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$g_{E,100\%C}^e = \frac{4,26 - 2,01}{100 - 2,01} \cdot 100\%$$

$$g_{E,100\%C}^e = 2,3\%$$

Ukupna količina austenita:

$$A_{1152} = 96,44\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$\gamma_{E,2,01\%C}^e = \gamma_{E,2,01\%C}^e \cdot E \cdot 100\%$$

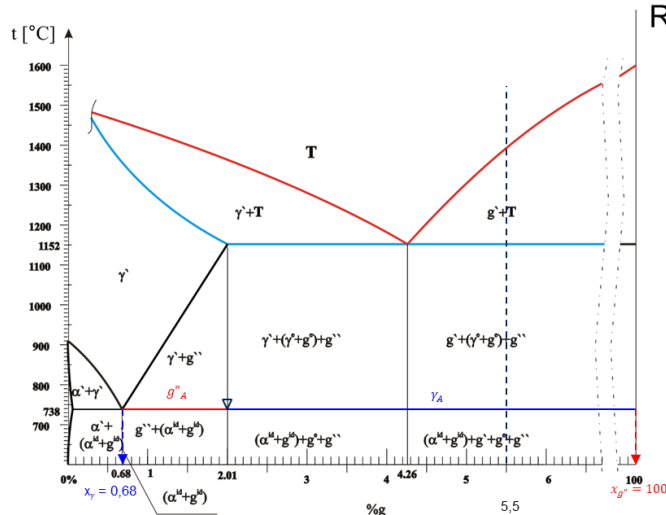
$$\gamma_{E,2,01\%C}^e = 0,977 \cdot 0,987 \cdot 100\% = 96,44\%$$

$$g_{E,100\%C}^e = g_{E,100\%C}^e \cdot E \cdot 100\%$$

$$g_{E,100\%C}^e = 0,023 \cdot 0,987 \cdot 100\% = 2,26\%$$

Kontrola:

$$g' + (\gamma^e + g^e) = 1,3 + (96,44 + 2,27) = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^I = 738^\circ\text{C}$ i $x = 2,01\% \text{C}$:Ranije utvrđeno: $A = A_{1152} = 96,44\%$ **Za $t_{ID}^I = 738^\circ\text{C}$ i $x = 2,01\% \text{C}$:**

$$\gamma_{A,0.68\%C} = \frac{x_g - x}{x_g - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{A,0.68\%C} = \frac{100 - 2,01}{100 - 0,68} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{A,0.68\%C} = 98,66\%$$

$$g''_{A,100\%C} = \frac{x - x_\gamma}{x_g - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$g''_{A,100\%C} = \frac{2,01 - 0,68}{100 - 0,68} \cdot 100\%$$

$$g''_{A,100\%C} = 1,34\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$\gamma_{0,68\%C} = \gamma_A \cdot A_{1152} \cdot 100\%$$

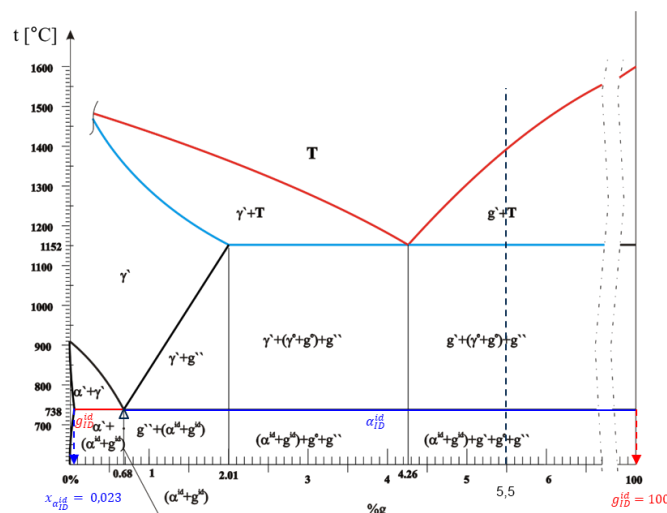
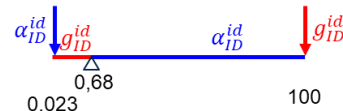
$$\gamma_{0,68\%C} = 0,9866 \cdot 0,9644 \cdot 100\% = 95,15\%$$

$$g''_{100\%C} = g''_A \cdot A_{1152} \cdot 100\% \quad \text{A}_{738} = ID$$

$$g''_{100\%C} = 0,0134 \cdot 0,9644 \cdot 100\% = 1,29\%$$

Kontrola:

$$\gamma_{0,68\%C} + g''_{100\%C} + g^e_{100\%C} + g^e_{100\%C} = 95,15 + 1,29 + 2,26 + 1,3 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^{II} = 738^\circ\text{C}$ i $x_{id} = 0,68\% \text{C}$:**Za $t_{ID}^{II} = 738^\circ\text{C}$ i $x = 0,68\% \text{C}$:****Relativni količinski udjeli faza:**

$$\alpha_{ID,0.023\%C}^{id} = \frac{g_{ID}^{id} - x}{g_{ID}^{id} - \alpha_{ID}^{id}} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{ID,0.023\%C}^{id} = \frac{100 - 0,68}{100 - 0,023} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{ID,0.023\%C}^{id} = 99,34\%$$

$$g_{ID,100\%C}^{id} = \frac{x - x_{\alpha'}}{x_\gamma - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$g_{ID,100\%C}^{id} = \frac{0,68 - 0,023}{100 - 0,023} \cdot 100\%$$

$$g_{ID,100\%C}^{id} = 0,66\%$$

Apsolutni količinski udjeli:

$$\alpha_{0,023\%C}^{id} = \alpha_{ID}^{id} \cdot ID \cdot 100\%$$

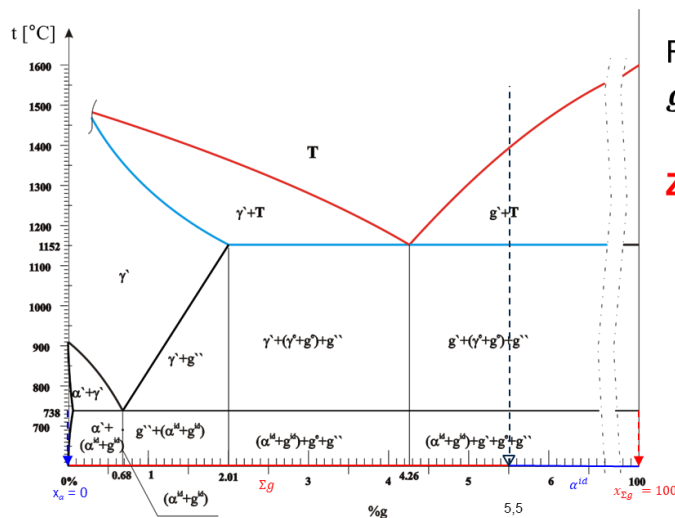
$$\alpha_{0,023\%C}^{id} = 0,9934 \cdot 0,9515 \cdot 100\% = 94,52\%$$

$$g_{100\%C}^{id} = g_{ID}^{id} \cdot ID \cdot 100\%$$

$$g_{100\%C}^{id} = 0,0066 \cdot 0,9515 \cdot 100\% = 0,63\%$$

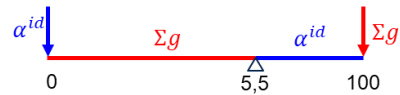
Kontrola:

$$\alpha^{id} + g^{id} + g'' + g^e + g' = 94,52 + 0,63 + 1,29 + 2,26 + 1,3 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{OK} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\% \text{C}$:

Ranije utvrđeno:

$$g^e = 2,26\% ; g'' = 1,29\% ; g' = 1,3\%$$

Za $t_{OK} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\% \text{C}$:

$$\alpha_{0\%C}^{id} = \frac{x_g - x}{x_g - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0\%C}^{id} = \frac{100 - 5,5}{100 - 0} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0\%C}^{id} = 94,5\%$$

Kontrola:

$$\alpha^{id} + g^{id} + g'' + g^e + g' = 94,5 + 0,65 + 1,29 + 2,26 + 1,3 = 100\%$$

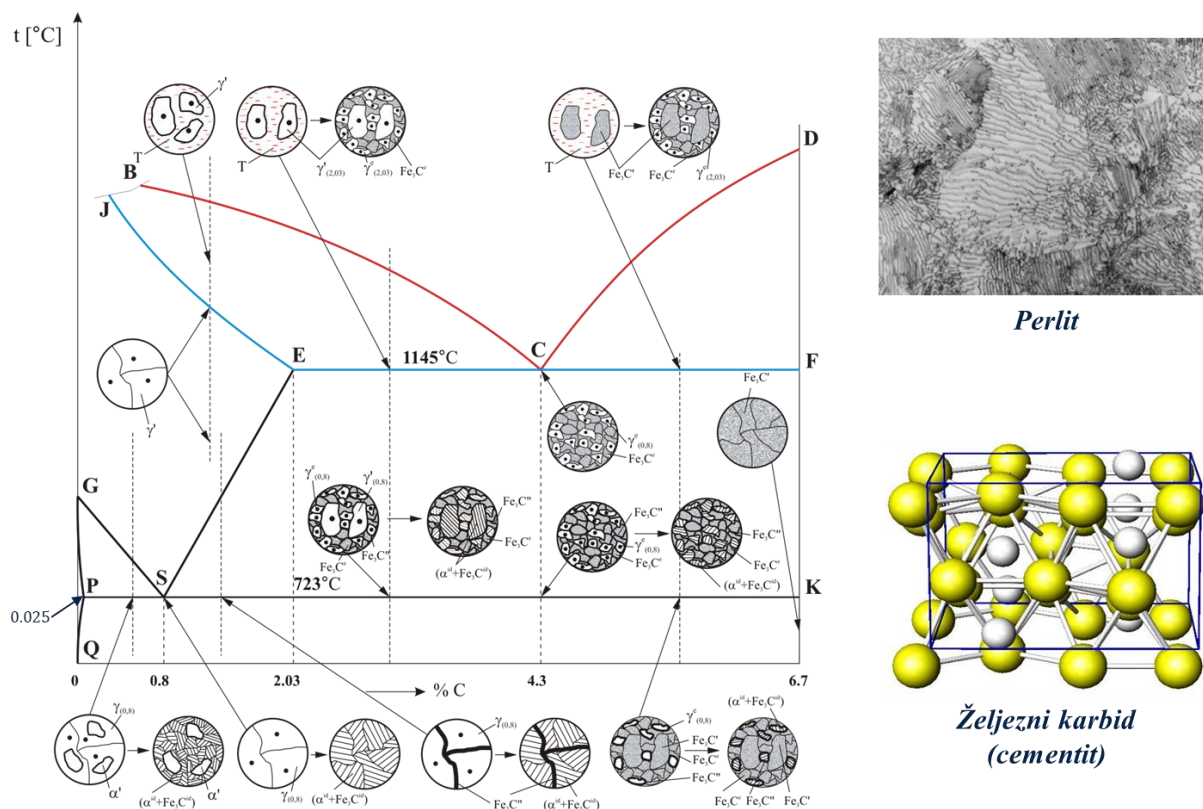
$$g_{100\%C}^{id} = 100\% - \alpha^{id} - g'' - g^e - g'$$

$$g_{100\%C}^{id} = 100 - 94,5 - 1,29 - 2,26 - 1,3$$

$$g_{100\%C}^{id} = 0,65\%$$

10 METASTABILNI Fe-Fe₃C DIJAGRAM SLIJEVANJA

Dijagram na slici 10.1 vrijedi za metastabilni slučaj skrućivanja sustava Fe-Fe₃C. U Dijagramu su istaknute specifične temperature (eutektoidna 723°C, eutektička 1145°C) i koncentracije (maksimalne rastvorivosti ugljika u feritu 0,025 %C, eutektoidna 0,8 %C, maksimalne rastvorivosti ugljika u austenitu 2,03 %C, eutektička 4,3 %C i koncentracija čistog cementita Fe₃C 6,7 %C). U dijagramu su također prikazane i metalografske skice za određene konstitucijske točke. Za uočiti su tri karakteristične strukture u kojima se javlja cementit: lamelarna u eutektoidu, mrežasta kod sekundarnog cementita i pločasta kod primarnog cementita. Izgled mikrostrukture lamelnarnog eutektoida (perlita) prikazan je u gornjem desnom kutu slike, dok je u donjem desnom kutu prikazana stanica kristalne rešetke željeznog karbida (Fe₃C).



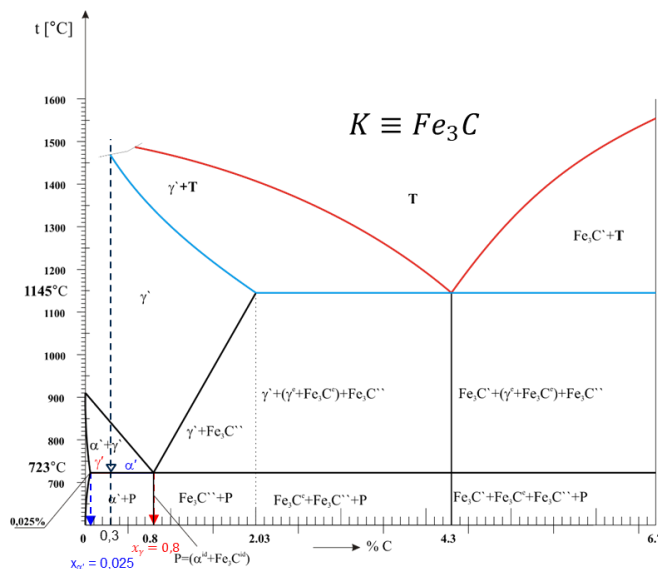
Slika 10.1 Metastabilni Fe-Fe₃C dijagram slijevanja

10.1 Proračun količinskih udjela faza

Za zadane koncentracije 0,3%C, 1,5%C, 3%C i 5,5%C metastabilne legure Fe-Fe₃C potrebno je odrediti vrste, masene količinske udjele i kemijske sastave (koncentracije) faza.

PRORAČUN ZA KONCENTRACIJU $x = 0,3\% \text{ C}$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^I = 723^\circ\text{C}$ i $x = 0,3\% \text{ C}$:



Kontrola:

$$\alpha'_{0,025\%C} + \gamma'_{0,8\%C} = 100\%$$

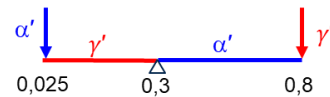
$$64,52 + 35,48 = 100\%$$

Za $t_{ID}^{II} = 738^\circ\text{C}$ i $x = 0,3\% \text{ C}$:

$$\alpha'_{0,025\%C} = 64,52\%$$

$$P = \gamma'_{0,8\%C} = 35,48\%$$

Za $t_{ID}^I = 723^\circ\text{C}$ i $x = 0,3\% \text{ C}$:



$$\alpha'_{0,025\%C} = \frac{x_\gamma - x}{x_\gamma - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{0,025\%C} = \frac{0,8 - 0,3}{0,8 - 0,025} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{0,025\%C} = 64,52\%$$

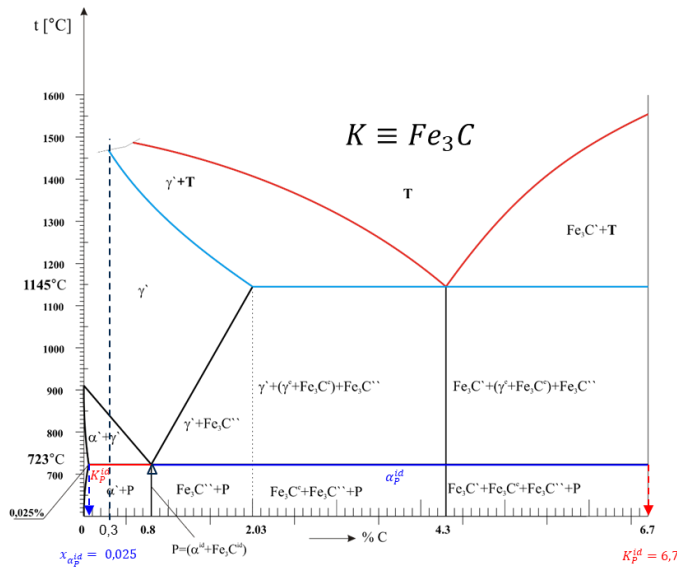
$$\gamma'_{0,8\%C} = \frac{x - x_\alpha}{x_\gamma - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{0,8\%C} = \frac{0,3 - 0,025}{0,8 - 0,025} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{0,8\%C} = 35,48\%$$

P

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^H = 723^\circ\text{C}$ i $x_{id} = 0,8\% \text{ C}$:



Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$\alpha_{0,025\%C}^{id} = \alpha_P^{id} \cdot P \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0,025\%C}^{id} = 0,8839 \cdot 0,3548 \cdot 100\% = 31,36\%$$

$$K_{6,7\%C}^{id} = K_P^{id} \cdot P \cdot 100\%$$

$$K_{6,7\%C}^{id} = 0,1161 \cdot 0,3548 \cdot 100\% = 4,12\%$$

Za $t_{ID}^H = 723^\circ\text{C}$ i $x = 0,8\% \text{ C}$:

$$\alpha_P^{id} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0,025\%C}^{id} = \frac{6,7 - 0,8}{6,7 - 0,025} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0,025\%C}^{id} = 88,39\%$$

$$K_P^{id} = \frac{x - x_\alpha}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$K_{6,7\%C}^{id} = \frac{0,8 - 0,025}{6,7 - 0,025} \cdot 100\%$$

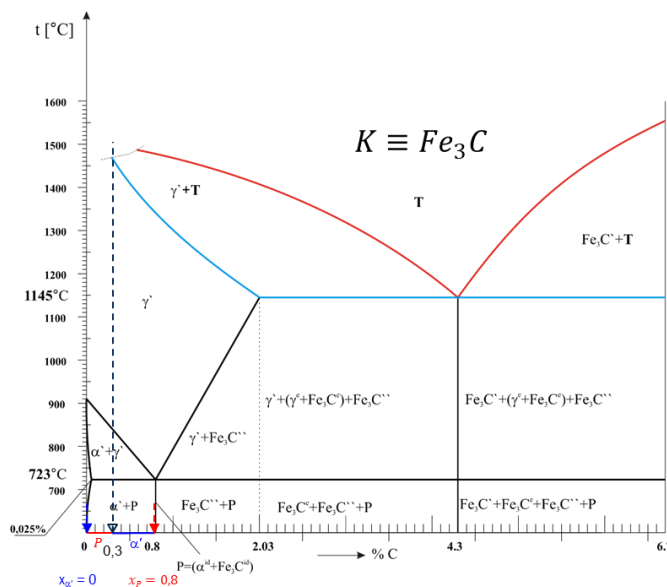
$$K_{6,7\%C}^{id} = 11,61\%$$

Kontrola:

$$\alpha_{0,025\%C}^{id} + K_{6,7\%C}^{id} = 100\%$$

$$88,39 + 11,61 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ok} = 20^\circ\text{C}$ i $x_{id} = 0,3\% \text{ C}$:



Za $t_{ok} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 0,3\% \text{ C}$:

$$\alpha' = \frac{x_P - x}{x_P - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{0\%C} = \frac{0,8 - 0,3}{0,8 - 0} \cdot 100\%$$

$$\alpha'_{0\%C} = 62,5\%$$

$$P_{0,8\%C} = \frac{x - x_\alpha}{x_P - x_\alpha} \cdot 100\%$$

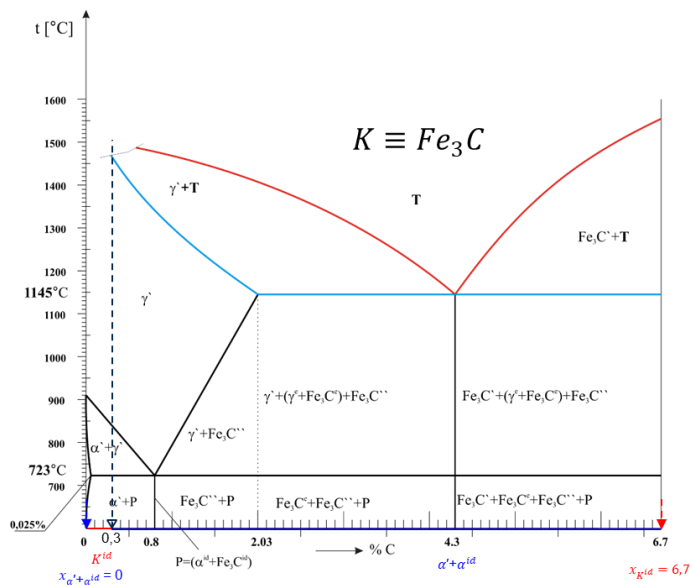
$$P_{0,8\%C} = \frac{0,3 - 0}{0,8 - 0} \cdot 100\%$$

$$P_{0,8\%C} = 37,5\%$$

Kontrola:

$$\alpha'_{0\%C} + P_{0,8\%C} = 100\%$$

$$62,5 + 37,5 = 100\%$$



Ranije utvrđeno: $\alpha' = 62,5\%$

$$P_{0,8\%C} = 37,5\%$$

Za $t_{ok} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 0,3\%C$:

$$\alpha' + \alpha^{id} \quad K^{id} \quad \alpha' + \alpha^{id} \quad K^{id}$$

0 0,3 6,7

$$K^{id}_{6,7\%C} = \frac{x_{ID} - x}{x_{ID} - x_{\alpha}} \cdot 100\%$$

$$K^{id}_{6,7\%C} = \frac{0,3 - 0}{100 - 0} \cdot 100\%$$

$$K^{id}_{6,7\%C} = 4,48\%$$

$$\alpha^{id}_{0\%C} = P_{0,8\%C} - K^{id}_{6,7\%C}$$

$$\alpha^{id}_{0\%C} = 44,12 - 0,3$$

$$\alpha^{id}_{0\%C} = 33,02$$

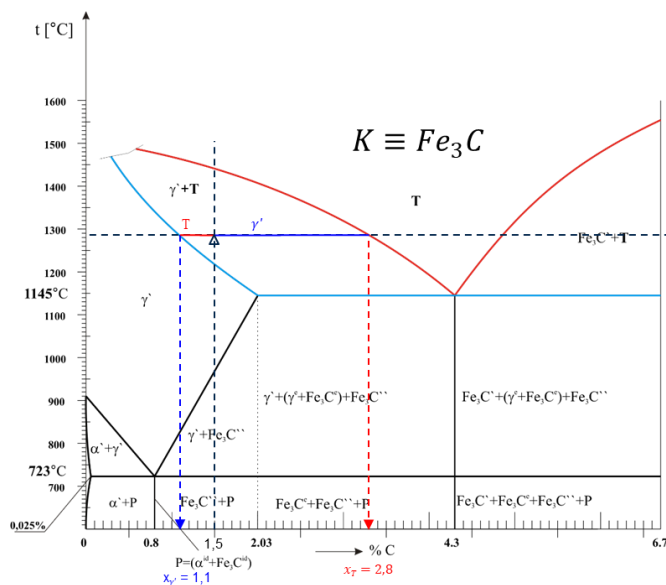
Kontrola:

$$\alpha'_{0\%C} + \alpha^{id}_{0\%C} + K^{id}_{6,7\%C} = 100\%$$

$$62,5 + 33,02 + 4,48 = 100\%$$

PRORAČUN ZA KONCENTRACIJU i $x = 1,5\%C$

Proračun za konstitucijsku točku $t = 1285^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\%C$:



Za $t = 1285^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\%C$:

$$\gamma' \quad T \quad \gamma' \quad T$$

1,1 1,5 2,8

$$\gamma'_{1,1\%C} = \frac{x_T - x}{x_T - x_{\gamma}} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{1,1\%C} = \frac{2,8 - 1,5}{2,8 - 1,1} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{1,1\%C} = 76,47\%$$

$$T_{2,8\%C} = \frac{x - x_{\alpha}}{x_{\gamma} - x_{\alpha}} \cdot 100\%$$

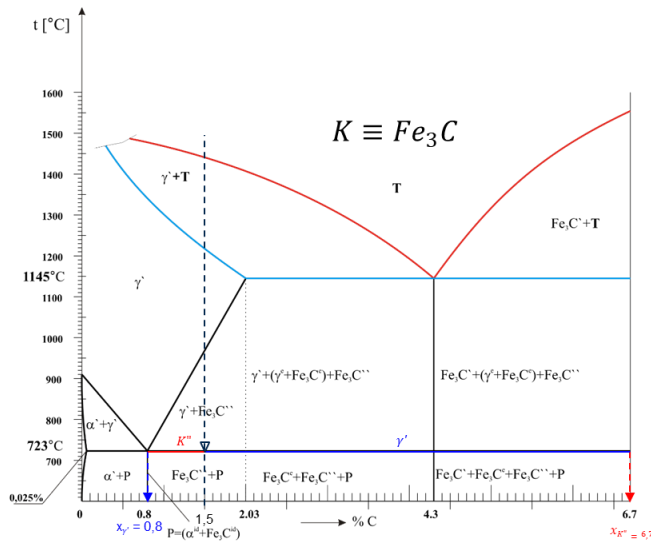
$$T_{2,8\%C} = \frac{1,5 - 1,1}{2,8 - 1,1} \cdot 100\%$$

$$T_{2,8\%C} = 23,53\%$$

Kontrola:

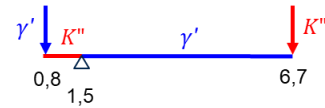
$$\gamma'_{1,1\%C} + T_{2,8\%C} = 100\%$$

$$76,47 + 23,53 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^I = 723^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\% \text{ C}$:**Kontrola:**

$$\gamma'_{0,8\%C} + K''_{6,7\%C} = 100\%$$

$$88,14 + 11,86 = 100\%$$

Za $t_{ID}^I = 723^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\% \text{ C}$:

$$\gamma'_{0,8\%C} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{0,8\%C} = \frac{6,7 - 1,5}{6,7 - 0,8} \cdot 100\%$$

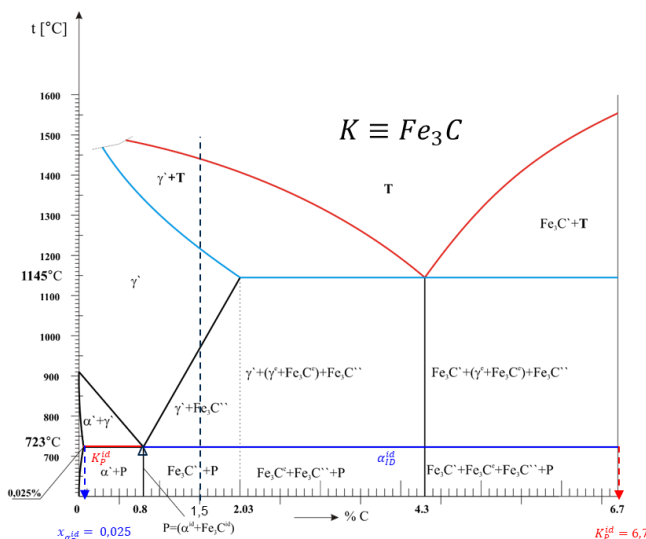
$$\gamma'_{0,8\%C} = 88,14\%$$

$$K''_{6,7\%C} = \frac{x - x_\gamma}{x_K - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$K''_{6,7\%C} = \frac{1,5 - 0,8}{6,7 - 0,8} \cdot 100\%$$

$$K''_{6,7\%C} = 11,86\%$$

Količina austenita iz 1. trenutka $\gamma'_{0,8\%C} = 88,14\%$ odgovara količini perlita P u 2. trenutku na eutektoidnoj temperaturi tj. $P_{0,8\%C} = 88,14\%$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^II = 723^\circ\text{C}$ i $x_{id} = 0,8\% \text{ C}$:**Određivanje apsolutnih količinskih udjela:**

$$\alpha_{0,025}^{id} = \alpha_P^{id} \cdot P \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0,025}^{id} = 0,8839 \cdot 0,8814 \cdot 100\% = 77,9\%$$

$$K_{6,7}^{id} = K_P^{id} \cdot P \cdot 100\%$$

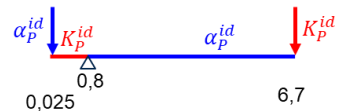
$$K_{6,7}^{id} = 0,1161 \cdot 0,8814 \cdot 100\% = 10,24\%$$

Kontrola:

$$\alpha^{id} + K^{id} + K'' = 77,9 + 10,24 + 11,86 = 100\%$$

Ranije utvrđeno: $P_{0,8\%C} = 88,14\%$

$$K''_{6,7\%C} = 11,86\%$$

Za $t_{ID}^II = 723^\circ\text{C}$ i $x = 0,8\% \text{ C}$:

$$\alpha_P^{id} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

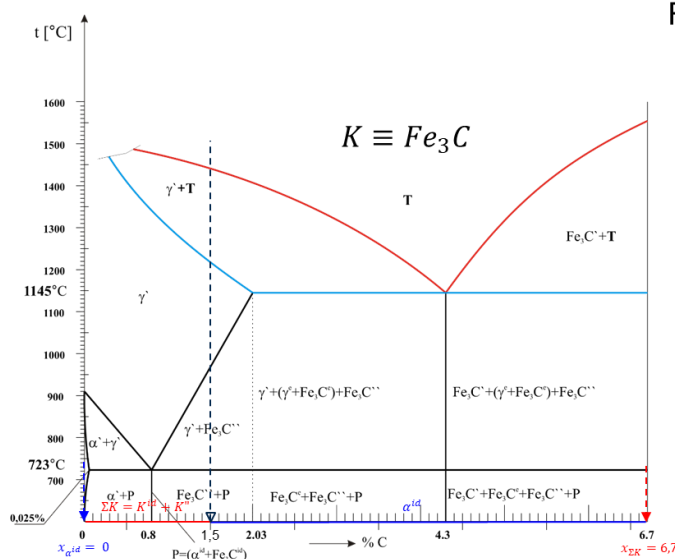
$$\alpha_P^{id} = \frac{6,7 - 0,8}{6,7 - 0,025} \cdot 100\%$$

$$\alpha_P^{id} = 88,39\%$$

$$K_P^{id} = \frac{x - x_\alpha}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$K_P^{id} = \frac{0,8 - 0,025}{6,7 - 0,025} \cdot 100\%$$

$$K_P^{id} = 11,61\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_0 = 20^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\% \text{ C}$:Ranije utvrđeno: $K''_{6,7\%C} = 11,86\%$ **Za $t_0 = 20^\circ\text{C}$ i $x = 1,5\% \text{ C}$:**

$$\alpha^{id} \quad \Sigma K \quad \alpha^{id} \quad \Sigma K = K^{id} + K''$$

$$\alpha^{id}_{0\%C} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha^{id}_{0\%C} = \frac{6,7 - 1,5}{6,7 - 0} \cdot 100\%$$

$$\alpha^{id}_{0\%C} = 77,62\%$$

$$\Sigma K_{6,7\%C} = 100\% - \alpha^{id}_{0\%C}$$

$$\Sigma K_{6,7\%C} = 100 - 77,61 = 22,39\%$$

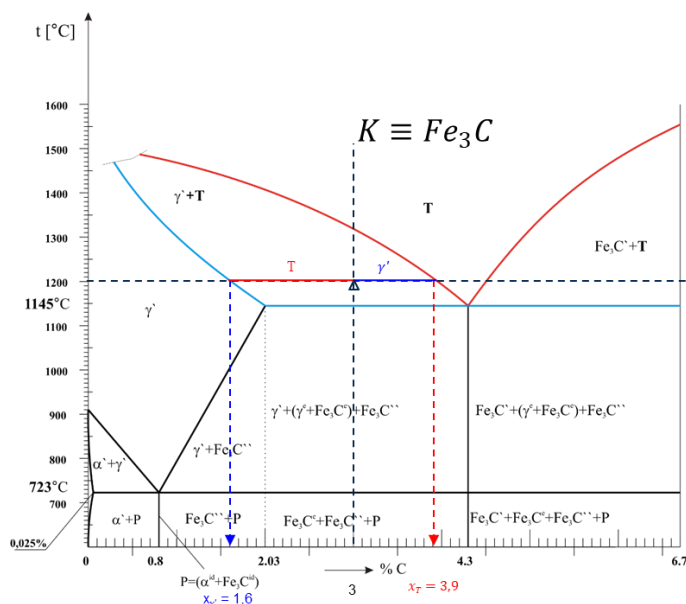
$$K^{id}_{6,7\%C} = \Sigma K_{6,7\%C} - K''_{6,7\%C}$$

$$K^{id}_{6,7\%C} = 22,39 - 11,86 = 10,52\%$$

Kontrola:

$$\alpha^{id}_{0\%C} + K^{id}_{6,7\%C} + K''_{6,7\%C} = 100\%$$

$$77,62 + 10,52 + 11,86 = 100\%$$

PRORAČUN ZA KONCENTRACIJU i $x = 3\% \text{ C}$ **Proračun za konstitucijsku točku $t = 1200^\circ\text{C}$ i $x = 3\% \text{ C}$:****Za $t = 1200^\circ\text{C}$ i $x = 3\% \text{ C}$:**

$$\gamma' \quad T \quad \gamma' \quad T$$

$$\gamma'_{1,6\%C} = \frac{x_T - x}{x_T - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{1,6\%C} = \frac{3,9 - 3}{3,9 - 1,6} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{1,6\%C} = 39,13\%$$

$$T_{3,9\%C} = \frac{x - x_\gamma}{x_T - x_\gamma} \cdot 100\%$$

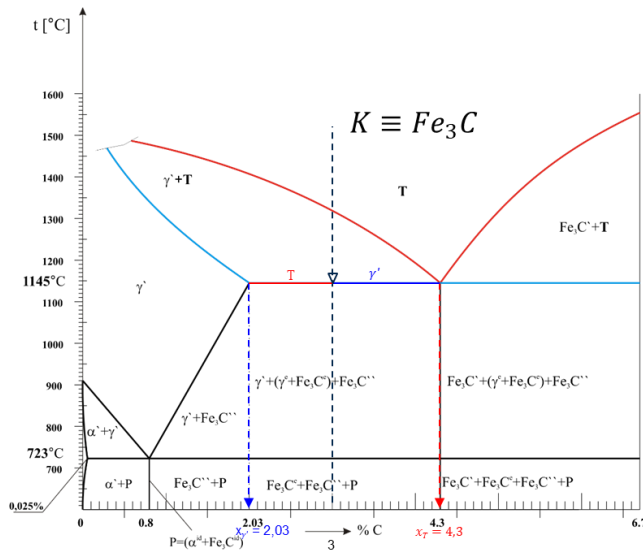
$$T_{3,9\%C} = \frac{3 - 1,6}{3,9 - 1,6} \cdot 100\%$$

$$T_{3,9\%C} = 60,87\%$$

Kontrola:

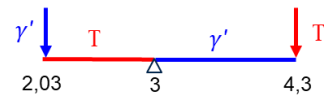
$$\gamma'_{1,6\%C} + T_{3,9\%C} = 100\%$$

$$39,13\% + 60,87\% = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_E^I = 1145^\circ\text{C}$ i $x = 3\%C$:**Kontrola:**

$$\gamma'_{2,03\%C} + T_{4,3\%C} = 100\%$$

$$57,27 + 42,73 = 100\%$$

Za $t_E^I = 1145^\circ\text{C}$ i $x = 3\%C$:

$$\gamma'_{2,03\%C} = \frac{x_T - x}{x_T - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$\gamma'_{2,03\%C} = \frac{4,3 - 3}{4,3 - 2,03} \cdot 100\%$$

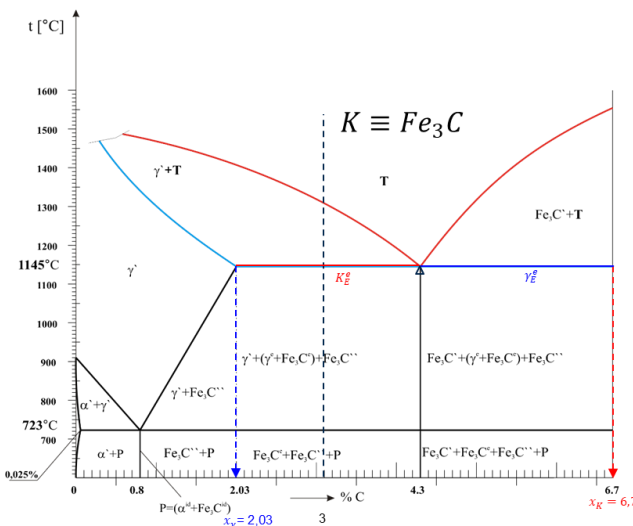
$$\gamma'_{2,03\%C} = 57,27\%$$

$$T_{4,3\%C} = \frac{x - x_\gamma}{x_T - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$T_{4,3\%C} = \frac{3 - 2,03}{4,3 - 2,03} \cdot 100\%$$

$$T_{4,3\%C} = 42,73\%$$

Količina taline iz 1. trenutka $T_{4,3\%C} = 42,73\%$ odgovara količini eutektikuma E u 2. trenutku na eutektičkoj temperaturi tj. $E_{4,3\%C} = 42,73\%$

Proračun za konstitucijsku točku $t_E^II = 1145^\circ\text{C}$ i $x_e = 4,3\%C$:**Određivanje apsolutnih količinskih udjela:**

$$\gamma^e_{2,03\%C} = \gamma_E^e \cdot E \cdot 100\%$$

$$\gamma^e_{2,03\%C} = 0,5139 \cdot 0,4273 \cdot 100\% = 21,96\%$$

$$K^e_{6,7\%C} = K_E^e \cdot E \cdot 100\%$$

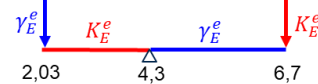
$$K^e_{6,7\%C} = 0,4861 \cdot 0,4273 \cdot 100\% = 20,77\%$$

Kontrola:

$$\gamma' + (\gamma^e + K^e) = 57,27 + (21,96 + 20,77) = 100\%$$

Ranije utvrđeno: $\gamma'_{2,03\%C} = 57,27\%$

$$E_{4,3\%C} = 42,73\%$$

Za $t_E^II = 1145^\circ\text{C}$ i $x = 4,3\%C$:

$$\gamma_E^e_{2,03\%C} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$\gamma_E^e_{2,03\%C} = \frac{6,7 - 4,3}{6,7 - 2,03} \cdot 100\%$$

$$\gamma_E^e_{2,03\%C} = 51,39\%$$

$$K_E^e_{6,7\%C} = \frac{x - x_\gamma}{x_K - x_\gamma} \cdot 100\%$$

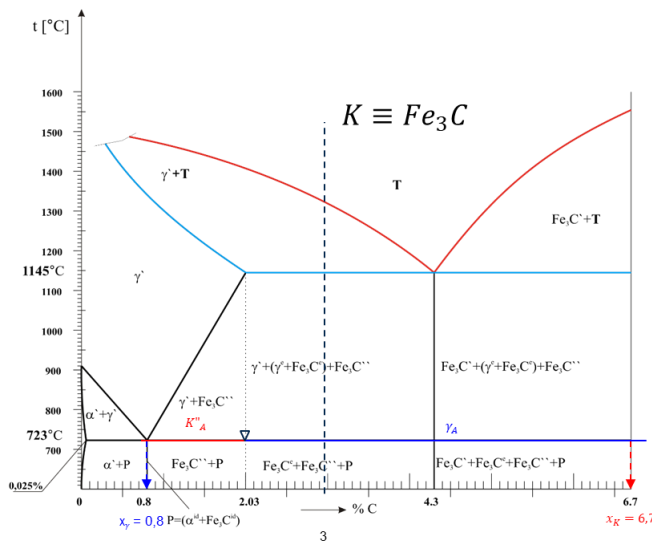
$$K_E^e_{6,7\%C} = \frac{4,3 - 2,03}{6,7 - 2,03} \cdot 100\%$$

$$K_E^e_{6,7\%C} = 48,61\%$$

Ukupna količina austenita:

$$A_{1145} = \gamma' + \gamma^e = 57,27 + 21,96$$

$$A_{1152} = 79,23\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^I = 723^\circ\text{C}$ i $x = 2,03\%\text{C}$:**Određivanje apsolutnih količinskih udjela:**

$$\gamma_{0,8\%C} = \gamma_A \cdot A \cdot 100\%$$

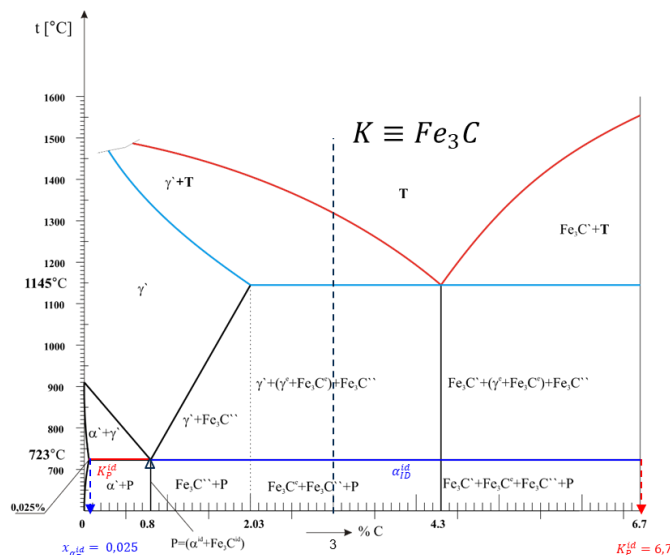
$$\gamma_{0,8\%C} = 0,7915 \cdot 0,7923 \cdot 100\% = 62,71\%$$

$$K''_{6,7\%C} = K''_A \cdot A \cdot 100\%$$

$$K''_{6,7\%C} = 0,2085 \cdot 0,7923 \cdot 100\% = 16,52\%$$

Kontrola:

$$\gamma_{0,8\%C} + K''_{6,7\%C} + K^e_{6,7\%C} = 62,71 + 16,52 + 20,77 = 100\% \quad P = A_{723} = 62,71\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^{II} = 723^\circ\text{C}$ i $x_{id} = 0,8\%\text{C}$:**Određivanje apsolutnih količinskih udjela:**

$$\alpha^{id}_{0,025\%C} = \alpha_P^{id} \cdot P \cdot 100\%$$

$$\alpha^{id}_{0,025\%C} = 0,8839 \cdot 0,6271 \cdot 100\% = 55,43\%$$

$$K^{id}_{6,7\%C} = K_P^{id} \cdot P \cdot 100\%$$

$$K^{id}_{6,7\%C} = 0,1161 \cdot 0,6271 \cdot 100\% = 7,28\%$$

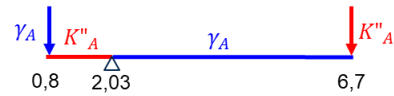
Kontrola:

$$\alpha^{id} + K^{id} + K'' + K^e = 55,43 + 7,28 + 16,52 + 20,77 = 100\%$$

Ranije utvrđeno: $A = A_{1145} = 79,23\%$

$$K^e = 20,77\%$$

Za $t_{ID}^I = 723^\circ\text{C}$ i $x = 2,03\%\text{C}$:



$$\gamma_{A,0,8\%C} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{A,0,8\%C} = \frac{6,7 - 2,03}{6,7 - 0,8} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{A,0,8\%C} = 79,15\%$$

$$K''_{A,6,7\%C} = \frac{x - x_\gamma}{x_K - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$K''_{A,6,7\%C} = \frac{2,03 - 0,8}{6,7 - 0,8} \cdot 100\%$$

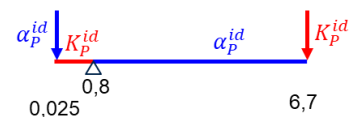
$$K''_{A,6,7\%C} = 20,85\%$$

Ranije utvrđeno: $P_{0,8\%C} = 62,71\%$

$$K''_{6,7\%C} = 16,52\%$$

$$K^e = 20,77\%$$

Za $t_{ID}^{II} = 723^\circ\text{C}$ i $x = 0,8\%\text{C}$:



$$\alpha_P^{id}_{0,025\%C} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

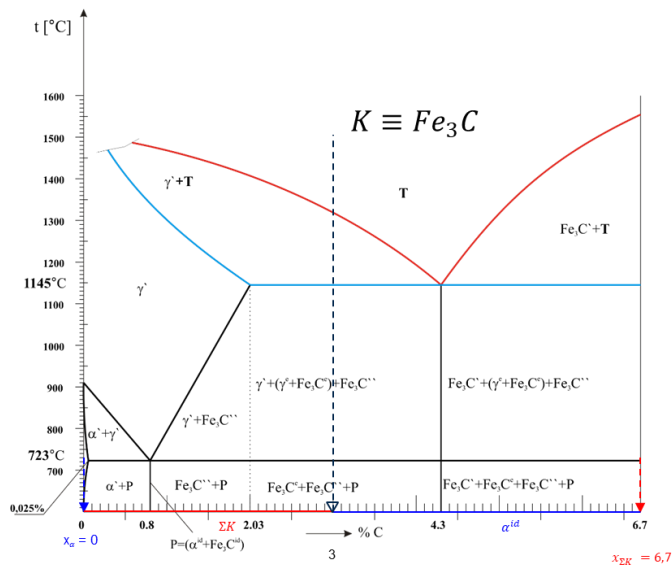
$$\alpha_P^{id}_{0,025\%C} = \frac{6,7 - 0,8}{6,7 - 0,025} \cdot 100\%$$

$$\alpha_P^{id}_{0,025\%C} = 88,39\%$$

$$K_P^{id}_{6,7\%C} = \frac{x - x_\alpha}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$K_P^{id}_{6,7\%C} = \frac{0,8 - 0,025}{6,7 - 0,025} \cdot 100\%$$

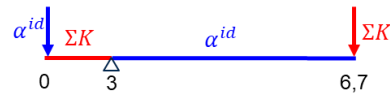
$$K_P^{id}_{6,7\%C} = 11,61\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{OK} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 3\%C$:Ranije utvrđeno: $\alpha^{id} = 55,43\%$

$$K^{id} = 7,28\%$$

$$K'' = 16,52\%$$

$$K^e = 20,77\%$$

Za $t_{OK} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 3\%C$:

$$\alpha_{0\%C}^{id} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0\%C}^{id} = \frac{6,7 - 3}{6,7 - 0} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0\%C}^{id} = 55,22\%$$

$$K_{6,7\%C}^{id} = 100\% - \alpha^{id} - K'' - K^e$$

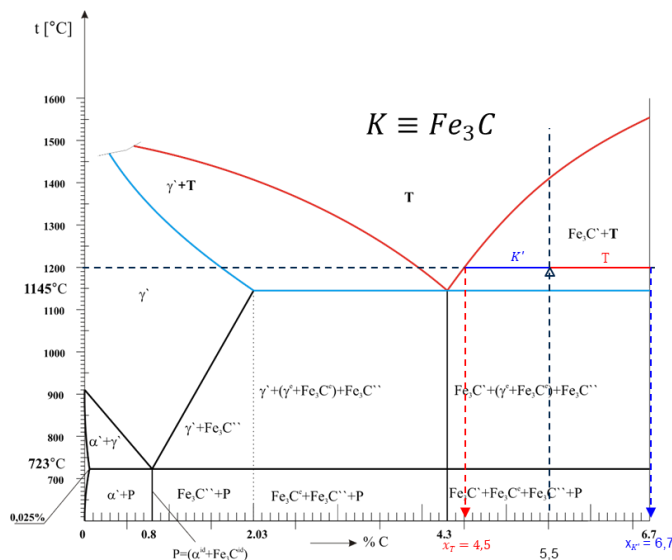
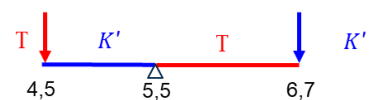
$$K_{6,7\%C}^{id} = 100 - 55,22 - 16,52 - 20,77$$

$$K_{6,7\%C}^{id} = 7,49\%$$

Kontrola:

$$\alpha_{0\%C}^{id} + K_{6,7\%C}^{id} + K''_{6,7\%C} + K^e_{6,7\%C} = 100\%C$$

$$52,22 + 7,49 + 16,52 + 20,77 = 100\%$$

PRORAČUN ZA KONCENTRACIJU i $x = 5,5\%C$ **Proračun za konstitucijsku točku $t = 1200^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\%C$:****Za $t = 1200^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\%C$:**

$$K'_{6,7\%C} = \frac{x - x_T}{x_K - x_T} \cdot 100\%$$

$$K'_{6,7\%C} = \frac{5,5 - 4,5}{6,7 - 4,5} \cdot 100\%$$

$$K'_{6,7\%C} = 45,45\%$$

$$T_{4,5\%C} = \frac{x_K - x}{x_K - x_T} \cdot 100\%$$

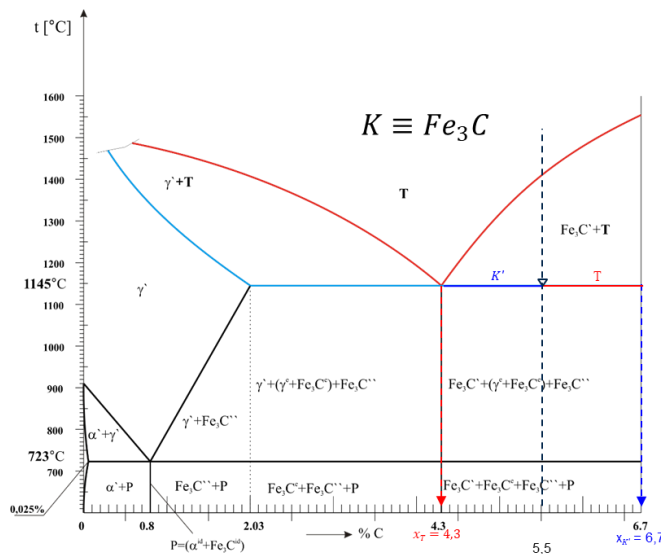
$$T_{4,5\%C} = \frac{6,7 - 5,5}{6,7 - 4,5} \cdot 100\%$$

$$T_{4,5\%C} = 54,55\%$$

Kontrola:

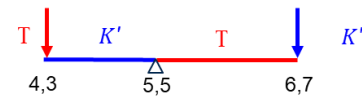
$$K'_{6,7\%C} + T_{4,5\%C} = 100\%$$

$$45,45 + 54,55 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_E^I = 1145^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\% \text{C}$:**Kontrola:**

$$K'_{6,7\%C} + T_{4,3\%C} = 100\%$$

$$50 + 50 = 100\%$$

Za $t_E^I = 1145^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\% \text{C}$:

$$K'_{6,7\%C} = \frac{x - x_T}{x_K - x_T} \cdot 100\%$$

$$K'_{6,7\%C} = \frac{5,5 - 4,3}{6,7 - 4,3} \cdot 100\%$$

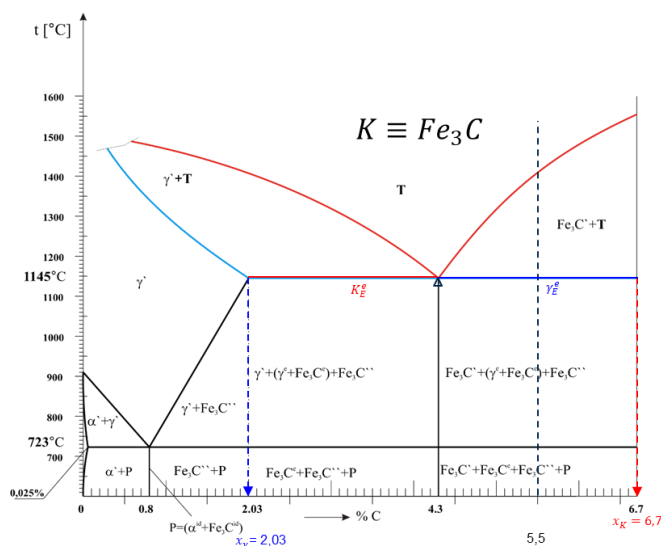
$$K'_{6,7\%C} = 50\%$$

$$T_{4,3\%C} = \frac{x_K - x}{x_K - x_T} \cdot 100\%$$

$$T_{4,3\%C} = \frac{6,7 - 5,5}{6,7 - 4,3} \cdot 100\%$$

$$T_{4,3\%C} = 50\% \leftarrow E$$

Količina taline iz 1. trenutka $T_{4,3\%C} = 50\%$ odgovara količini eutektikuma E u 2. trenutku na eutektičkoj temperaturi tj. $E_{4,3\%C} = 50\%$

Proračun za konstitucijsku točku $t_E^{II} = 1145^\circ\text{C}$ i $x_e = 4,3\% \text{C}$:**Određivanje apsolutnih količinskih udjela:**

$$\gamma_{2,03\%C}^e = \gamma_E^e \cdot E \cdot 100\%$$

$$\gamma_{2,03\%C}^e = 0,5139 \cdot 0,50 \cdot 100\% = 25,7\%$$

$$K_{6,7\%C}^e = K_E^e \cdot E \cdot 100\%$$

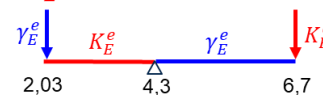
$$K_{6,7\%C}^e = 0,4861 \cdot 0,50 \cdot 100\% = 24,3\%$$

Kontrola:

$$K' + (\gamma^e + K^e) = 50 + (25,7 + 24,3) = 100\%$$

Ranije utvrđeno: $K'_{6,7\%C} = 50\%$

$$E_{4,3\%C} = 50\%$$

Za $t_E^{II} = 1145^\circ\text{C}$ i $x = 4,3\% \text{C}$:

$$\gamma_{2,03\%C}^e = \frac{x_K - x}{x_K - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{2,03\%C}^e = \frac{6,7 - 4,3}{6,7 - 2,03} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{2,03\%C}^e = 51,39\%$$

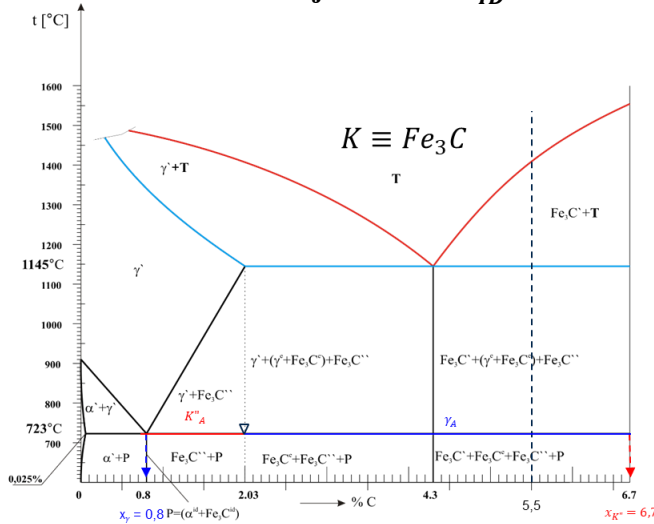
$$K_{6,7\%C}^e = \frac{x - x_\gamma}{x_K - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$K_{6,7\%C}^e = \frac{4,3 - 2,03}{6,7 - 2,03} \cdot 100\%$$

$$K_{6,7\%C}^e = 48,61\%$$

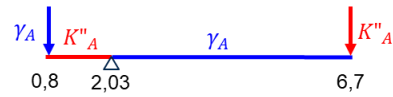
Ukupna količina austenita:

$$A_{1145} = \gamma^e = 25,7$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^I = 723^\circ\text{C}$ i $x = 2,03\%\text{C}$:Ranije utvrđeno: $A = A_{1145} = 25,7\%$

$$K^e = 24,3\%$$

$$K' = 50\%$$

Za $t_{ID}^I = 723^\circ\text{C}$ i $x = 2,03\%\text{C}$:

$$\gamma_{A,0,8\%C} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{A,0,8\%C} = \frac{6,7 - 2,03}{6,7 - 0,8} \cdot 100\%$$

$$\gamma_{A,0,8\%C} = 79,15\%$$

$$K''_{A,6,7\%C} = \frac{x - x_\gamma}{x_K - x_\gamma} \cdot 100\%$$

$$K''_{A,6,7\%C} = \frac{2,03 - 0,8}{6,7 - 0,8} \cdot 100\%$$

$$K''_{A,6,7\%C} = 20,85\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$\gamma_{0,8\%C} = \gamma_A \cdot A_{1145} \cdot 100\%$$

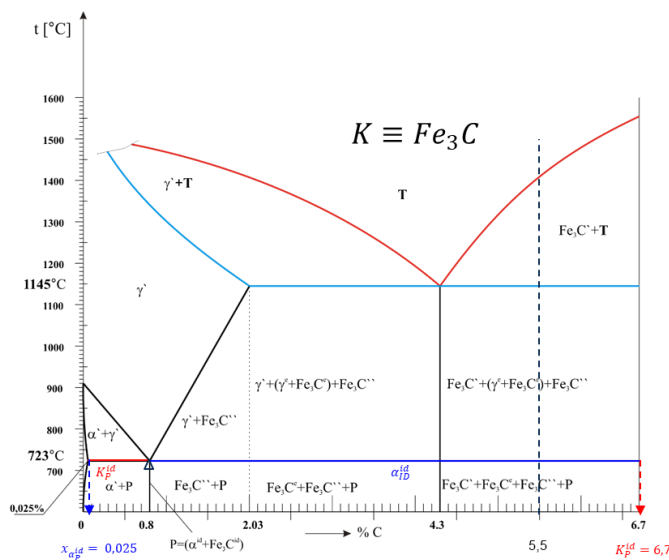
$$\gamma_{0,8\%C} = 0,7915 \cdot 0,257 \cdot 100\% = 20,34\%$$

$$K''_{6,7\%C} = K''_A \cdot A_{1145} \cdot 100\%$$

$$K''_{6,7\%C} = 0,2085 \cdot 0,257 \cdot 100\% = 5,36\%$$

 $A_{738} = P$ **Kontrola:**

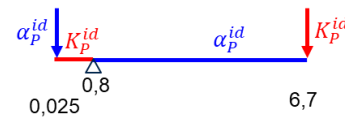
$$\gamma_{0,8\%C} + K''_{6,7\%C} + K^e_{6,7\%C} + K'_{6,7\%C} = 20,34 + 5,36 + 24,3 + 50 = 100\%$$

Proračun za konstitucijsku točku $t_{ID}^{II} = 723^\circ\text{C}$ i $x_{id} = 0,8\%\text{C}$:Ranije utvrđeno: $P = 20,34\%$

$$K' = 50\%$$

$$K'' = 5,36\%$$

$$K^e = 24,3\%$$

Za $t_{ID}^{II} = 723^\circ\text{C}$ i $x = 0,8\%\text{C}$:

$$\alpha_P^{id,0,025\%C} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha_P^{id,0,025\%C} = \frac{6,7 - 0,8}{6,7 - 0,025} \cdot 100\%$$

$$\alpha_P^{id,0,025\%C} = 88,39\%$$

$$K_P^{id,6,7\%C} = \frac{x - x_\alpha}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$K_P^{id,6,7\%C} = \frac{0,8 - 0,025}{6,7 - 0,025} \cdot 100\%$$

$$K_P^{id,6,7\%C} = 11,61\%$$

Određivanje apsolutnih količinskih udjela:

$$\alpha_{0,025\%C}^{id} = \alpha_P^{id} \cdot P \cdot 100\%$$

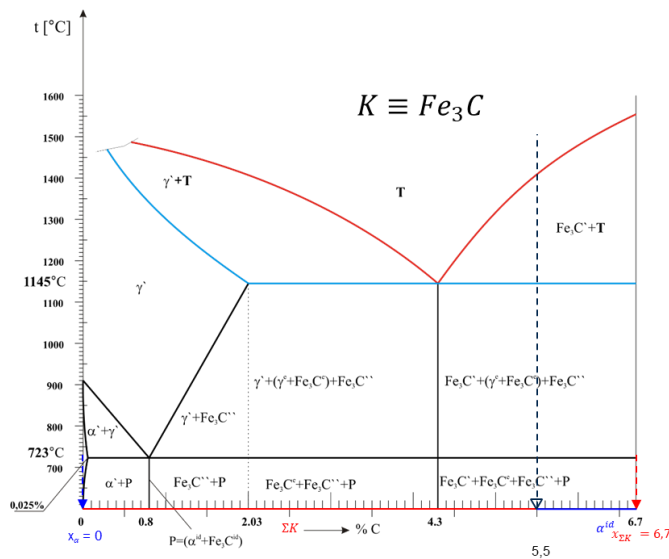
$$\alpha_{0,025\%C}^{id} = 0,8839 \cdot 0,2034 \cdot 100\% = 17,95\%$$

$$K_{6,7\%C}^{id} = K_P^{id} \cdot P \cdot 100\%$$

$$K_{6,7\%C}^{id} = 0,1161 \cdot 0,2034 \cdot 100\% = 2,36\%$$

Kontrola:

$$\alpha_{0,025\%C}^{id} + K_{6,7\%C}^{id} + K' + K'' + K^e = 17,95 + 2,36 + 50 + 5,36 + 24,3 = 100\%$$

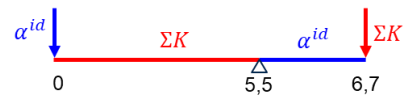
Proračun za konstitucijsku točku $t_{OK} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\%\text{C}$:Ranije utvrđeno: $\alpha^{id} = 17,95\%$

$$K^{id} = 2,36\%$$

$$K' = 50\%$$

$$K'' = 5,36\%$$

$$K^e = 24,3\%$$

Za $t_{OK} = 20^\circ\text{C}$ i $x = 5,5\%\text{C}$:

$$\alpha_{0\%C}^{id} = \frac{x_K - x}{x_K - x_\alpha} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0\%C}^{id} = \frac{6,7 - 5,5}{6,7 - 0} \cdot 100\%$$

$$\alpha_{0\%C}^{id} = 17,91\%$$

Kontrola:

$$\alpha^{id} + K^{id} + K'' + K^e + K' = 100\%$$

$$17,91 + 2,43 + 5,36 + 24,3 + 50 = 100\%$$

$$K_{6,7\%C}^{id} = 100\% - \alpha^{id} - K' - K'' - K^e$$

$$K_{6,7\%C}^{id} = 100 - 17,91 - 50 - 5,36 - 24,3$$

$$K_{6,7\%C}^{id} = 2,43\%$$

11 ISPITIVANJE TVRDOĆE (Brinell, Vickers, Poldy, Leeb)

11.1 Tvrdoća materijala

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju stranog tijela u njegovu površinu - mehaničko svojstvo materijala. Tvrdi materijal može ostaviti trag u mekšem materijalu. Tvrdoća predstavlja odraz faznog sastava i strukture u metalu. Povećanjem tvrdoće povećava se otpornost trošenju. Kod čelika se temeljem poznate tvrdoće može se približno odrediti vlačna čvrstoća materijala. Tvrdoća nema apsolutnu vrijednost kao čvrstoća, već se izražava prema načinu mjerenja.

Najstariji tehnički način određivanja tvrdoće je usporedba različitih tvari međusobnim grebanjem tvari o tvar. Prema Mohs-ovoj skali ovako se mjeri tvrdoća minerala. Najtvrđi je dijamant, s brojem 10, a najmekši je talk, s brojem 0 (tablica 11.1). Skala je nelinearna i u strojarstvu se ne koristi.

Tablica 11.1 Minerali u Mohs-ovoj skali tvrdoće

Diamond	10
Corundum	9
Topaz	8
Quartz	7
Orthoclase (Feldspar)	6
Apatite	5
Fluorite	4
Calcite	3
Gypsum	2
Talc	1

U strojarstvu se često koristi mogućnost utiskivanja tvrde tvari u mekšu kao mjerilo tvrdoće.

Najpoznatije metode su mjerenja tvrdoće po Brinellu, Vickersu.

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.

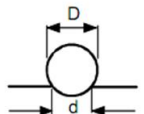
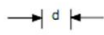
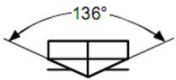
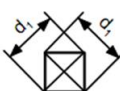
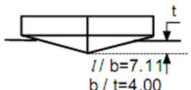
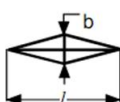
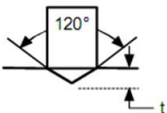
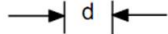
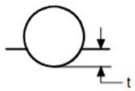
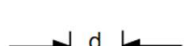
U svakom ispitivanju penetrator treba biti znatno tvrdi od ispitivanog materijala da se sam ne deformira prilikom mjerenja. Površina mjerenja prije ispitivanja treba biti glatka kako bi se omogućilo oblikovanje pravilnog otiska i očitavanje promjera.

Metode određivanja tvrdoće se dijele na:

- statičke (Rockwell, Brinell, Vickers);
- dinamičke (Poldy, Leeb).

Kod statičkih metoda sila koja djeluje na penetrator postepeno raste do maksimalne vrijednosti. Kod dinamičkih ispitivanja sila na penetrator se ostvaruje udarom, ili se tvrdoća određuje temeljem elastičnog odskoka penetratora od ispitivane površine. U tablici 11.2 dan je pregled standardnih metoda mjerenja tvrdoće, odgovarajućih penetratora i standardnih opterećenja.

Tablica 11.2 Pregled standardnih metoda mjerenja tvrdoće metala

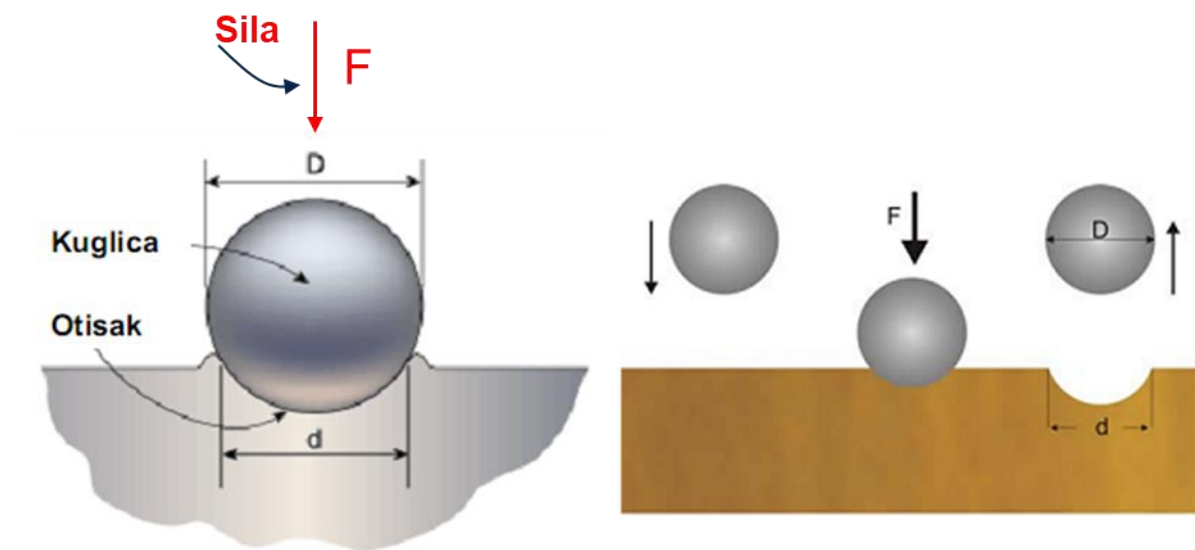
Metoda	Penetrator	Izgled penetratora		Opterećenje	Formula za izračunavanje tvrdoće
		Bočni pogled	Pogled odozgo		
Brinell	Kuglica od čelika ili volfram karbida			F	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Dijamantna piramida			F	$HV = \frac{1.854 F}{d^2}$
Knoop	Dijamantna piramida			F	$HK = \frac{14.2 F}{l^2}$
Rockwell A C D	Dijamantni stožac			60 kg 150 kg 100 kg	
B F G	Čelična kuglica promjera 1/16"			100 kg 60 kg 150 kg	
E	Čelična kuglica promjera 1/8"			100 kg	

11.2 Ispitivanje tvrdoće po Brinellu (HB)

Tvrdoća po Brinellu je mjera otpornosti ispitivanog materijala prodiranju kuglice standardnog promjera D pritiskane standardnom silom F (slika 11.1). Tvrdoća HB je omjer između sile i površine otiska, tj. kugline kalote. Penetrator za ispitivanje po Brinellu je zakaljena čelična kuglica standardnog promjera.

Standardni promjeri su različiti (10, 5 i 2.5 mm), kao i standardne sile (3000; 750; 187,5; 62,5 kg x 9,81 = 29420; 7355; 1839; 612,9 N), da se pokrije širi raspon tvrdoća materijala. Ovom metodom ispituju se mekši i srednje tvrdi materijali (konstrukcijski čelik, obojeni metali). Kod standardnih aparata sila pritiska raste do nazivne F kroz 2 - 8 s, a djelovanje sile traje 10 - 15 s za Fe-C legure, dok za najmekše materijale djelovanje sile može trajati i do 180 s.

Nakon rasterećenja očita se pripadajući promjer otiska d.



Slika 11.1 Princip mjerenja tvrdoće po Brinellu

Izvod izraza za tvrdoću po Brinell-u:

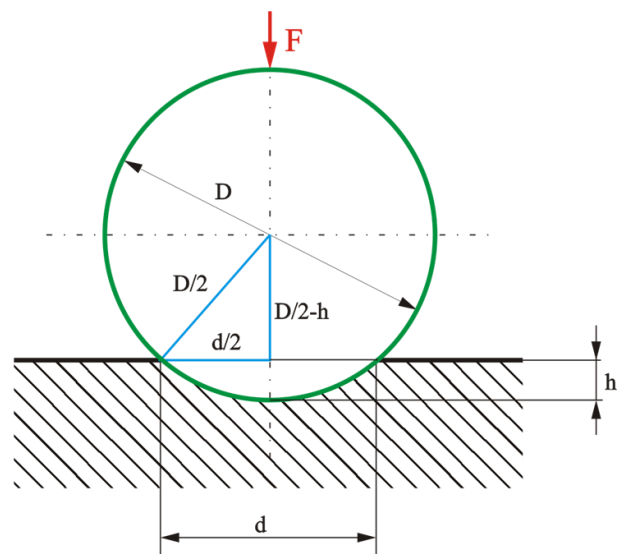
Općenito je površina kugline kalote:

$$HB = \frac{F}{A} \quad A = \pi \cdot D \cdot h$$

$$\frac{D}{2} - h = \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} \quad h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2}$$

$$h = \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$$

$$A = \pi \cdot D \cdot \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$$



Napomena: Formulu prilagođavamo starim mjerama (sila u kilopondima)!

$$HB = \frac{2 \cdot F}{9,81 \cdot \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Najbolji rezultati mjerenja su oni pri kojem je promjer otiska (mjerenje je valjano za $d/D = 0,25 \div 0,5$)

U ovisnosti o tvrdoći materijala treba varirati i silu utiskivanja F (vidi tablicu 11.3). U cilju određivanja sile utiskivanja uveden je **stupanj opterećenja X** :

$$X = \frac{0,102 \cdot F}{D^2}$$

gdje je: F , N - sila utiskivanja

D , mm – promjer kuglice

Tablica 11.3 Stupanj opterećenja za različite metale

Vrijednost $0,102 \cdot F$ odabire se s obzirom na vrstu materijala i njegovu tvrdoću		
Materijal	Tvrdoća HB	$\frac{0,102 \cdot F}{D^2}$
Čelik		30
Lijeivano željezo	< 140	10
	> 140	30
Bakar i legure bakra	< 35	5
	35 ÷ 200	10
	> 200	30
Laki metali i njihove legure	< 35	1,25 2,5
	35 ÷ 80	5 10 15
	> 80	10 15
Olovo i kositar		1 1,25

U primjeni su slijedeće sile utiskivanja F , N odnosno odgovarajuće vrijednosti $0,102 F$ (u zagradi) i promjeri kuglica D , mm – raspoređene u skupine po vrijednostima $0,102 \cdot F/D^2$ – tablica 11.4.

Tablica 11.4 Izbor sile opterećenja prema promjeru kuglice i stupnju opterećenja

$\frac{0,102 F}{D^2}$	STUPANJ OPTEREĆENJA				
	F N ($0,102 F$)				
	za D mm:				
	10	5	2,5	2	1
30	29420 (3000)	7355 (750)	1839 (187,5)	1177 (120)	294,2 (30)
15	14710 (1500)	–	–	–	–
10	9807 (1000)	2452 (250)	612,9 (62,5)	392,2 (40)	98,07 (10)
5	4903 (500)	1226 (125)	306,5 (31,25)	196,1 (20)	49,03 (5)
2,5	2452 (250)	612,9 (62,5)	153,2 (15,625)	98,07 (10)	24,52 (2,5)
1,25	1226 (125)	306,5 (31,25)	76,61 (7,8125)	49,03 (5)	12,26 (1,25)
1	980,7 (100)	245,2 (25)	61,29 (6,25)	39,23 (4)	9,807 (1)

„Strojarski priručnik – Bojan Kraut“

Nakon izvršenog utiskivanja penetratora (zakaljene čelične kuglice) vrši se mjerenje promjera otiska, te se na temelju izmjerenog promjera, stupnja opterećenja i promjera kuglice vrši očitavanje HB tvrdoće primjenom tablica (tablica 11.5).

Tablica 11.5

Promjer otiska d mm					Tvrdoća po Brinellu HB						
pri promjeru kuglice D mm:					za vrijednost $0,102F/D^2$:						
10	5	2,5	2	1	30	15	10	5	2,5	1,25	1
2,40	1,20	0,60	0,48	0,24	653	327	218	109	54,5	27,2	21,8
2,45			0,49		627	313	209	104	52,2	26,1	20,9
2,50	1,25		0,50	0,25	601	301	200	100	50,1	25,1	20,0
2,55			0,51		578	289	193	96,3	48,1	24,1	19,3
2,60	1,30	0,65	0,52	0,26	555	278	185	92,6	46,3	23,1	18,5
2,65			0,53		534	267	178	89,0	44,5	22,3	17,8
2,70	1,35		0,54	0,27	514	257	171	85,7	42,9	21,4	17,1
2,75			0,55		495	248	165	82,6	41,3	20,6	16,5
2,80	1,40	0,70	0,56	0,28	477	239	159	79,6	39,8	19,9	15,9
2,85			0,57		461	230	154	76,8	38,4	19,2	15,4
2,90	1,45		0,58	0,29	444	222	148	74,1	37,0	18,5	14,8
2,95			0,59		429	215	143	71,5	35,8	17,9	14,3
3,00	1,50	0,75	0,60	0,30	415	207	138	69,1	34,6	17,3	13,8
3,05			0,61		401	200	134	66,8	33,4	16,7	13,4
3,10	1,55		0,62	0,31	388	194	129	64,6	32,3	16,2	12,9
3,15			0,63		375	188	125	62,5	31,3	15,6	12,5
3,20	1,60	0,80	0,64	0,32	363	182	121	60,5	30,3	15,1	12,1
3,25			0,65		352	176	117	58,6	29,3	14,7	11,7
3,30	1,65		0,66	0,33	341	170	114	56,8	28,4	14,2	11,4
3,35			0,67		331	165	110	55,1	27,5	13,8	11,0
3,40	1,70	0,85	0,68	0,34	321	160	107	53,4	26,7	13,4	10,7
3,45			0,69		311	156	104	51,8	25,9	13,0	10,4
3,50	1,75		0,70	0,35	302	151	101	50,3	25,2	12,6	10,1

„Strojarski priručnik – Bojan Kraut”

Nakon očitavanja tvrdoće istu treba zabilježiti po standardu. Primjer označavanja Brinell-ove tvrdoće:

128 HB 5/250/15

gdje je: 128 – brojčana vrijednost tvrdoće

5 – promjer kuglice D , mm250 – sila utiskivanja F , N $\cdot 0,102$ 15 – vrijeme utiskivanja τ , s

Za čelike se, na temelju poznate Brinellove tvrdoće, može približno odrediti njegova čvrstoća R_m , MPa:

za ugljični čelik: $R_m = 3,6 \cdot HB$ za čelik legiran kromom: $R_m = 3,5 \cdot HB$ za krom nikal legirane čelike: $R_m = 3,4 \cdot HB$

Kako bi se utvrdila ispravnost samog tvrdomjera i penetratora prije mjerenja vrši se probno mjerenje na etalonima (slika 11.2)



Slika 11.2 Etaloni za provjeru ispravnosti tvrdomjera

11.2.1 Primjer mjerenja Brinell tvrdoće

Postupak mjerenja HB tvrdoće uzorka iz mjedi



1. KORAK

Odabrati stupanj opterećenja $x = \frac{0,102 \cdot F}{D^2}$ prema ispitivanom materijalu (legure bakra i aluminija $x = 10$, za čelike $x = 30$)

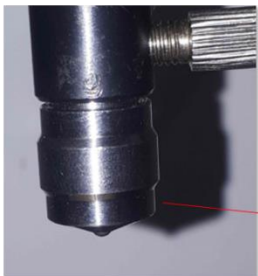
2. KORAK

Odabrati kombinaciju promjera penetratora i sile (koju uređaj za ispitivanje može ostvariti) utiskivanja koje ostvaruju traženi stupanj opterećenja $x = 10$ ($D = 2,5\text{mm}$; $F = 612,9\text{N} = 62,5\text{kp}$)

Diameter of Ball Indenter D/mm		0,102 × F/D ²					
		30	15	10	5	2,5	1
		Testing Force F/N					
10	5	29420	14710	9807	4903	2452	980.7
		7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		1839	—	612.9	306.3	153.2	61.29
		2942	—	98.07	49.03	24.52	9.807
Average Diameter of Indentation D _{av} /mm		Brinell Hardness Value HBW					
2.40	1.200	0.600 0	0.240	863	327	218	109
2.41	1.205	0.602 4	0.241	848	324	216	108
2.42	1.210	0.605 0	0.242	843	321	214	107
2.43	1.215	0.607 8	0.243	837	319	212	106
2.44	1.220	0.610 0	0.244	832	316	211	105
2.45	1.225	0.612 5	0.245	827	314	209	104
2.46	1.230	0.615 0	0.246	821	311	207	104
2.47	1.235	0.617 5	0.247	816	308	205	103
2.48	1.240	0.620 0	0.248	811	306	204	102
2.49	1.245	0.622 5	0.249	806	303	202	101
2.50	1.250	0.625 0	0.250	801	301	200	100
2.51	1.255	0.627 5	0.251	797	298	199	99.4
2.52	1.260	0.630 0	0.252	792	296	197	98.6
2.53	1.265	0.632 5	0.253	787	294	196	97.8
2.54	1.270	0.635 0	0.254	782	291	194	97.1
2.55	1.275	0.637 5	0.255	778	289	193	96.3
2.56	1.280	0.640 0	0.256	773	287	191	95.6
2.57	1.285	0.642 5	0.257	769	284	190	94.8
2.58	1.290	0.645 0	0.258	764	282	188	94.0
2.59	1.295	0.647 5	0.259	760	280	187	93.3
2.60	1.300	0.650 0	0.260	755	278	185	92.6
2.61	1.305	0.652 5	0.261	751	276	184	91.8
2.62	1.310	0.655 0	0.262	747	273	182	91.1
2.63	1.315	0.657 5	0.263	743	271	181	90.4
2.64	1.320	0.660 0	0.264	738	269	179	89.7
2.65	1.325	0.662 5	0.265	734	267	178	89.0
2.66	1.330	0.665 0	0.266	730	265	177	88.4
2.67	1.335	0.667 5	0.267	726	263	175	87.7
2.68	1.340	0.670 0	0.268	722	261	174	87.0

3. KORAK

Montaža odgovarajućeg penetratora $D = 2,5\text{mm}$, podešavanje sile utiskivanja $F = 612,9\text{N} = 62,5\text{ kp}$ i vremena trajanja $\tau = 15\text{ s}$ maksimalne sile na penetrator.



Montaža penetratora



Podešavanje sile utiskivanja



Podešavanje vremena trajanja maksimalne sile

4. KORAK

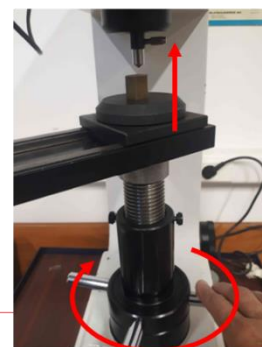
Postavljanje uzorka na radni stol, podizanje radnog stola pomoću matice i navojnog vretena s uzorkom do penetratora i postavljanje uzorka u položaj za mjerenje tvrdoće



Zakretanjem matice, dok je penetrator u kontaktu s površinom uzorka, dolazi do zakretanja male kazaljke na mjernom instrumentu. Penetrator postiže pravilan početni položaj za početak ispitivanja kada se vrh male kazaljke poklopi s crvenom točkom.



Zakretanjem matice podiže se radni stol

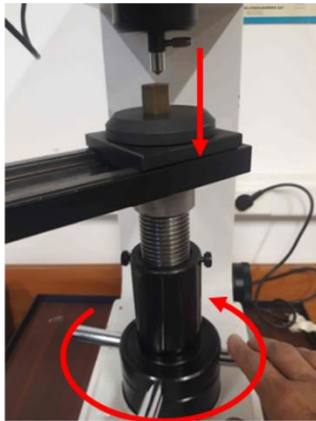


5. KORAK

Pritiskom na tipku start započinje porast sile do podešene vrijednosti i utiskivanje penetratora u površinu uzorka. Po isteku podešenog vremena trajanja utiskivanja automatski se vrši rasterećenje, te se pomoću navojnog vretena radni stol s uzorkom spušta desetak milimetara prema dolje.

6. KORAK

Radni stol se translacija pomoću klizača ispod objektiva mjernog instrumenta pomoću kojeg se mjeri promjer otiska.

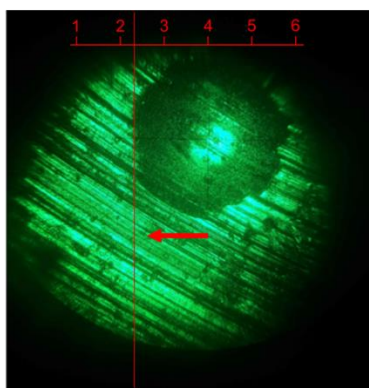


7. KORAK

Zakretanjem matice radni stol se pomiče po visini dok površina uzorka ne dođe do fokalne udaljenosti što se provjerava promatranjem kroz okular mikroskopa (oštra slika površine uzorka s vidljivim otiskom)

8. KORAK

Zakretanjem kotača (noniusa – pomične mjerne ljestvice) pomiče se vertikalna mjerna linija (prikazana crveno na slici) u krajnji lijevi položaj otiska, a na mjernoj skali vidljivoj kroz okular se očitava manja vrijednost između kojih se nalazi crvena linija (2) i vrijednost na nonius skali (45) što daje ukupnu vrijednost 245

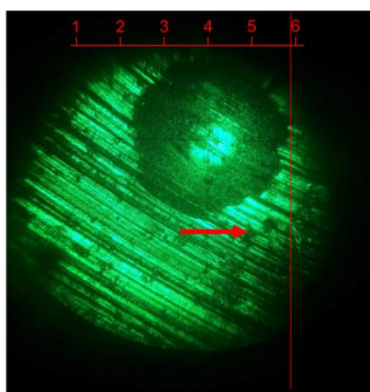


9. KORAK

Zakretanjem kotača (noniusa – pomične mjerne ljestvice) u suprotnu stranu pomiče se vertikalna mjerna linija (prikazana crveno na slici) u krajnji desni položaj otiska, a na mjernoj skali vidljivoj kroz okular se očitava manja vrijednost između kojih se nalazi crvena linija (5) i vrijednost na nonius skali (95) što daje ukupnu vrijednost 595

10. KORAK

Promjer otiska je $d = (595 - 245) \cdot 0,002 = 0,7\text{mm}$ gdje je 0,002 konstanta vezana za povećanje mikroskopa.



10. KORAK

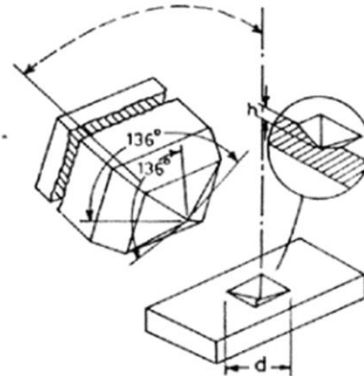
Na koncu se (za promjer otiska $d = 0,7\text{mm}$, promjer penetratora $D = 2,5\text{mm}$ i silu utiskivanja $F = 612,9\text{N} = 62,5\text{ kp}$) iz tablice određuje Brinellova tvrdoća HB:

159 HB 2,5/62,5/15

Diameter of Ball Indenter D/mm		$0.102 \times F/F^2$					
		30	15	10	5	2.5	1
		Testing Force F/N					
10	5	29420	14710	9807	4903	2452	980.7
		7355	—	2452	1226	612.9	245.2
		1839	—	612.9	306.5	153.2	61.29
		2942	—	980.7	490.3	245.2	98.07
Average Diameter of Indentation D/mm		Brinell Hardness Value HBW					
2.69	1.345	0.6725	0.269	518	259	173	86.4
2.70	1.350	0.6750	0.270	514	257	171	85.7
2.71	1.355	0.6775	0.271	510	255	170	85.1
2.72	1.360	0.6800	0.272	507	253	169	84.4
2.73	1.365	0.6825	0.273	503	251	168	83.8
2.74	1.370	0.6850	0.274	499	250	168	83.2
2.75	1.375	0.6875	0.275	495	248	165	82.6
2.76	1.380	0.6900	0.276	492	246	164	81.9
2.77	1.385	0.6925	0.277	488	244	163	81.3
2.78	1.390	0.6950	0.278	485	242	162	80.8
2.79	1.395	0.6975	0.279	481	240	161	80.2
2.80	1.400	0.7000	0.280	477	239	159	79.6
2.81	1.405	0.7025	0.281	474	237	158	79.0
2.82	1.410	0.7050	0.282	471	235	157	78.4
2.83	1.415	0.7075	0.283	467	234	156	77.9
2.84	1.420	0.7100	0.284	464	232	155	77.3
2.85	1.425	0.7125	0.285	461	230	154	76.8
2.86	1.430	0.7150	0.286	457	229	152	76.2
2.87	1.435	0.7175	0.287	454	227	151	75.7
2.88	1.440	0.7200	0.288	451	225	150	75.1
2.89	1.445	0.7225	0.289	448	224	149	74.6
2.90	1.450	0.7250	0.290	444	222	148	74.1
2.91	1.455	0.7275	0.291	441	221	147	73.6
2.92	1.460	0.7300	0.292	438	219	146	73.0
2.93	1.465	0.7325	0.293	435	218	145	72.5
2.94	1.470	0.7350	0.294	432	216	144	72.0
2.95	1.475	0.7375	0.295	429	215	143	71.5
2.96	1.480	0.7400	0.296	426	213	142	71.0
2.97	1.485	0.7425	0.297	423	212	141	70.5
2.98	1.490	0.7450	0.298	420	210	140	70.0
2.99	1.495	0.7475	0.299	417	209	139	69.5
3.00	1.500	0.7500	0.300	412	207	138	69.0
3.01	1.505	0.7525	0.301	412	206	137	68.5
3.02	1.510	0.7550	0.302	409	205	136	68.2

11.3 Ispitivanje tvrdoće po Vickersu (HV)

Metoda ispitivanja po Vickers-u koristi se za srednje tvrde i tvrde materijale. Penetrator je dijamantna četverostrana piramida s pravokutnom bazom vršnog kuta 136° . Tvrdoća HV dobije se iz omjera standardne sile F , N i površine otiska A , mm^2 četverostrane piramide (slika 11.3).



Slika 11.3 Penetrator za Vickers postupak mjerenja tvrdoće

Dakle, tvrdoća po Vickers-u je mjera otpornosti materijala prodiranju četverostrane dijamantne piramide. Predstavlja omjer standardne sile opterećenja i površine otiska četverostrane piramide:

$$HV = \frac{F}{A}$$

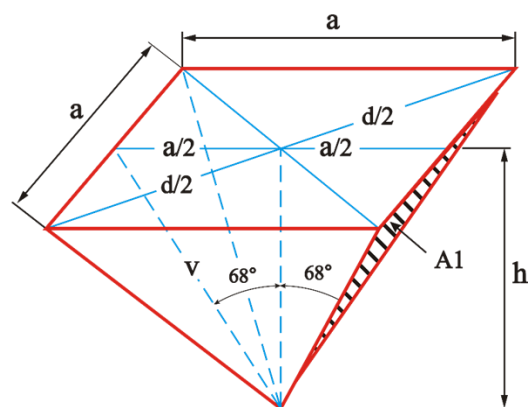
Izvod izraza za tvrdoću po Vickers-u:

Površina otiska četverostrane piramide:

$$a = \frac{d}{\sqrt{2}} \quad v = \frac{a}{2 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 68^\circ}$$

$$A_1 = \frac{a \cdot v}{2} = \frac{\frac{d}{\sqrt{2}} \cdot \frac{d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 68^\circ}}{2} = \frac{d^2}{8 \cdot \sin 68^\circ}$$

$$A = 4 \cdot A_1 = 4 \cdot \frac{d^2}{8 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ}$$



Tvrdoća po Vickersu:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot 2 \cdot \sin 68^\circ}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2}$$

Formula se prilagođava starim mjerama (sila u kilopondima):

$$HV = \frac{F \cdot 2 \cdot \sin 68^\circ}{9,81 \cdot d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

U praksi se ne vrši izračunavanje tvrdoće na temelju sile utiskivanja F i dijagonale otiska D već su u primjeni tablice koje se isporučuju uz tvrdomjer ili koje se nalaze u priručnicima – vidi tablicu 11.6 koja je primjer

Tablica 11.6 Vickers tablice HV10 (sila 98,07 N) i HV100 (sila 980,7 N)

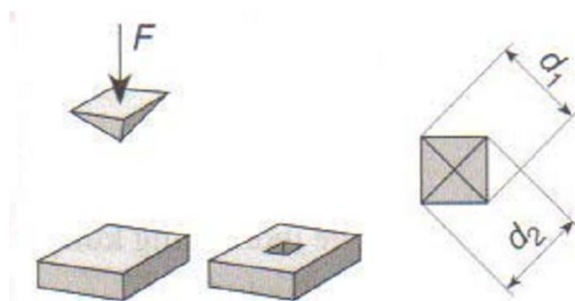
Tvrdoća po Vickersu HV 10										
pri sili pritiska $F = 98,07 \text{ N}$ ($0,102 F = 10$)										
za promjere otisaka $d = 0,100 \dots 0,549 \text{ mm}$										
$d \text{ mm}$	...0	...1	...2	...3	...4	...5	...6	...7	...8	...9
0,10	1855	1818	1782	1748	1715	1682	1651	1620	1590	1561
0,11	1533	1505	1478	1452	1427	1402	1378	1355	1332	1310
0,12	1288	1267	1246	1226	1206	1187	1168	1150	1132	1114
0,13	1097	1081	1064	1048	1033	1018	1003	988	974	960
0,14	946	933	920	907	894	882	870	858	847	835
0,15	824	813	803	792	782	772	762	752	743	734
0,16	724	715	707	698	690	681	673	665	657	649
0,17	642	634	627	620	613	606	599	592	585	579
0,18	572	566	560	554	548	542	536	530	525	519
0,19	514	508	503	498	493	488	483	478	473	468
0,20	464	459	454	450	446	441	437	433	429	425
0,21	421	417	413	409	405	401	397	394	390	387
0,22	383	380	376	373	370	366	363	360	357	354
0,23	351	348	345	342	339	336	333	330	327	325
0,24	322	319	317	314	311	309	306	304	302	299
0,25	297	294	292	290	287	285	283	281	279	276
0,26	274	272	270	268	266	264	262	260	258	256
0,27	254	253	251	249	247	245	243	242	240	238
0,28	237	235	233	232	230	228	227	225	224	222
0,29	221	219	218	216	215	213	212	210	209	207
0,30	206	205	203	202	201	199	198	197	195	194
0,31	193	192	191	189	188	187	186	185	183	182
0,32	181	180	179	178	177	176	174	173	172	171
0,33	170	169	168	167	166	165	164	163	162	161
0,34	160	159	159	158	157	156	155	154	153	152
0,35	151	151	150	149	148	147	146	146	145	144
0,36	143	142	142	141	140	139	138	138	137	136
0,37	135	135	134	133	133	132	131	130	130	129
0,38	128	128	127	126	126	125	124	124	123	123
0,39	122	121	121	120	119	119	118	118	117	116
0,40	116	115	115	114	114	113	113	112	111	111
0,41	110	110	109	109	108	108	107	107	106	106
0,42	105	105	104	104	103	103	102	102	101	101
0,43	100	99,8	99,4	98,9	98,5	98,0	97,6	97,1	96,7	96,2
0,44	95,8	95,4	94,9	94,5	94,1	93,6	93,2	92,8	92,4	92,0
0,45	91,6	91,2	90,8	90,4	90,0	89,6	89,2	88,8	88,4	88,0
0,46	87,6	87,3	86,9	86,5	86,1	85,8	85,4	85,0	84,7	84,3
0,47	84,0	83,6	83,2	82,9	82,5	82,2	81,8	81,5	81,2	80,8
0,48	80,5	80,2	79,8	79,5	79,2	78,8	78,5	78,2	77,9	77,6
0,49	77,2	76,9	76,6	76,3	76,0	75,7	75,4	75,1	74,8	74,5
0,50	74,2	73,9	73,6	73,3	73,0	72,7	72,4	72,1	71,9	71,6
0,51	71,3	71,0	70,7	70,5	70,2	69,9	69,7	69,4	69,1	68,8
0,52	68,6	68,3	68,1	67,8	67,5	67,3	67,0	66,8	66,5	66,3
0,53	66,0	65,8	65,5	65,3	65,0	64,8	64,6	64,3	64,1	63,8
0,54	63,6	63,4	63,1	62,9	62,7	62,4	62,2	62,0	61,8	61,5

Tvrdoća po Vickersu HV 100										
pri sili pritiska $F = 980,7 \text{ N}$ ($0,102 F = 100$)										
za promjere otisaka $d = 1,00 \dots 1,99 \text{ mm}$										
$d \text{ mm}$	...0	...1	...2	...3	...4	...5	...6	...7	...8	...9
1,0	185	182	178	175	171	168	165	162	159	156
1,1	153	151	148	145	143	140	138	135	133	131
1,2	129	127	125	123	121	119	117	115	113	111
1,3	110	108	106	105	103	102	100	98,8	97,4	96,0
1,4	94,6	93,3	92,0	90,7	89,4	88,2	87,0	85,8	84,7	83,5
1,5	82,4	81,3	80,3	79,2	78,2	77,2	76,2	75,2	74,3	73,4
1,6	72,4	71,5	70,7	69,8	69,0	68,1	67,3	66,5	65,7	64,9
1,7	64,2	63,4	62,7	62,0	61,3	60,6	59,9	59,2	58,5	57,9
1,8	57,2	56,6	56,0	55,4	54,8	54,2	53,6	53,0	52,5	51,9
1,9	51,4	50,8	50,3	49,8	49,3	48,8	48,3	47,8	47,3	46,8

„Strojarski priručnik – Bojan Kraut“

Zbog anizotropije materijala mjere se obje dijagonale (slika 11.4), a u tablice se ulazi s njihovom srednjom vrijednošću:

$$d = d_{sr} = \frac{d_1 + d_2}{2}$$



Slika 11.4 Shematski prikaz mjerenja Vickers tvrdoće

Opterećenje F je standardizirano i može biti različito: (5, 10, 20, 30, 50, 100) x 9,81 N, a bira se ovisno o tvrdoći ispitivanog materijala (otisak ne smije biti ni premalen ni prevelik).

Minimalne debljine ispitivanih uzoraka moraju iznositi najmanje $(1,2 \div 1,5) \cdot d$ gdje je d dijagonala otiska.

Ovim postupkom se mogu ispitivati mikrotvrdoće, ali u tom slučaju opterećenje je reda veličine 0,1 do 5 N, a dijagonale se mjere na istom aparatu pomoću povećala s ugraviranom mjernom skalom i točnošću od 0,001 mm.

Tvrdoća po Vickersu HV do vrijednosti 250 HV brojčana odgovara Brinellovoj tvrdoći, dok iznad ove vrijednosti Vickers-ova tvrdoća ima veće vrijednosti od Brinellove.

Nakon obavljenog mjerenja tvrdoća po Vickersu se obilježava prema standardu kao na primjer:

430 HV10

gdje je: 430 – iznos tvrdoće

10 – sila utiskivanja F , N $\cdot 0,102$

Trajanje opterećenja penetratora iznosi $10 \div 15$ s.

U slučaju mjerenja mikrotvrdoće potrebna je posebna priprema površine uzorka koja uključuje i poliranje, te mikroskop opremljen uređajem za mjerenje dijagonale otiska.

11.3.1 Primjer mjerenja Vickers tvrdoće

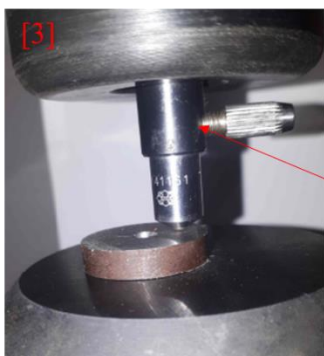
Postupak mjerenja HV tvrdoće čeličnog uzorka

1. KORAK

Podesiti silu utiskivanja [1] (za legure bakra i aluminija $F = 10$ kp, za čelike $F = 30$ kp i vrijeme tarajanja [2] $\tau = 15$ s maksimalne sile na penetrator.

2. KORAK

Učvrstiti Vickers penetrator u držač [3].



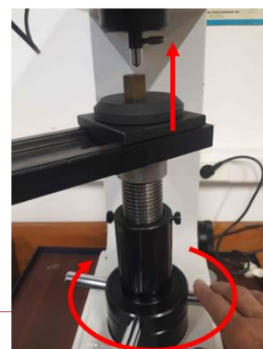
3. KORAK

Postavljanje uzorka na radni stol, podizanje radnog stola pomoću matice i navojnog vretena s uzorkom do penetratora i postavljanje uzorka u položaj za mjerenje tvrdoće



Zakretanjem matice podiže se radni stol

Zakretanjem matice, dok je penetrator u kontaktu s površinom uzorka, dolazi do zakretanja male kazaljke na mjernom instrumentu. Penetrator postiže pravilan početni položaj za početak ispitivanja kada se vrh male kazaljke poklopi s crvenom točkom.

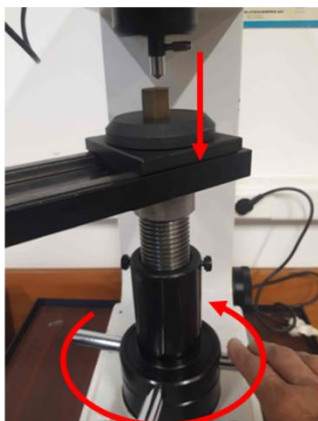


4. KORAK

Pritiskom na tipku start započinje porast sile do podešene vrijednosti i utiskivanje penetratora u površinu uzorka. Po isteku podešenog vremena trajanja utiskivanja automatski se vrši rasterećenje, te se pomoću navojnog vretena radni stol s uzorkom spušta desetak milimetara prema dolje.

5. KORAK

Radni stol se translacija pomoću klizača ispod objektiva mjernog instrumenta pomoću kojeg se mjeri promjer otiska.

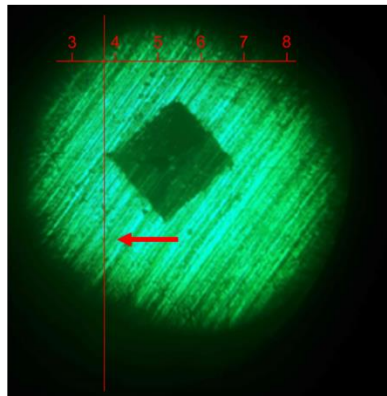


6. KORAK

Zakretanjem matice radni stol se pomiče po visini dok površina uzorka ne dođe do fokalne udaljenosti što se provjerava promatranjem kroz okular mikroskopa (oštra slika površine uzorka s vidljivim otiskom)

7. KORAK

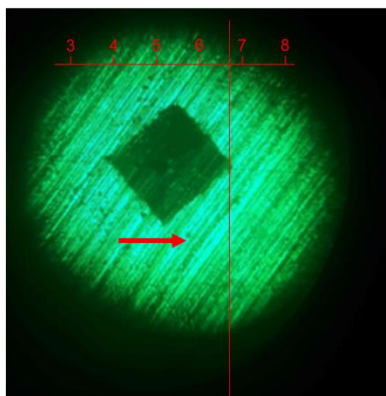
Zakretanjem kotača (noniusa – pomične mjerne ljestvice) pomiče se vertikalna mjerna linija (prikazana crveno na slici) u krajnji lijevi položaj otiska, a na mjernoj skali vidljivoj kroz okular se očitava manja vrijednost između kojih se nalazi crvena linija (3) i vrijednost na nonius skali (84) što daje ukupnu vrijednost 384

**8. KORAK**

Zakretanjem kotača (noniusa – pomične mjerne ljestvice) u suprotnu stranu pomiče se vertikalna mjerna linija (prikazana crveno na slici) u krajnji desni položaj otiska, a na mjernoj skali vidljivoj kroz okular se očitava manja vrijednost između kojih se nalazi crvena linija (6) i vrijednost na nonius skali (75) što daje ukupnu vrijednost 675

9. KORAK

Promjer otiska je $d = (675 - 384) \cdot 0,002 = 0,582\text{mm}$ gdje je 0,002 konstanta vezana za povećanje mikroskopa.



10. KORAK

Na koncu se za promjer otiska $d = 0,582\text{mm}$ iz tablice HV30 (za silu utiskivanja $F = 30\text{kp}$) određuje tvrdoća po Vickersu:

164,2 HV30

$d = 0,582\text{mm}$

$d = 0,582\text{mm}$

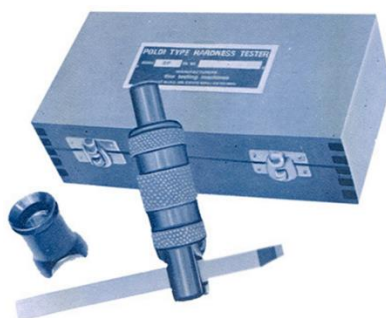
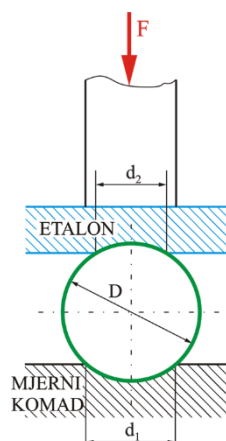
d	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.10	5003.1	5403.5	5847.1	6343.8	6903.4	7536.9	8245.1	8929.0	9689.5	10526.4
0.11	4597.8	4951.1	5343.9	5786.7	6289.4	6852.1	7484.9	8187.9	8961.0	9804.6
0.12	3803.3	3796.7	3737.8	3677.1	3616.0	3554.4	3492.1	3429.1	3365.4	3301.0
0.13	3291.8	3241.7	3192.8	3145.0	3098.2	3052.5	3007.7	2964.0	2921.2	2879.3
0.14	2838.3	2798.2	2758.9	2720.5	2682.8	2645.9	2609.8	2574.4	2539.8	2505.8
0.15	2472.5	2438.9	2407.9	2378.5	2349.7	2321.5	2293.8	2266.9	2239.5	2205.5
0.16	2173.1	2149.2	2126.9	2105.8	2085.4	2065.4	2045.8	2026.4	2007.1	1987.8
0.17	1924.9	1902.5	1880.4	1858.8	1837.5	1816.5	1795.9	1775.7	1755.8	1736.2
0.18	1717.0	1695.1	1673.5	1652.2	1631.2	1610.5	1590.0	1569.9	1549.9	1529.4
0.19	1541.0	1524.9	1509.1	1493.5	1478.1	1462.9	1448.1	1433.5	1419.0	1404.8
0.20	1380.8	1377.0	1363.4	1350.0	1336.8	1323.8	1310.9	1298.3	1285.9	1273.6
0.22	1261.5	1248.5	1235.8	1223.2	1210.8	1198.4	1186.2	1174.1	1162.1	1150.0
0.24	1148.4	1136.0	1123.8	1111.7	1100.0	1088.4	1076.9	1065.4	1054.0	1042.8
0.26	1031.6	1020.5	1009.5	998.7	988.0	977.4	966.8	956.4	946.1	935.9
0.28	965.8	957.8	949.9	942.1	934.4	926.8	919.3	911.8	904.5	897.3
0.30	890.1	883.0	876.0	869.1	862.3	855.5	848.9	842.3	835.8	829.3
0.32	822.9	816.7	810.4	804.3	798.2	792.2	786.2	780.4	774.5	768.8
0.34	760.1	754.9	749.7	744.4	739.2	734.0	728.9	723.7	718.6	713.4
0.36	708.6	704.5	699.8	694.6	689.7	684.9	680.1	675.4	670.7	666.1
0.38	661.5	656.9	652.5	648.0	643.6	639.3	634.9	630.7	626.4	622.3
0.40	618.1	614.0	610.0	605.9	602.0	598.0	594.1	590.3	586.4	582.6
0.42	578.9	575.2	571.5	567.8	564.2	560.7	557.1	553.6	550.1	546.7
0.44	543.3	539.9	536.5	533.2	529.9	526.7	523.5	520.3	517.1	514.0
0.46	510.8	507.8	504.7	501.7	498.7	495.7	492.8	489.8	486.9	484.1
0.48	481.2	478.4	475.6	472.9	470.1	467.4	464.7	462.0	459.4	456.7
0.50	454.1	451.5	449.0	446.4	443.9	441.4	438.9	436.5	434.1	431.6
0.52	429.3	426.9	424.5	422.2	419.9	417.6	415.3	413.0	410.8	408.6
0.54	406.4	404.2	402.0	399.9	397.7	395.6	393.5	391.4	389.3	387.3
0.56	386.3	383.2	381.2	379.2	377.3	375.3	373.4	371.4	369.5	367.6
0.58	366.8	363.9	362.0	360.2	358.4	356.6	354.8	353.0	351.2	349.4
0.60	347.7	346.0	344.2	342.5	340.8	339.2	337.5	335.8	334.2	332.6
0.62	330.9	329.3	327.7	326.1	324.6	323.0	321.5	319.9	318.4	316.9
0.64	314.4	313.9	312.4	310.9	309.4	308.0	306.5	305.1	303.7	302.3
0.66	300.6	299.5	298.1	296.7	295.4	294.0	292.6	291.3	290.0	288.7
0.68	287.4	286.0	284.8	283.5	282.2	280.9	279.7	278.4	277.2	275.9
0.70	274.7	273.5	272.3	271.1	269.9	268.7	267.5	266.4	265.2	264.1
0.72	262.9	261.8	260.6	259.5	258.4	257.3	256.2	255.1	254.0	252.9
0.74	251.8	250.8	249.7	248.7	247.6	246.5	245.5	244.4	243.5	242.4
0.76	241.5	240.5	239.5	238.5	237.5	236.5	235.5	234.6	233.6	232.6
0.78	231.7	230.8	229.8	228.9	227.9	227.0	226.1	225.2	224.3	223.4
0.80	222.5	221.6	220.8	219.9	219.0	218.1	217.3	216.4	215.6	214.7
0.82	213.9	213.0	212.2	211.4	210.6	209.8	209.0	208.1	207.3	206.5
0.84	208.7	208.9	208.2	207.4	206.6	205.8	205.1	204.3	203.5	202.8
0.86	198.5	198.5	197.7	196.9	196.1	195.3	194.5	193.8	193.0	192.3
0.88	188.9	188.9	188.1	187.3	186.5	185.7	185.0	184.2	183.5	182.8
0.90	183.9	183.2	182.6	181.9	181.3	180.6	180.0	179.3	178.7	178.0
0.92	177.4	176.8	176.1	175.5	174.9	174.3	173.7	173.0	172.4	171.8
0.94	173.2	172.6	172.0	171.4	170.8	170.2	169.6	169.0	168.4	167.8
0.96	168.4	167.8	167.2	166.6	166.0	165.4	164.8	164.2	163.6	163.0
0.98	159.9	159.3	158.7	158.2	157.7	157.1	156.6	156.1	155.6	155.0
1.00	154.5	154.0	153.5	153.0	152.5	152.0	151.5	151.0	150.5	150.0
1.02	149.5	149.0	148.5	148.0	147.5	147.1	146.6	146.1	145.7	145.2
1.04	144.7	144.3	143.8	143.3	142.9	142.4	142.0	141.5	141.1	140.6
1.06	140.2	139.7	139.3	138.8	138.4	138.0	137.5	137.1	136.7	136.2

11.4 Ispitivanje tvrdoće po Poldy

Poldy je usporedna metoda ispitivanja koja se temelji na ispitivanju po Brinellu. Otisak se dobije udarcem čekića po držaču kuglice preko etalona od materijala poznate tvrdoće, po ispitivanom materijalu.

Promjeri otisaka se izmjere i iz tablica očitava vrijednost tvrdoće preračunata u Brinell-e.

Unutar razumnih, jačina udarca ne utječe na rezultat mjerenja. Postoje i držači s osiguračima (slika 11.5) od zakaljenog čelika koji pucaju pod udarcem i time daju standardnu silu udarca za otisak.



Slika 11.5 Komplet za mjerenje tvrdoće Poldy metodom

Uređaj je jednostavan i prenosiv, a mjerenje se može provoditi u svim položajima. Penetrator je zakaljena čelična kuglica promjera $D=10$ mm koja se utiskuje istovremeno u površinu uzorka materijala kojem se mjeri tvrdoća s donje strane i u etalon poznate čvrstoće s gornje strane.

Ovim postupkom se zapravo mjeri tvrdoća uzorka po Brinell-u HB_{uz} uz poznatu tvrdoću etalona HB_{et} koje stoje u omjeru:

$$HB = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \Rightarrow HB_{uz} = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_{uz}^2})} \Rightarrow HB_{et} = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_{et}^2})}$$

$$\frac{HB_{uz}}{HB_{et}} = \frac{\frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_{uz}^2})}}{\frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_{et}^2})}} \Rightarrow HB_{uz} = HB_{et} \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_{et}^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_{uz}^2}}$$

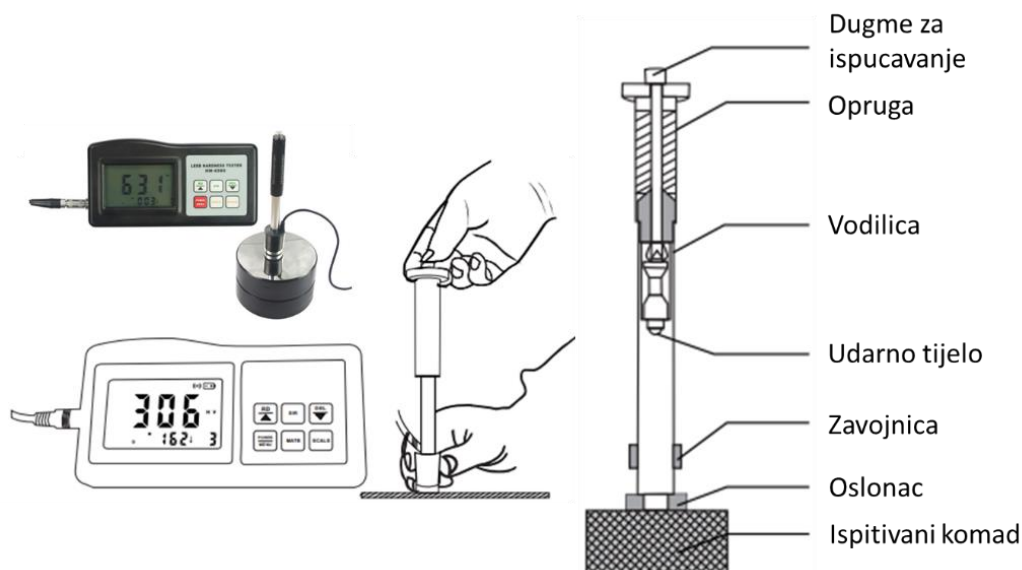
Standardni etalon ima čvrstoću $R_m = 70 \cdot 9,81 = 686.7 \text{ N/mm}^2$, tj. tvrdoću $HB_{et} = 197$. Kako svi etaloni (probni štapovi) nemaju istu čvrstoću, uveden je korekcijski faktor “f” koji je omjer stvarne i standardne čvrstoće etalona:

$$f = \frac{R_{m_{stvarni_et.}}}{R_{m_{standardni_et.}}}$$

kojim se množi vrijednost tvrdoće očitane iz tablica.

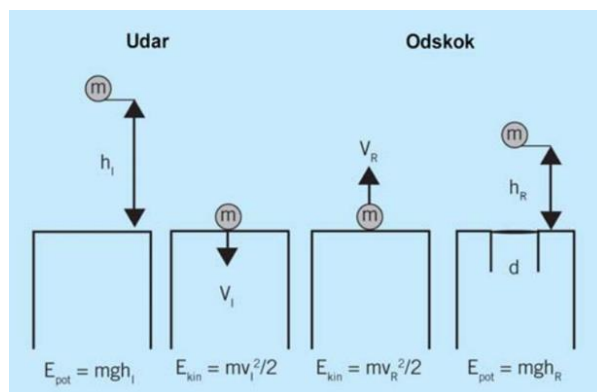
11.5 Ispitivanje tvrdoće po Leebu

Ispitivanje tvrdoće po Leebu (slika 11.6) zasniva se ispućavanju udarnog tijela (određene mase) prema ispitivanoj površini. Ovo je dinamička metoda ispitivanja. Na vrhu udarnog tijela se nalazi kuglica iz volframovog karbida.



Slika 11.6 Uređaj i princip ispitivanja po Leebu

Sudar kuglice s ispitivanom površinom uzrokuje elasto-plastične deformacije materijala zbog koje dolazi do smanjenja sadržane energije udarnog tijela. Tvrdća po Leebu se izračunava iz omjera brzine udarnog tijela u trenutku udara i povratne brzine nakon udara (slika 11.7).

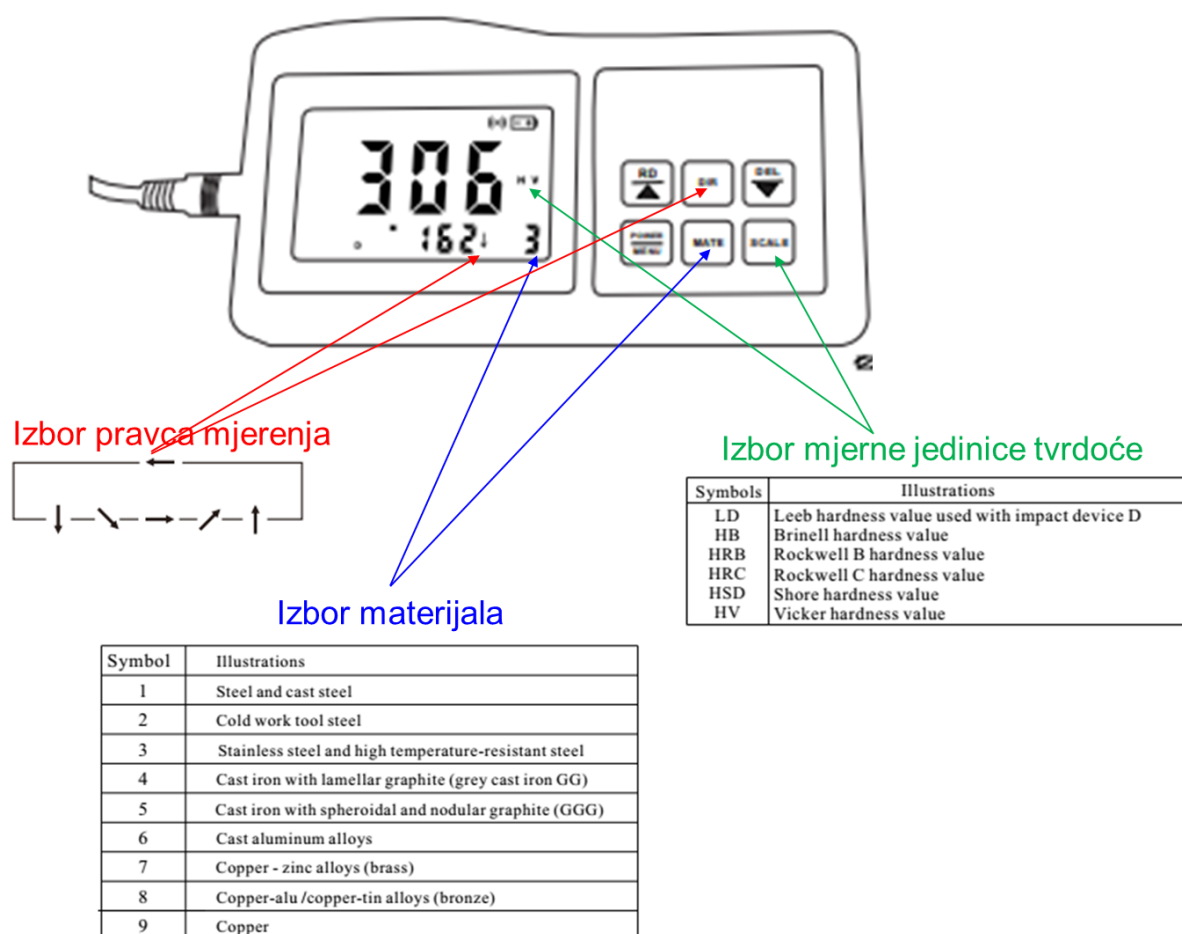


Slika 11.7 Energija udarnog tijela u različitim fazama ispitivanja

Izraz za izračunavanje tvrdće po Leebu:

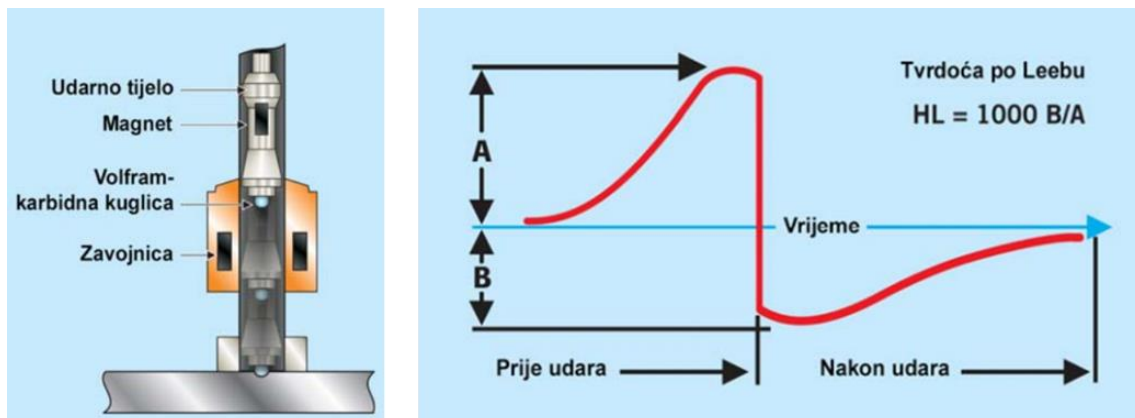
$$HL = \frac{v_R}{v_I} \cdot 1000$$

Na slici 11.8 prikazan je izgled zaslona uređaja s pojašnjenjima.



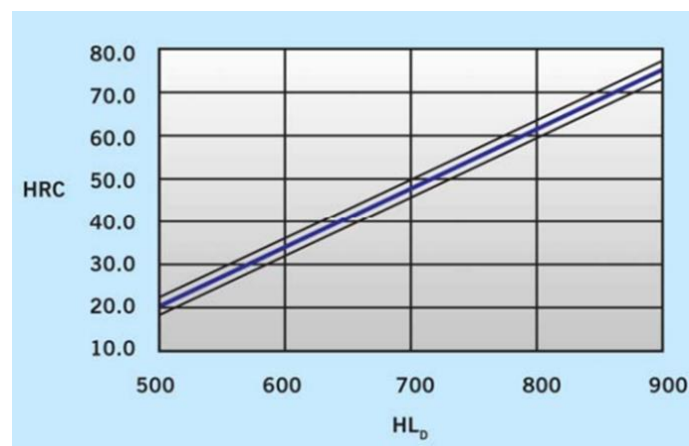
Slika 11.8 Zaslona uređaja za ispitivanja po Leebu i značenje oznaka

Brzina kuglice se prije i nakon sudara mjeri bez kontaktnom metodom (Hallow efekt). Udarno tijelo sadrži permanentni magnet koji prolaskom kroz zavojnicu generira napon proporcionalan brzini gibanja magneta (slika 11.9).



Slika 11.9 Princip ispitivanja tvrdoće po Leebu

Izmjereni omjer brzine može se pomoću uređaja pretvarati (slika 11.10) u neku od konvencionalnih jedinica tvrdoće (HV, HB, HRB, HRC ili N/mm^2). U memoriji uređaja pohranjeni su izrazi za pretvorbu.



Slika 11.10 Pretvorba Leebove tvrdoće (HL) u Rockwell C tvrdoću (HRC)

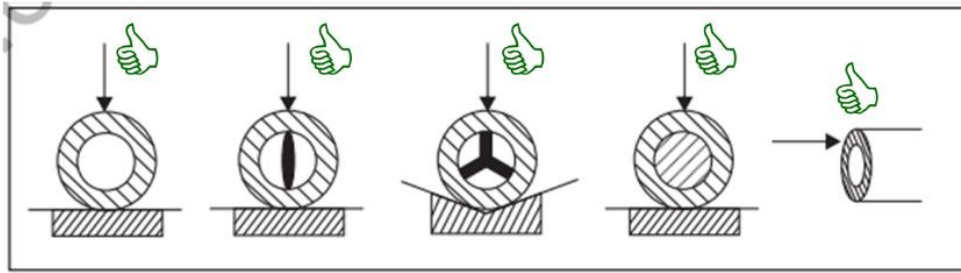
Nedostatak ove metode je veliki utjecaj Youngovog modula elastičnosti na izmjerenu tvrdoću. Dva materijala s istom „stvarnom tvrdoćom“ imaju, zbog različitih vrijednosti Youngovog modula, različite vrijednosti tvrdoće po Leebu.

Zbog navedenog ne postoji univerzalni princip pretvaranja iz Leebove tvrdoće u konvencionalne skale tvrdoće.

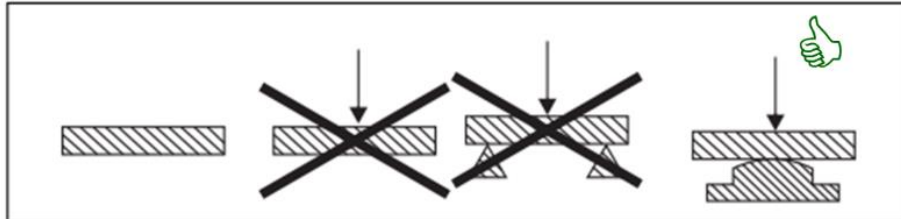
Kod suvremenih uređaja odabire se skupina kojoj ispitivani materijal pripada, a za koju su u memoriji uređaja pohranjene tablice za pretvorbu tvrdoće u konvencionalne vrijednosti.

Uz uređaj date su i preporuke za način mjerenja različitih oblika izradaka kako bi se dobili valjani rezultati (slika 11.11).

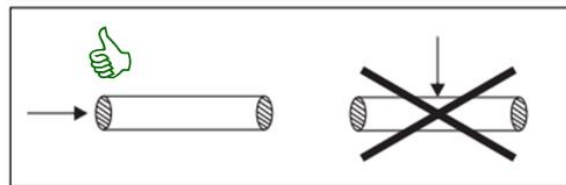
- Preporuke za ispitivanje tvrdoće cijevi:



- Preporuke za ispitivanje tvrdoće limova:



- Preporuke za ispitivanje tvrdoće dugačkih šipki:



Slika 11.11 Preporuke za način izvođenja ispitivanja tvrdoće po Leebu

Zahtjev za masom ispitnog komada i priprema za mjerenje

Da bi se postigli točni rezultati ispitivanja, ispitni komad treba biti veće debljine presjeka, težak i čvrst. Površina na kojoj udara tijela udara mora imati ravnomjernu tvrdoću.

Izratku kojem je masa veća od 5 kg, tvrdoća se može izravno mjeriti. Podržavanje izratka nije nužno.

Izradak mase od 3 do 5 kg treba biti pričvršćen za podlogu čija je masa veća od 5 kg kako bi se izbjeglo savijanje, deformacija i pomicanje tijekom ispitivanja. Izratke mase manje od 2 kg treba pričvrstiti na radni stol ili na stabilnu podlogu. Površina između radnog dijela i nosača mora biti tvrda, čista i glatka. U svrhu učvršćenja izratka dio, na površine izradaka i podloge se nanosi mast te se izradak čvrsto pritisne na podlogu. Prije samog mjerenja, pomicanjem obratka naprijed-natrag potrebno je u potpunosti ukloniti zrak između dvije površine.

12 Ispitivanje tvrdoće - Rockwell B i C postupak; Ispitivanje puzavosti materijala

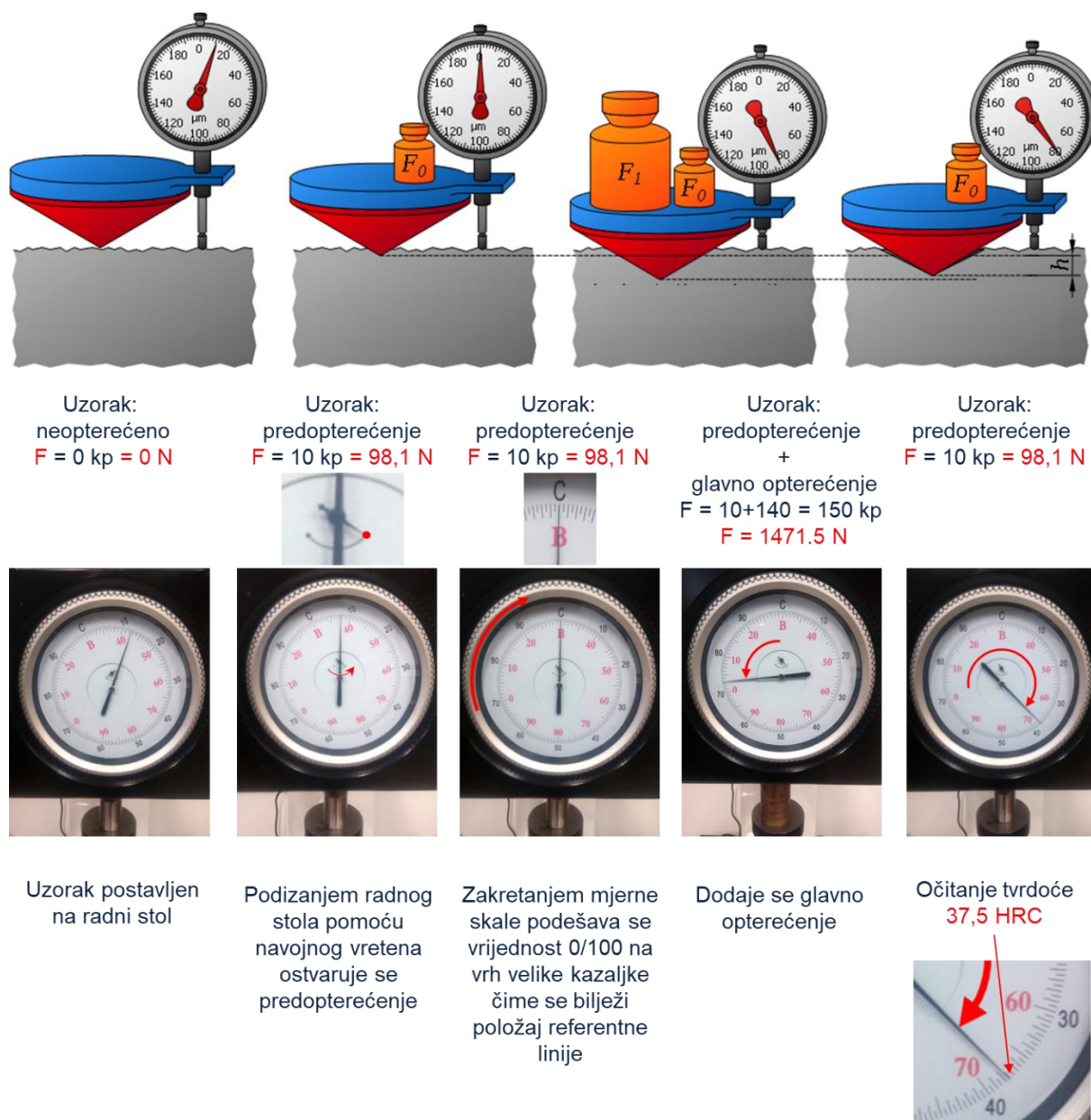
12.1 Ispitivanje tvrdoće - Rockwell C metoda (HRC)

Mjerenje tvrdoće provodi se utiskivanjem penetratora u ispitivanu površinu. Mjera za tvrdoću po Rockwell C metodi je elastični povrat penetratora nakon rasterećenja. Penetrator je dijamantni stožac vršnog kuta 120° . Da bi se izbjegle netočnosti zbog površinskih nehomogenosti penetrator se prethodno optereti silom predopterećenja $F_1 = 98,1 \text{ N}$, prema starim jedinicama 10 kp. Na slici 12.1 prikazan je univerzalni tvrdomjer s penetratorom i mjernom urom za Rockwell C postupak.



Slika 12.1 Univerzalni tvrdomjer (lijevo), geometrija penetratora (desno gore) i mjerna ura (desno dolje)

Nakon izvršenog predopterećenja na instrumentu se podešava mjerna skala na oznaku 100. Mjerna skala je duljine 0,2 mm podijeljena na 100 dijelova (vidi sliku 12.3). Utiskivanje se vrši dodavanjem standardne sile $F_2 = 1373,4 \text{ N}$, prema starim jedinicama 140 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 kp (slika 12.2). Na slici 12.3 može se pratiti položaj penetratora u odnosu na mjernu skalu u karakterističnim fazama ispitivanja.

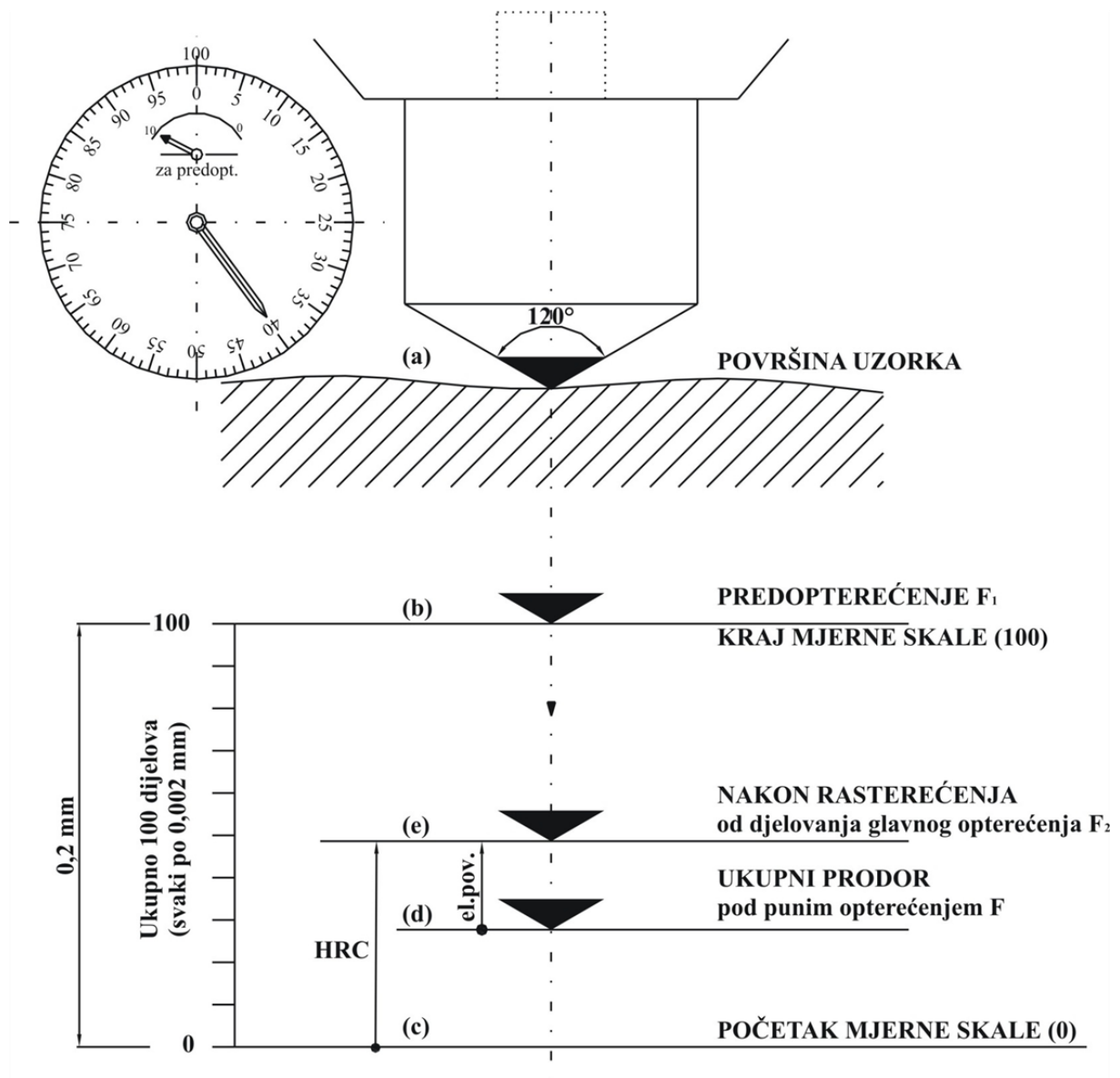


Slika 12.2 Shematski i praktični prikaz postupka ispitivanja Rockwell C metodom

Nakon rasterećenja penetratora elastični povrat vraća natrag penetrator, što se očita na skali instrumenta u jedinicama Rockwell C. Otisak Rockwell penetratora je jedva vidljiv na površini ispitivanog materijala. Oznaka tvrdoće je u jedinicama Rockwell-a, uz oznaku penetratora - HRC.

Ova metoda je pogodna za ispitivanje tvrdih metala. Oznaka metode je prema penetratoru koji se koristi za ispitivanje - HRC (od hardness - tvrdoća i cone - stožac). Područje primjene metode je za metale čija je tvrdoća od 20 do 70 HRC. Preciznost mjerenja kod radioničkih aparata iznosi $\pm 1,5 \text{ HRC}$.

U svrhu provjere valjanosti instrumenta prije mjerenja treba provesti probno mjerenje na etalonu (slika 12.4).



Slika 12.3 Položaj penetratora u različitim fazama ispitivanja Rockwell C metodom



Slika 12.4 Etaloni za kontrolna mjerenja

12.1.1 Primjer postupka mjerenja HRC tvrdoće uzorka alatnog čelika

Postupak mjerenja HRC tvrdoće uzorka alatnog čelika

1. KORAK

Postavljanje penetratora (dijamantni stožac [1]), podešavanje sile utiskivanja [2] $F = 1471.5 \text{ N} = 150 \text{ kp}$ i vremena trajanja [3] glavnog opterećenja $\tau = 10 \text{ s}$ (za tvrde materijale može se birati kraće vrijeme).



Montaža penetratora



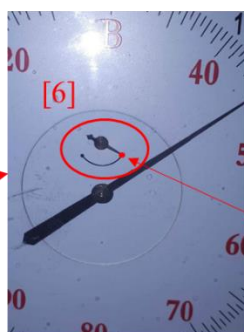
Podešavanje sile utiskivanja



Podešavanje vremena trajanja maksimalne sile

2. KORAK

Postavljanje uzorka na radni stol [4], podizanje radnog stola pomoću matice i navojnog vretena [5] s uzorkom do penetratora i postavljanje uzorka u položaj za mjerenje tvrdoće.



Zakretanjem matice (dok je penetrator u kontaktu s površinom uzorka) dodaje se predopterećenje $F_0 = 98,1 \text{ N} = 10 \text{ kp}$. Predopterećenje se dostiže kada se mala kazaljka na mjernom instrumentu preklopi s crvenom točkom [6].



Zakretanjem matice navojnog vretena podiže se radni stol



3. KORAK

Zakretanjem mjerne skale [7] podešava se vrijednost 0/100 (označeno velikim slovom „C”) na vrh velike kazaljke čime se bilježi (memorira) točan položaj referentne linije. Mjerna skala je duljine 0,2 mm (100 podjela).

4. KORAK

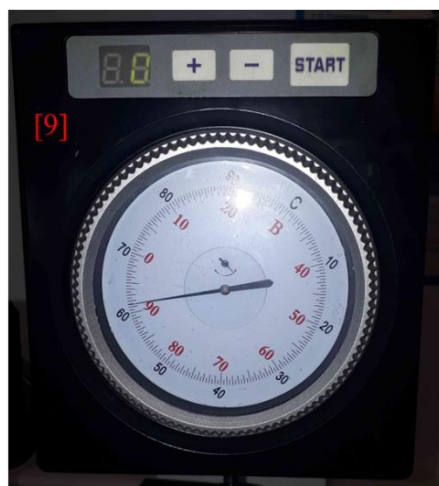
Pritiskom na tipku „START” [8] automatski se dodaje se glavno opterećenje $F_{uk} = 10 + 140 = 150 \text{ kp} = 1471.5 \text{ N}$



5. KORAK

Po isteku podešenog vremena trajanja glavnog opterećenja vrši se automatsko rasterećenje. Velika kazaljka na mjernom instrumentu pokazuje vrijednost odmjerene tvrdoće 61,5 HRC [9] na odgovarajućoj mjernoj skali (brojčane vrijednosti crne boje).

Nakon očitavanja, zakretanjem matice navojnog vretena spušta se radni stol [10].

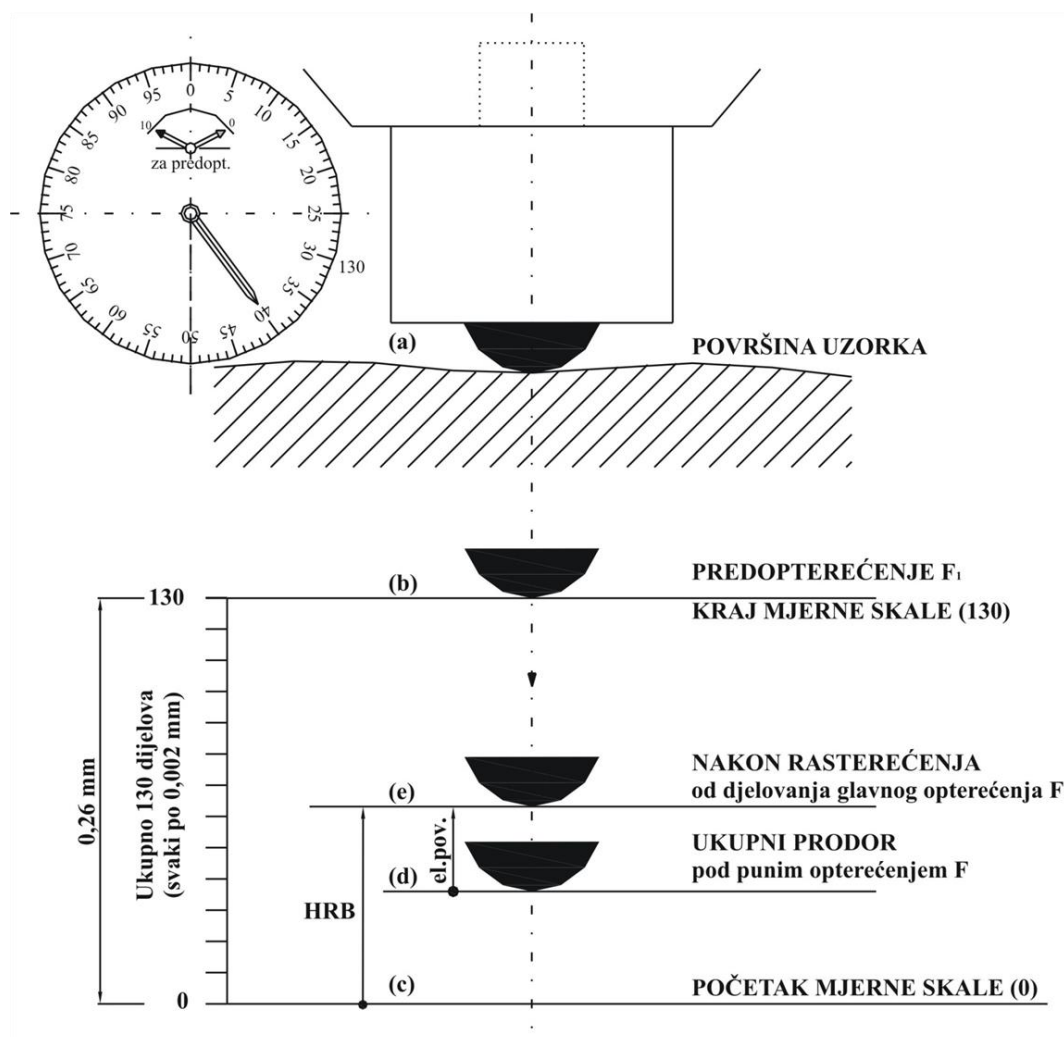


12.2 Ispitivanje tvrdoće - Rockwell B metoda (HRB)

Mjerenje tvrdoće se također provodi utiskivanjem penetratora u ispitivanu površinu. Metoda je analogna metodi ispitivanja tvrdoće po Rockwellu C. Penetrator je zakaljena čelična kuglica $\varnothing 1/16''$. Sila predopterećenja ostaje ista kao i u Rockwell C metodi $F_1 = 98,1 \text{ N}$. Ispitivanje se provodi na istom instrumentu postavljanjem odgovarajućeg penetratora.

Glavno opterećenje sada iznosi $882,9 \text{ N}$, ukupna sila je 981 N . Mjerna skala je duljine $0,26 \text{ mm}$, podijeljena na 130 dijelova (slika 12.5) što omogućuje korištenje istog već ugrađenog komparatora na aparatu za mjerenje.

Nakon rasterećenja penetratora elastični povrat vraća natrag penetrator, što se očita na skali instrumenta u jedinicama Rockwella. Ova metoda primjenjuje se za sve srednje tvrde metalne materijale čija je tvrdoća od 35 HRB do 130 HRB. Preciznost mjerenja kod radioničkih aparata iznosi $\pm 2 \text{ HRB}$. Na slici 12.5 može se pratiti položaj penetratora u odnosu na mjernu skalu u karakterističnim fazama ispitivanja.



Slika 12.5 Položaj penetratora u različitim fazama ispitivanja Rockwell B metodom

12.2.1 Primjer postupka mjerenja HRB tvrdoće uzorka nelegiranog čelika

Postupak mjerenja HRB tvrdoće uzorka iz nelegiranog čelika

1. KORAK

Postavljanje penetratora (zakaljena čelična kuglica promjera $\frac{1}{16}$ '' tj. 1,57 mm [1]), podešavanje sile utiskivanja [2] $F = 981 \text{ N} = 100 \text{ kp}$ i vremena trajanja [3] glavnog opterećenja $\tau = 15 \text{ s}$.



Montaža penetratora



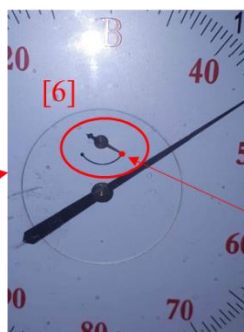
Podešavanje sile utiskivanja



Podešavanje vremena trajanja maksimalne sile

2. KORAK

Postavljanje uzorka na radni stol [4], podizanje radnog stola pomoću matice i navojnog vretena [5] s uzorkom do penetratora i postavljanje uzorka u položaj za mjerenje tvrdoće.



Zakretanjem matice (dok je penetrator u kontaktu s površinom uzorka) dodaje se predopterećenje $F_0 = 98,1 \text{ N} = 10 \text{ kp}$. Predopterećenje se dostiže kada se mala kazaljka na mjernom instrumentu preklopi s crvenom točkom [6].



Zakretanjem matice navojnog vretena podiže se radni stol



3. KORAK

Zakretanjem mjerne skale [7] podešava se vrijednost 0/100 (označeno velikim slovom „B”) na vrh velike kazaljke čime se bilježi (memorira) točan položaj referentne linije. Mjerna skala je duljine 0,26 mm (130 podjela).

4. KORAK

Pritiskom na tipku „START” [8] automatski se dodaje se glavno opterećenje $F_{uk} = 10 + 90 = 100 \text{ kp} = 981 \text{ N}$



5. KORAK

Po isteku podešenog vremena trajanja glavnog opterećenja vrši se automatsko rasterećenje. Velika kazaljka na mjernom instrumentu pokazuje vrijednost odmjerene tvrdoće 84 HRB [9] na odgovarajućoj mjernoj skali (brojčane vrijednosti crne boje).

Nakon očitavanja, zakretanjem matice navojnog vretena spušta se radni stol [9].



U slučaju kada je potrebno ispitivanja tvrdoće Rockwell postupkom zaobljenih ploha (konveksnih) izmjerena tvrdoća ne odgovara stvarnoj, pa je potrebno izvršiti korekciju prema podacima u tablici.

Tablica 12.1 Podaci za korekciju odmjerene tvrdoće na zaobljenim plohama (Strojarski priručnik – Bojan Kraut)

Isppravljene vrijednosti tvrdoće po Rockwellu pri ispitivanju tvrdoće na valjkastim (konveksnim) plohama promjera d

HR...	d (mm)			HR...	d (mm)		
	10	16	25		10	16	25
HRC				HRB			
HRA				HRF			
				HRG			
20	–	22,5	21,5	30	–	34,5	32,5
30	–	32,0	31,0	40	–	44,0	42,5
40	42,5	41,5	41,0	50	–	53,5	52,0
50	52,0	51,0	50,5	60	65,0	63,0	62,0
60	61,0	60,5	60,5	70	74,0	72,5	71,5
70	71,0	70,5	70,5	80	83,5	82,0	81,5
80	80,5	80,5	80,0	90	93,0	91,5	91,0
90	90,0	90,0	90,0	100	102,5	101,5	100,5
HRN				HRT			
20	22,0	21,5	21,5	20	–	–	22,0
30	32,0	31,5	31,0	30	–	–	32,0
40	41,5	41,0	41,0	40	–	43,0	42,0
50	51,5	51,0	50,5	50	–	52,5	51,5
60	61,0	61,0	60,5	60	63,0	62,0	61,5
70	71,0	70,5	70,5	70	72,5	71,5	71,0
80	80,5	80,5	80,0	80	81,5	81,0	80,5
90	90,0	90,0	90,0	90	91,0	90,5	90,5

Usporedna tablica za pretvorbu tvrdoća prema različitim metodama kao i odgovarajuća čvrstoća može se vidjeti na slici 12.6.

Tvrdoća po				Čvrstoća čelika u N/mm ²		
Brinellu HB	Vickersu HV	Rockwellu		C	Cr	Cr-Ni
		HRB	HRC			
	1175		70	2720	2640	2560
	1085		68	2680	2610	2530
	1000		66	2560	2490	2420
	930		64	2460	2390	2320
	845		62	2350	2290	2220
	790		60	2260	2200	2130
	735		58	2160	2100	2040
	692		57	2080	2020	1970
	645		55	2000	1940	1880
	608		53	1920	1870	1820
	575		52	1850	1800	1750
	546		50	1780	1730	1680
	520		49	1720	1670	1620
	496		47	1660	1610	1570
	473		46	1600	1550	1510
	454		45	1550	1510	1460
	437	115	44	1490	1450	1410
	420	114	42	1440	1400	1360
400	404	114	41	1400	1360	1320
388				1350	1310	1280
375	389	113	40			
	375	113	38	1310	1270	1240
363				1270	1220	1200
352	363	112	37	1220	1190	1160
341	350	111	36	1190	1160	1130
330	339	111	35	1160	1120	1090
	327	110	34	1120	1090	1060
321				1090	1060	1030
311	316	109	33	1060	1030	990
302	305	108	32	1040	1000	970
293	296	107	31	1000	970	940
	287	107	30	970	940	920
285				940	920	890
277	279	106	29	920	890	870
269	270	105	28	890	870	840
262	263	104	26	870	840	820
	256	103	25	850	820	800
255				820	800	780
248	248	102	24	800	780	760
241	241	101	23	780	760	740
235	235	100	22	760	740	720
	229	99	21			
229						
223	223	98	20			
217	217	97	19			
212	212	96	18			

Tvrdoća po				Čvrstoća čelika u N/mm ²		
Brinellu HB	Vickersu HV	Rockwellu		C	Cr	Cr-Ni
		HRB	HRC			
	207		95	750	730	700
	201		94	720	700	680
	197		93	710	690	670
	192		92	690	670	650
	187		91	670	660	640
	183		90	660	640	620
	179		89	640	630	610
	174		88	630	610	590
	170		87	610	600	580
	167		86	600	580	560
	163		85	590	570	550
	159		84	570	560	540
	156		83	560	550	530
	152		82	550	530	520
	149		81	540	520	510
	146		80	530	510	500
	143		79	520	500	490
	140		78	500	490	480
	137		77	490	480	470
	133		76	480	470	460
	131		75	470	460	450
	128		74	460	450	440
	126		73	450	440	430
	123		72	440	430	420
	121		71	440	420	410
	118		69	430	410	400
	116		68	420	410	390
	114		67	410	400	390
	111		65	400	390	380
	109		64	390	380	370
	107		62	390	380	360
	105		61	380	370	360
	103		59	370		
	101		58	360		
	99		56	360		
	97		54	350		
	95		52	340		
	92			330		
	89			320		
	86			310		

Slika 12.6 Približan odnos različitih mjera tvrdoće i čvrstoće čelika

12.3 Ispitivanje puzavosti materijala

Puzanje je pojava jako spore i kontinuirane deformacije koja se događa s vremenom na povišenim temperaturama:

$$\varepsilon = f(\sigma, \tau, t)$$

Na nižim temperaturama ne dolazi do ove pojave pa vrijedi:

$$\varepsilon = f(\sigma)$$

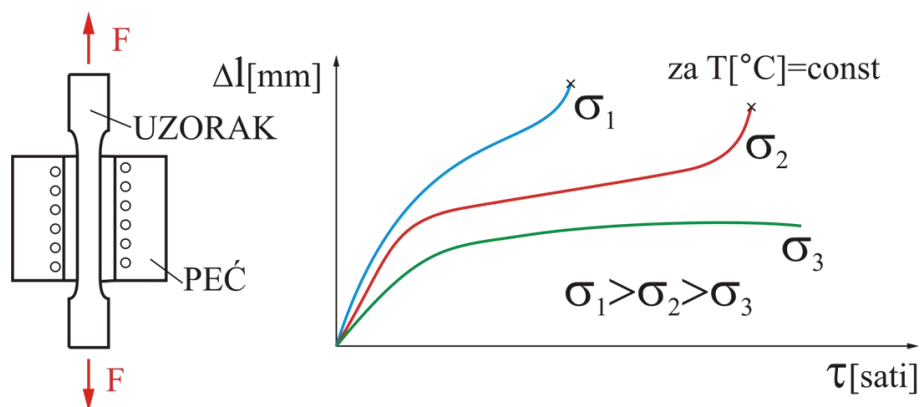
Za metale vrijedi pravilo da puzanje započinje iznad temperature $0,3 \div 0,4 \cdot T_m$ (gdje je T_m temperatura tališta metala u °K).

Kod keramika puzanje započinje iznad temperature $0,4 \div 0,5 \cdot T_m$.

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:

- veličina 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. Princip ispitivanja prikazan je na slici 12.7.



Slika 12.7 Princip ispitivanja puzavosti materijala (lijevo) i krivulje puzanja (desno)

Uzorak materijala je vlačno opterećen konstantnom silom. Uzorak je smješten u peći i grije se na potrebnu temperaturu. Mjeri se deformacija u funkciji vremena. Ispituje se više uzoraka (na više uređaja) pri različitim temperaturama i opterećenjima.

Bitan činilac procesa puzanja su difuzijski procesi u materijalu pod opterećenjem, gdje dodatno mehaničko naprezanje daje dopunsku energiju za strukturne promjene.

Prilikom ispitivanja puzavosti materijala ističu se tri karakteristične faze (slika 12.8):

I početna faza: prijelazno (primarno) puzanje

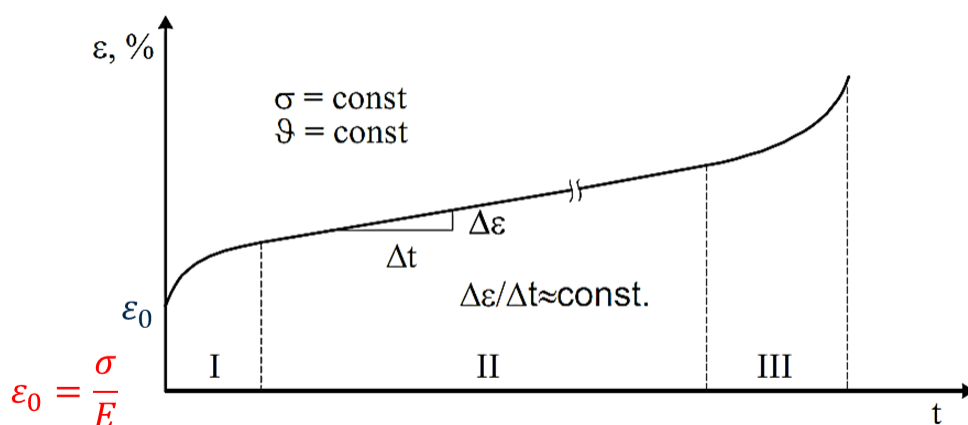
U prvom stadiju krivulja ne počinje iz ishodišta dijagrama budući da je deformacija nastala istog trenutka kad je ispitni uzorak opterećen. Prvi stadij karakterizira u početku povećana i promjenljiva brzina puzanja $\Delta\epsilon/\Delta t$ (nelinearan odnos).

II faza puzanja: stabilno (sekundarno) puzanje (konstantna brzina)

Konstantna brzina puzanja $\Delta\epsilon/\Delta t = \text{konst.}$ Nagib "pravca" govori o otpornosti materijala prema puzanju. Što je strmiji sklonost puzanju je veća. Ukoliko je paralelan s osi apscisa ($\Delta\epsilon/\Delta t = 0$!) onda je materijal potpuno otporan na puzanje.

III faza puzanja: tercijarno puzanje

Završni je stadij gdje se brzina puzanja povećava i ne postoji linearna ovisnost između istežanja i vremena. Završni stadij završava sa lomom epruvete.



Slika 12.8 Dijagram puzanja s označenim karakterističnim fazama

Proces puzanja je izazivan nastankom vakancija u materijalu, koje se vremenom umnažaju do nastanka mikropukotina, a zatim i do većih pukotina. U završnom stadiju puzanja ima toliko vakancija da rastezljivost materijala pada, i to nepovratno.

Dijelovi podvrgnuti puzanju dimenzioniraju se na način da se izazovu samo dopuštena odstupanja dimenzija za vrijeme trajanja konstrukcije. Za konstrukcije koje su izložene naprežanjima na temperaturama višim od 200 °C, veća se važnost pridaje puzavosti materijala nego granici plastičnosti R_p ili čvrstoći materijala R_m .

Kao mjera otpornosti materijala puzanju uveden je pojam **granica puzavosti** $R_{p \epsilon|t|\theta}$.

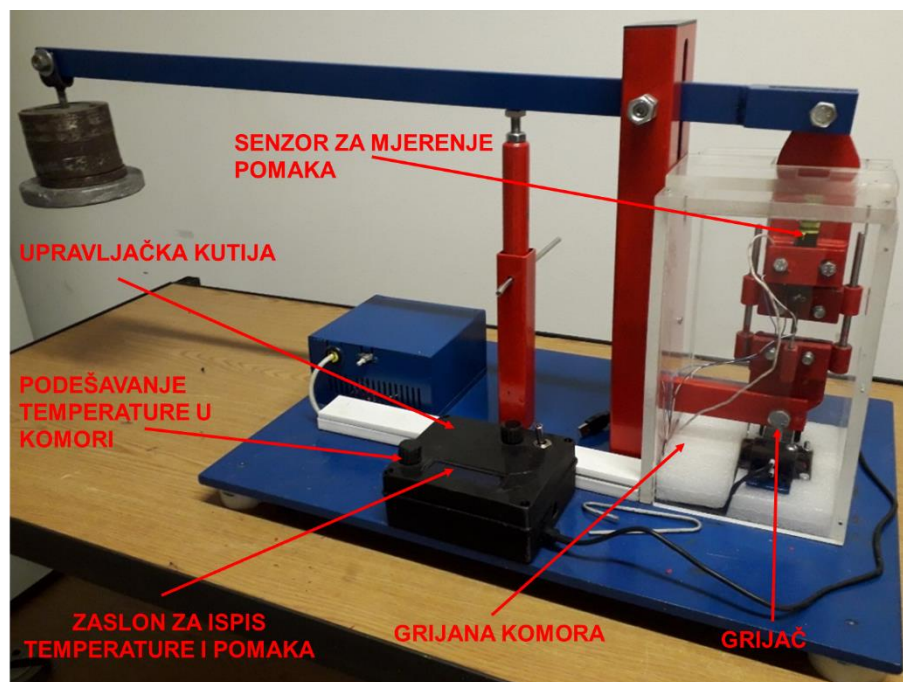
Granica puzanja $R_{p \epsilon|t|\theta}$ jest ono naprežanje pri kojem materijal dosegne određenu deformaciju „ ϵ “ za određeno vrijeme „ t “ i pri određenoj temperaturi „ θ “.

Primjer: $R_{p 2|100000|500}$ jest ono naprežanje koje je nakon 100.000 h ispitivanja pri temperaturi 500 °C rezultiralo trajnom deformacijom od 2%.

Trajna statička čvrstoća ili statička izdržljivost $R_{m|t|\vartheta}$ jest ono naprezanje koje će uzrokovati lom materijala nakon izlaganja opterećenju u trajanju od „ t ” sati pri temperaturi „ ϑ ”.
Primjer: $R_{m|100000|500}$ - to je naprezanje koje je nakon 100.000 h ispitivanja pri temperaturi 500°C rezultirati lomom materijala.

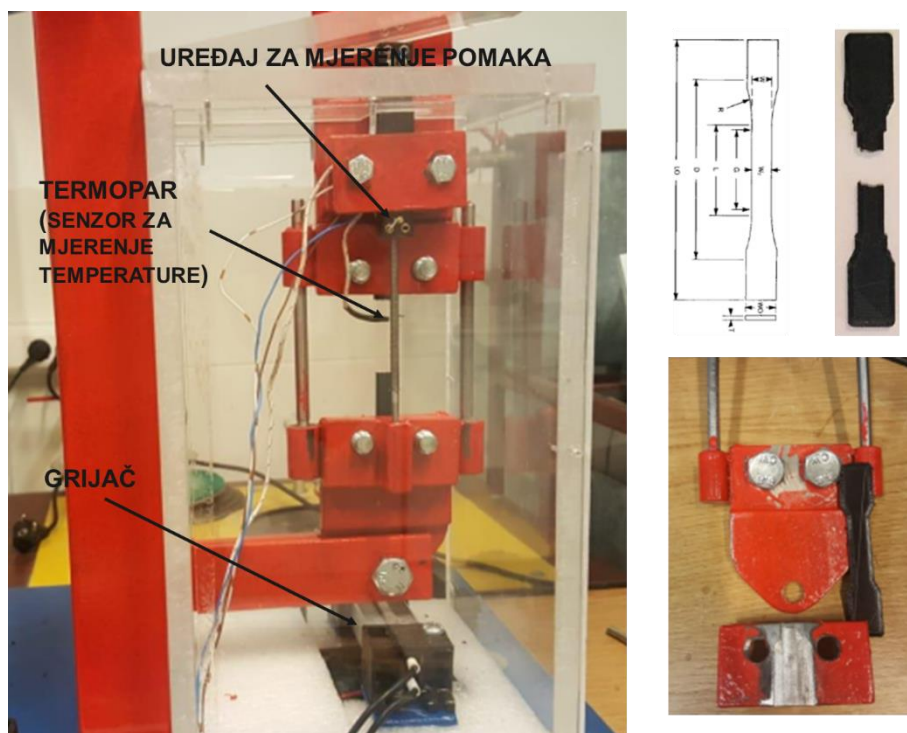
Kod manje odgovornih konstrukcija (npr. dijelovi peći), mogu se dozvoliti relativno velike deformacije. Kod odgovornih konstrukcija (lopaticice plinskih turbina - 500°C, mlaznih motora - 900°C) može se dozvoliti samo vrlo mala puzavost (deformacija) kako bi se izbjegao lom.

Na slici 12.9 prikazan je laboratorijski uređaj za mjerenje puzavosti polimernih materijala s označenim najvažnijim dijelovima.



Slika 12.9 Uređaj za ispitivanje puzavosti polimernih materijala

Oblici i dimenzije epruveta definirani su odgovarajućim standardima za različite klase materijala. Na lijevom dijelu slike 12.10 može se vidjeti stezna čeljust s epruvetom nakon njezinog loma, dok je na desnom dijelu slike prikazan dizajn epruvete i epruveta nakon demontaže iz steznih čeljusti.

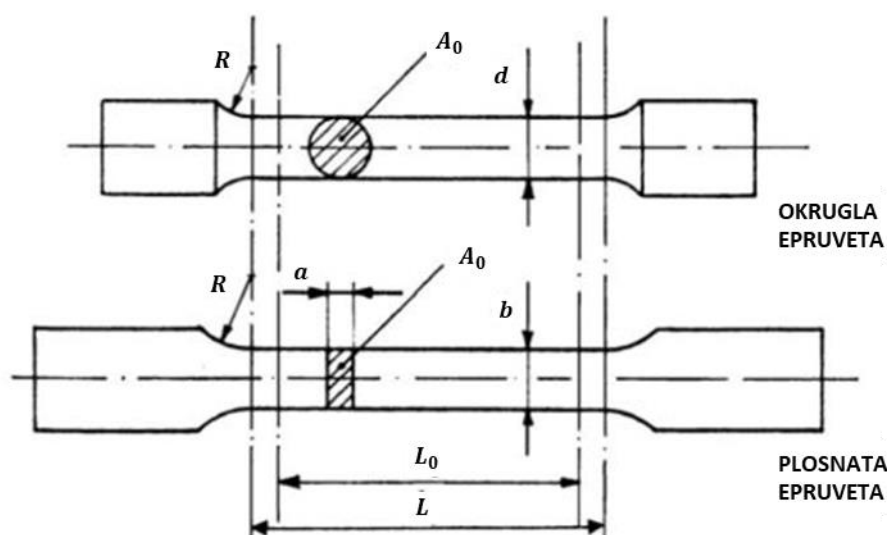


Slika 12.10 Dizajn epruvete za ispitivanje puzavosti

13 VLAČNA PROBA

Vlačna proba je standardizirani pokus kojim se određuje prvenstveno čvrstoća materijala. Čvrstoća materijala je mjera otpora plastičnoj (trajnoj) deformaciji kod rastezljivih, odnosno raskidu/lomu kod krutih materijala pod djelovanjem narinute sile.

Najčešće se ispituje rastezna ili vlačna čvrstoća, tj. opiranje materijala rastezanju. Tlačna i savojna čvrstoća se u strojarstvu rjeđe koriste, jer su u pravilu veće ili jednake rasteznoj čvrstoći. Rastezna čvrstoća materijala mjeri se na uzorcima (epruvetama) izrađenim iz ispitivanog materijala (slika 13.1). Treba uočiti razliku između mjerne duljine epruvete L_0 i ukupne duljine suženog dijela L . Epruvete su okruglog ili pravokutnog presjeka sa zadebljanim završecima. Dimenzije epruveta (okrugle ili plosnate) su standardizirane.



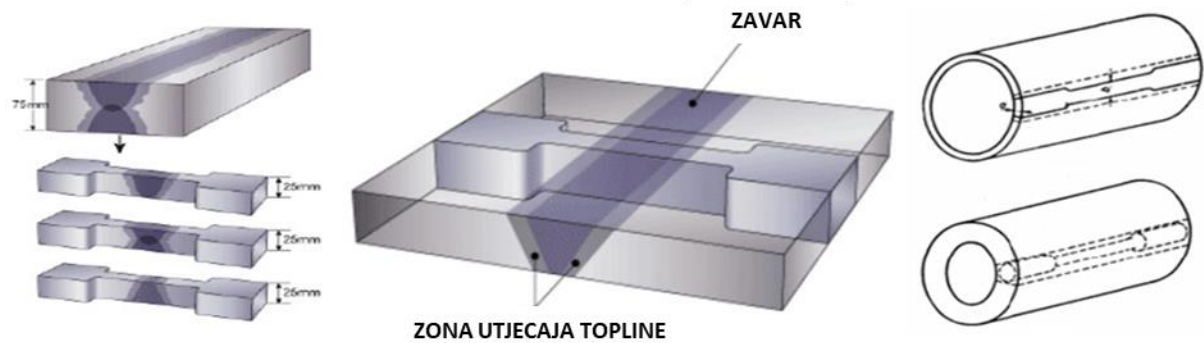
Slika 13.1 Epruvete za vlačnu probu

Dimenzije epruveta prema standardu mogu se odrediti korištenjem podataka u tablici 13.1.

Tablica 13.1 Dimenzije presjeka i mjerne duljine različitih tipova epruveta za vlačnu probu

Tip ispitnog uzorka	Dimenzije presjeka d_0 , ili a_0 , b_0 , mm	Početni presjek S_0 , mm ²	Mjerna duljina L_0 , mm
Normalni	20	314	200
Prporcionalni, dugi	d_0	S_0	$10 d_0$
Prporcionalni, kratki	d_0	S_0	$5 d_0$
Plosnati prporcionalni, dugi	a_0 , b_0	S_0	$11,3\sqrt{S_0}$
Plosnati prporcionalni, kratki	a_0 , b_0	S_0	$5,65\sqrt{S_0}$

Standardi po kojima se izvodi vlačni pokus pri sobnoj temperaturi su: HRN C.A4.001, HRN C.A4.002 i HRN EN 10002-1. Primjeri načina uzimanja epruveta iz komada kojima se želi odrediti čvrstoća i rastezljivost prikazani su na slici 13.2.



Slika 13.2 Način uzimanja uzoraka za vlačnu probu

Na slici 13.3 prikazano je nekoliko standardnih epruveta za vlačnu probu.



Slika 13.3 Standardne epruvete za vlačnu probu

Prijelaz iz zadebljanog dijela u tanji dio je blag, kako bi se postigao prijelom unutar tanjeg, središnjeg dijela. Brzina kidanja je mala, pa se ovo rastezanje može smatrati kvazistatičkim opterećenjem. Za vrijeme ispitivanja mjeri se veličina sile F , N i pripadno produljenje uzorka Δl , mm na mjernoj bazi označenoj u srednjem dijelu epruvete. Rezultati mjerenja bilježe se tijekom rastezanja u **dijagramu sila – produljenje**.

Naprezanje epruvete (nominalno) je kvocijent sile i početne površine poprečnog presjeka A_0 :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Standardom je utvrđeno da se kod računanja naprezanja ne uzima u obzir smanjenje poprečnog presjeka epruvete tako da su stvarna naprezanja epruvete veća od standardnih.

Deformacija epruvete se računa pomoću izraza:

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

gdje je: ε , % – deformacija za vrijeme provođenja ispitivanja

l , mm – mjerna duljina za vrijeme provođenja ispitivanja

l_0 , mm – početna mjerna duljina

Δl , mm – produljenje za vrijeme provođenja ispitivanja

Nakon prekida odmjeri se ukupno produljenje epruvete na mjernoj bazi i odredi rastezljivost (elongacija) ispitnog materijala A_5 (za proporcionalno kratke epruvete) ili A_{10} (za proporcionalno duge epruvete):

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

gdje je: Δl_k , mm – konačno produljenje (nakon loma)

l_0 , mm – početna mjerna duljina

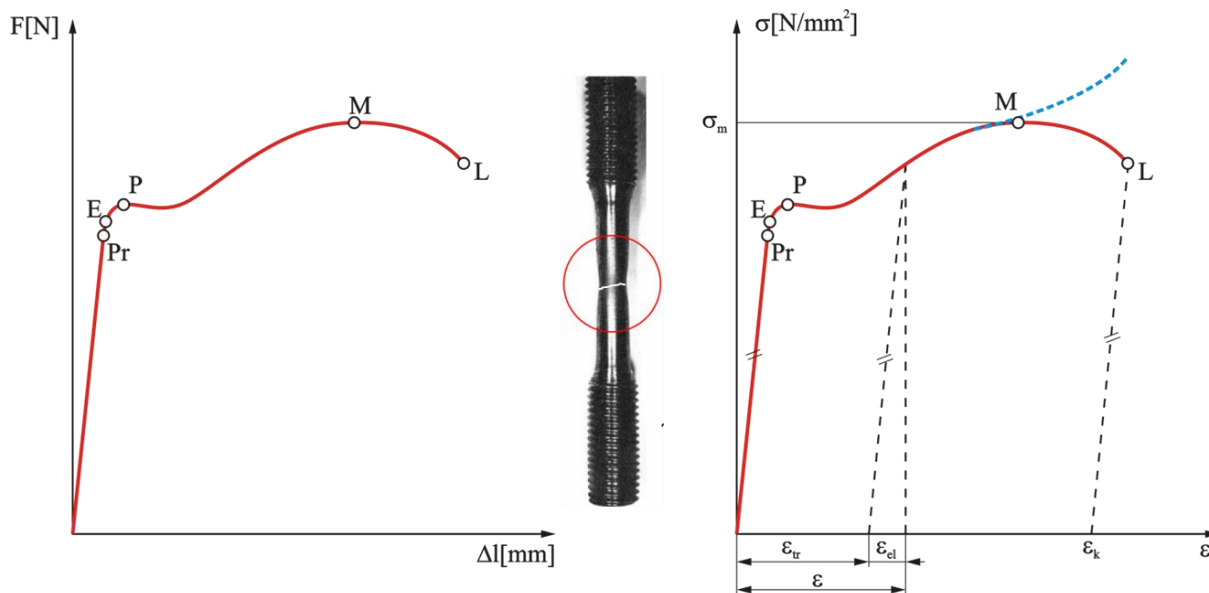
A_5 (ili A_{10}), % – rastezljivost proporcionalne epruvete

Rastezna čvrstoća dobiva se kao omjer maksimalne sile postignute kod rastezanja i početne površine poprečnog presjeka epruvete A_0 , te se označava s R_m :

$$R_m = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{ MPa}$$

Stvarna čvrstoća materijala je veća od ovako procijenjene, jer kod rastezanja dolazi do smanjenja poprečnog presjeka zbog produljenja epruvete, tako da je presjek na mjestu prijeloma $A_{\min} < A_0$.

Hookeov dijagram koji je rezultat provedene vlačne probe može se vidjeti na slici 13.4. Na lijevom dijelu slike osi dijagrama su produljenje Δl (apscisa) i sila F (ordinata), dok je na desnom dijelu slike prikazan Hookeov dijagram kojemu je os apscisa deformacija ε , a os ordinata naprezanje σ . Obzirom da su sila i naprezanje proporcionalni, a isto tako i produljenje i deformacija, dijagrami imaju iste oblike.



Slika 13.4 Hookeov dijagram i izgled okrugle epruvete nakon loma

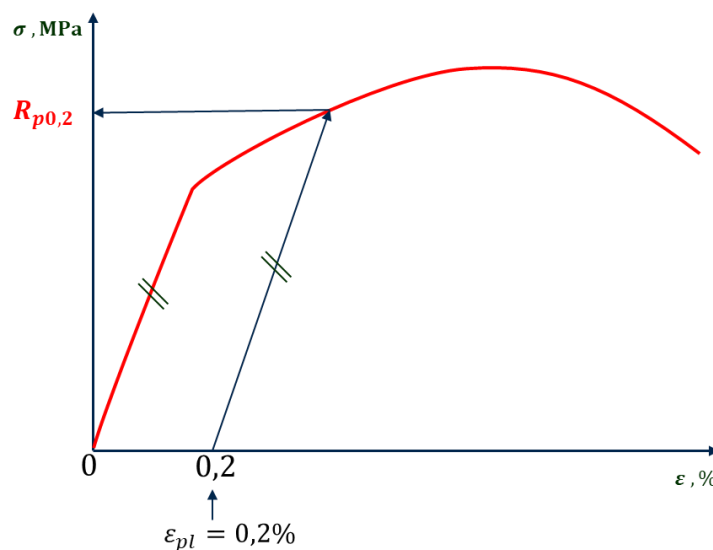
Na slici se može, u središnjem dijelu, uočiti okrugla epruveta nakon loma i karakteristični suženi dio koji se se počinje pojavljivati za vrijeme ispitivanja nakon dostizanja vrijednosti maksimalne sile (naprezanja).

U dijagramu na slici 13.4 se može uočiti nekoliko karakterističnih točaka:

- **Granica proporcionalnosti (P_r)** – je najveće opterećenje kod kojega su naprezanje i deformacija proporcionalni (linearni dio dijagrama i za njega vrijedi Hookeov zakon: gdje je: - Youngov modul elastičnosti N/mm^2)
- **Granica elastičnosti (E)** – predstavlja najveće naprezanje kod kojega nakon rasterećenja neće doći do trajne deformacije.
- **Granica plastičnosti ili granica popuštanja ili granica tečenja (P)** – to je ono naprezanje kod kojeg započinje intenzivnije produljenje epruvete - tečenje materijala (bez znatnijeg porasta naprezanja). Kod metala, to je naprezanje kod kojega dolazi do klizanja dislokacija.
- **Vlačna čvrstoća (granica razvlačenja) (M)** – jest maksimalan iznos kvocijenta maksimalne sile i početne površine poprečnog presjeka epruvete.

Za materijale koji nemaju izraženu granicu plastičnosti, uzima se **konvencionalna granica plastičnosti $R_{p0,2}$** (vidi sliku 13.5) koja predstavlja naprezanje pri kojem trajna deformacija iznosi 0,2% nakon rasterećenja epruvete:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{A_0} \quad \frac{N}{mm^2}$$



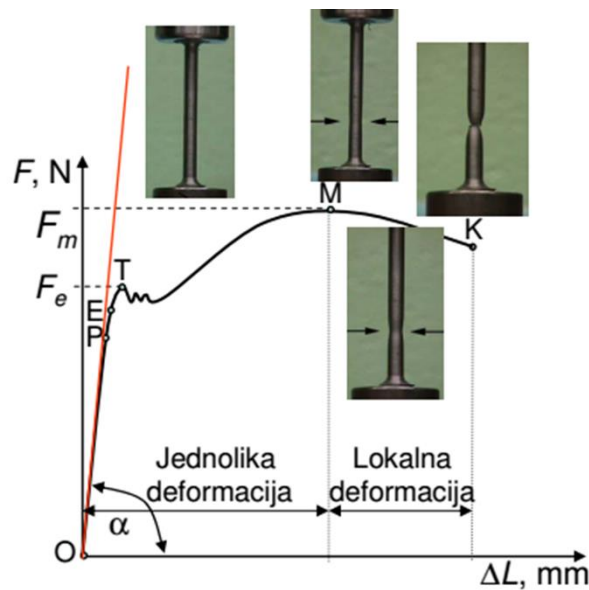
Slika 13.5 Određivanje konvencionalne granice plastičnosti $R_{p0,2}$

Poprečna kontrakcija Z odnosno relativno suženje presjeka na mjestu prijeloma, kao jedna od mjera plastičnosti materijala:

$$Z = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100\%$$

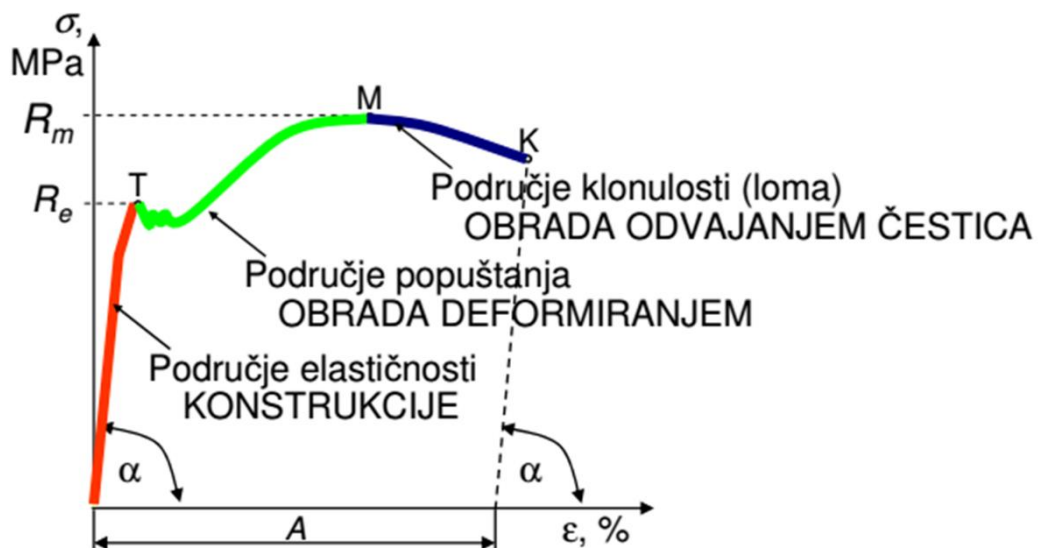
Profile, uža, lance, cijevi ili žice ispituju se u obliku u kojem se i koriste, a vlačne probe takvih uzoraka nazivaju se **tehnološke**. Malu kontrakciju presjeka prilikom kidanja pokazuju krhki materijali, dok plastični materijali pokazuju kontrakciju i preko 50%.

Volumen materijala pri rastezanju se praktički ne mijenja, pa produljenje u uzdužnom smjeru prati suženje epruvete u poprečnom smjeru. U dijagramu na slici 13.6 mogu se pratiti deformacije epruvete za vrijeme ispitivanja.



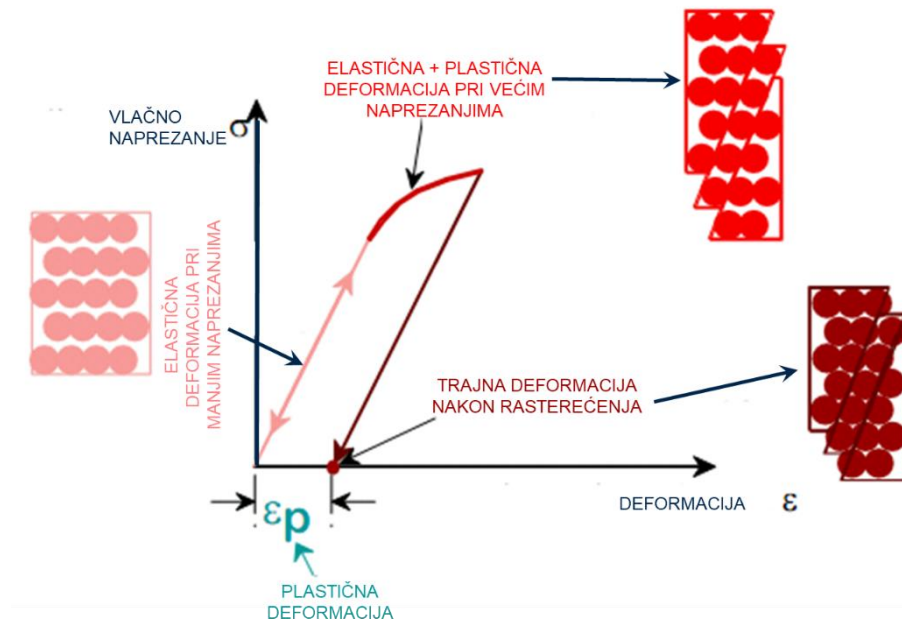
Slika 13.6 Deformacije epruvete za vrijeme vlačne probe

Primjena podataka dobivenih vlačnom probom koriste se u različite svrhe što je istaknuto u dijagramu na slici 13.7.



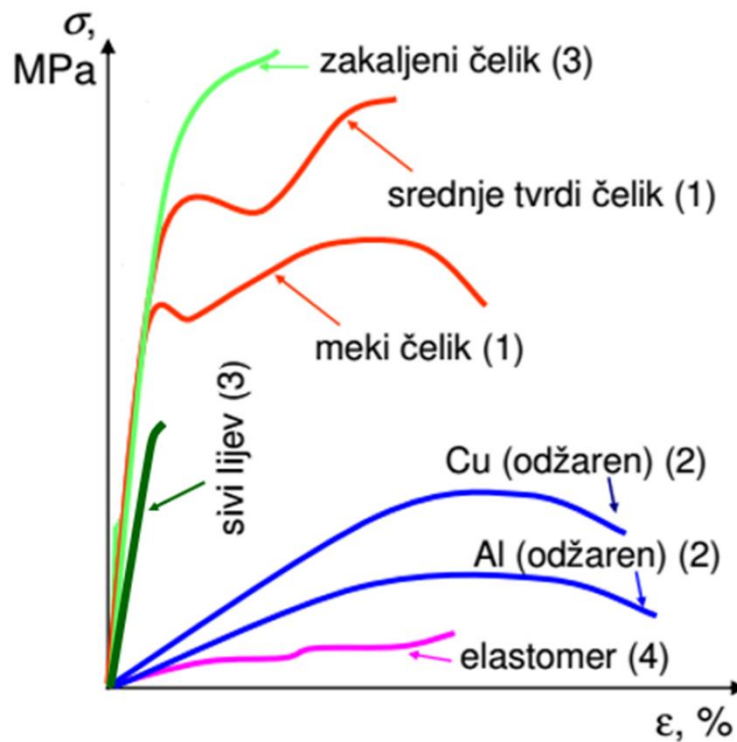
Slika 13.7 Primjena podataka dobivenih vlačnom probom

Interesantno je promotriti što se dešava s vezama među metalnim ionima za vrijeme ispitivanja, posebno ako se radi o čisto elastičnoj ili elasto-plastičnoj deformaciji (slika 13.8).



Slika 13.8 Elastične i plastične deformacije u Hookeovom dijagramu

Izgled Hookeovog dijagrama uvelike ovisi o materijalu koji se ispituje i o mehaničkom/toplinskom stanju materijala (slika 13.9).



Slika 13.9 Hookeov dijagram za različite materijale i različita stanja materijala

Oblici i dimenzije epruveta

Epruvete za standardni statički vlačni pokus te određivanje $R_{p0,2}$ mogu biti okruglog ili pravokutnog poprečnog presjeka. U slučaju kada se žele utvrditi mehanička svojstva nekog lima ili trake koriste se uzorci pravokutnog poprečnog presjeka.

Okrugle epruvete mogu s obzirom na veličinu promjera početnog presjeka biti :

- normalne ($d_0 = 20 \text{ mm}$)
- proporcionalne ($d_0 \neq 20 \text{ mm}$)

Obzirom na početnu mjernu duljinu L_0 dijele se na:

- duge epruvete $l_0 = 10 \cdot d_0$
- kratke epruvete $l_0 = 5 \cdot d_0$

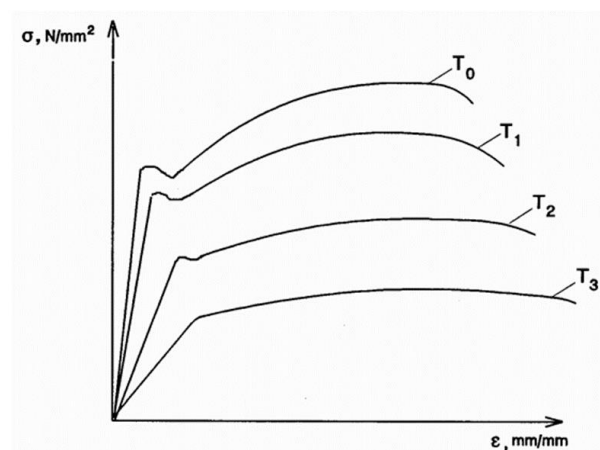
Budući da iznos rastezljivosti, A ovisi o tome dali je ta veličina određena na kratkoj epruveti ($L_0 = 5 \cdot d_0$) ili dugoj epruveti ($L_0 = 10 \cdot d_0$) obavezno se označava s indeksom uz slovo A :

- A_5 ($l_0 = 5 \cdot d_0$)
- A_{10} ($l_0 = 10 \cdot d_0$).

Plosnate epruvete (pravokutnog poprečnog presjeka) također mogu obzirom na početnu mjernu duljinu biti kratke i duge:

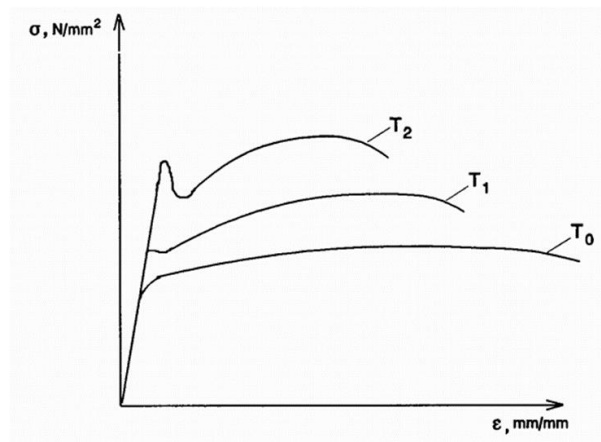
- kratki ispitni uzorak: $l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{A_0}$, gdje je $A_0 = a_0 \cdot b_0$
- dugi ispitni uzorak: $l_0 = 11,3 \cdot \sqrt{A_0}$

U dijagramu na slici 13.10 može se vidjeti utjecaj povišenja temperature na rezultate vlačne probe. U pravilu povećanjem temperature iznos vlačna čvrstoća R_m opada, granica razvlačenja R_p opada i postaje slabije izražena pa treba određivati konvencionalnu granicu razvlačenja $R_{p0,2}$, modul elastičnosti E opada (smanjuje se nagib Hooke-ovog pravca), a iznos rastezljivosti A se povećava.



Slika 13.10 Utjecaj povišene temperature na dijagram $\sigma-\varepsilon$ za "meki" konstrukcijski čelik

U slučaju snižavanja temperature ispitivanja ispod sobne uočava se da se vlačna čvrstoća R_m povećava, naprezanje tečenja R_p se povećava i postaje jače izraženo dok se rastezljivosti A smanjuje (slika 13.11).

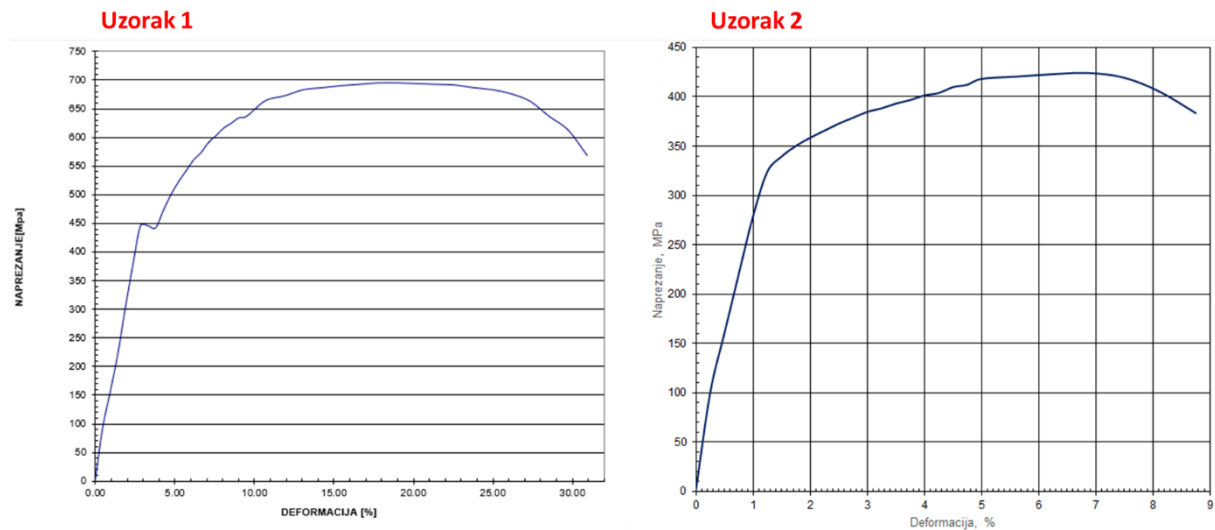


Slika 13.11 Utjecaj snižene temperature na dijagram σ – ε za "meki" konstrukcijski čelik

13.1 Primjer zadatka s rješenjem

Koristeći priložene dijagrame (slika 13.12) i početne dimenzije epruvete koje su: mjerna duljina $l_0 = 40$ mm i početni promjer $d_0 = 8$ mm potrebno je odrediti:

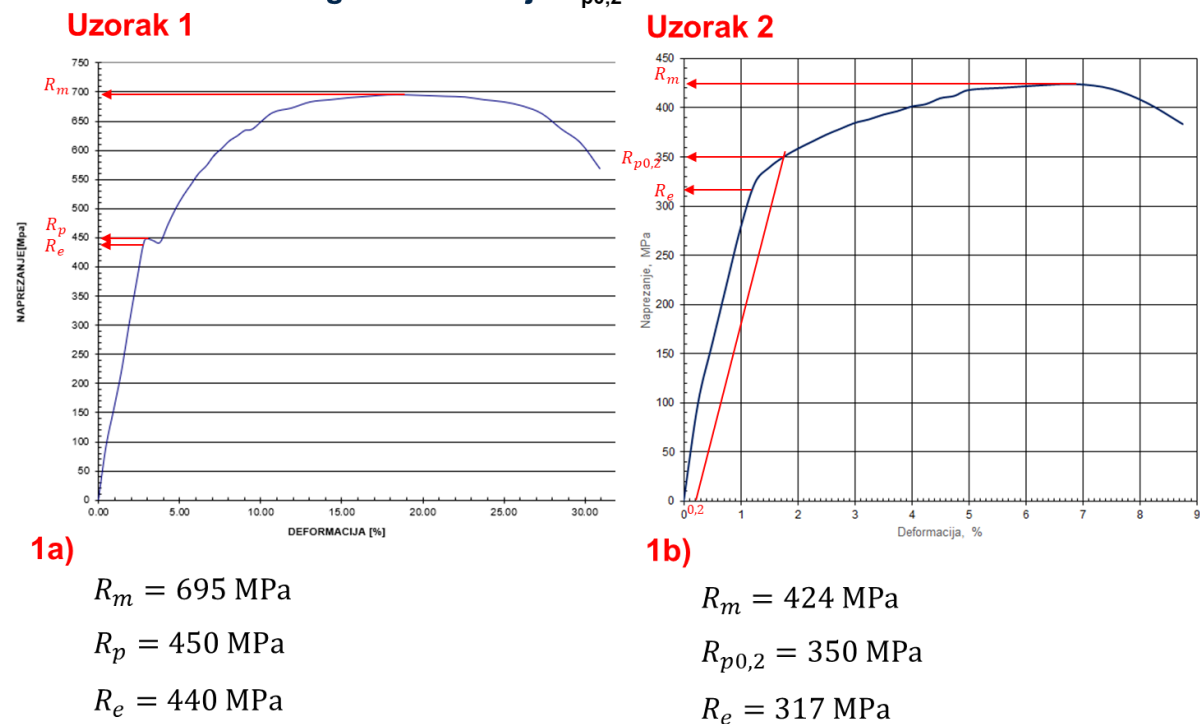
1. Pomoću prikazanog dijagrama **odrediti vlačnu čvrstoću materijala R_m , granicu elastičnosti R_e i granicu popuštanja (granice tečenja) R_p za uzorak 1 te konvencionalnu granicu tečenja $R_{p0,2}$ za uzorak 2!**
2. Izračunati **kontrakciju Z** ako je nakon loma epruvete mjerenjem utvrđeno da je promjer na mjestu loma epruvete 5,7 mm !
3. Iz dijagrama procijeniti **elongaciju A za uzorak 1!**
4. Ukoliko se epruveta (**uzorak 1**) optereti silom $F_1 = 30$ kN odrediti:
 - a) naprezanje u epruveti σ_1 ,
 - b) ukupnu deformaciju ε_1 i ukupno produljenje Δl_{uk}
 - c) elastičnu deformaciju ε_{el} i elastično produljenje Δl_{el}
 - d) trajnu (plastičnu) deformaciju ε_{tr} i trajno produljenje Δl_{pl}
5. Kolikom silom treba opteretiti epruvetu (**uzorak 2**) da bi trajna deformacija dostigla vrijednost $\varepsilon_2 = 1\%$?
6. Koristeći se podacima iz dijagrama (**uzorak 2**), približno odredite vrijednost modula elastičnosti materijala epruvete $E = ?$
7. Približno odredite duljine elastičnog povrata (**uzorak 1**) nakon loma epruveta $\Delta l_{uk} = ?$



Slika 13.12 Hookeov dijagram za uzorak 1 i 2

Rješenje:

1. Pomoću prikazanog dijagrama **odrediti vlačnu čvrstoću materijala R_m , granicu elastičnosti R_e i granicu popuštanja (granicu tečenja) R_p za **uzorak 1** te konvencionalnu granicu tečenja $R_{p0,2}$ za **uzorak 2**!**



2. Izračunati **kontrakciju Z** ako je nakon loma epruvete mjerenjem utvrđeno da je promjer na mjestu loma epruvete **5,7 mm** !

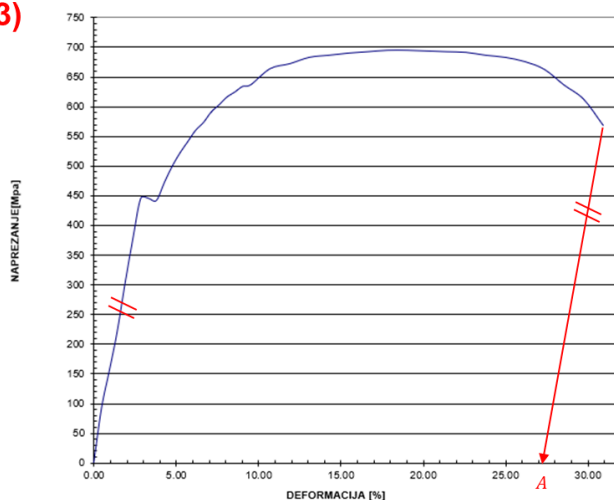
2)

$$Z = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100\% = \frac{\frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} - \frac{d_k^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}} \cdot 100\% = \frac{d_0^2 - d_k^2}{d_0^2} \cdot 100\%$$

$$Z = \frac{8^2 - 5,7^2}{8^2} \cdot 100\% = 49,2\%$$

3. Iz dijagrama procijeniti **elongaciju A** za **uzorak 1**!

3)



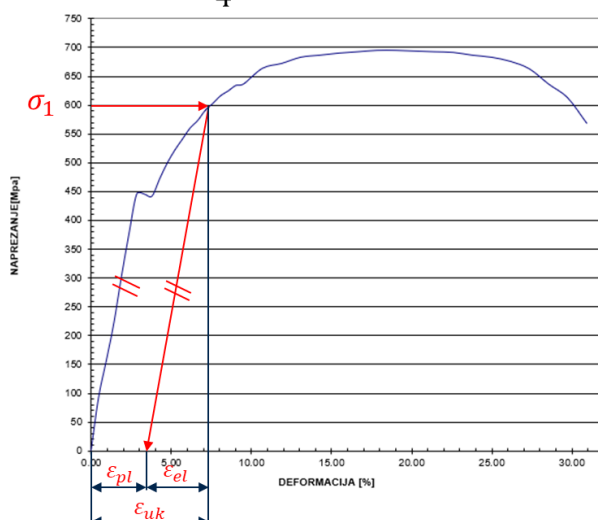
$$A \approx 27,2\%$$

4. Ukoliko se epruveta (**uzorak 1**) optereti silom $F_1=30$ kN odrediti:

- naprezanje u epruveti σ_1 ,
- ukupnu deformaciju ε_l i ukupno produljenje Δl_{uk}
- elastičnu deformaciju ε_{el} i elastično produljenje Δl_{el}
- trajnu (plastičnu) deformaciju ε_{tr} i trajno produljenje Δl_{pl}

4a)

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A} = \frac{F_1}{\frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{4 \cdot F_1}{d_0^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 30 \cdot 10^3}{8^2 \cdot \pi} = 597 \text{ MPa}$$



4b) $\varepsilon_{uk,1} = 7,3\%$

$$\Delta l_{uk,1} = l_0 \cdot \varepsilon_{uk,1} = 40 \cdot \frac{7,3}{100} = 2,92 \text{ mm}$$

4c) $\varepsilon_{el,1} = 7,3 - 3,4 = 3,9\%$

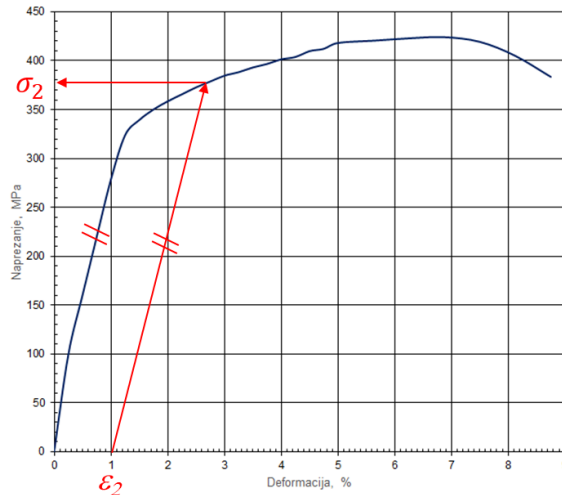
$$\Delta l_{el,1} = l_0 \cdot \varepsilon_{el,1} = 40 \cdot \frac{3,9}{100} = 1,56 \text{ mm}$$

4d) $\varepsilon_{pl,1} = 3,4\%$

$$\Delta l_{pl,1} = l_0 \cdot \varepsilon_{pl,1} = 40 \cdot \frac{3,4}{100} = 1,36 \text{ mm}$$

5. Kolikom silom F_2 treba opteretiti epruvetu (**uzorak 2**) da bi trajna deformacija dostigla vrijednost $\varepsilon_2 = 1\%$?

5)



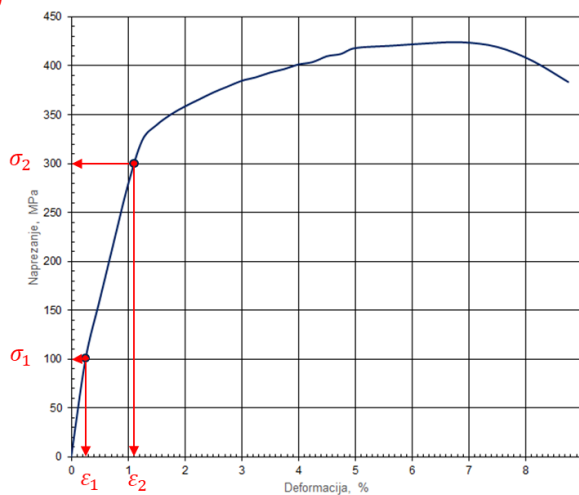
$$\Rightarrow \sigma_2 = 377 \text{ MPa}$$

$$F_2 = \sigma_2 \cdot A_0 = \sigma_2 \cdot \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} = 377 \cdot \frac{8^2 \cdot \pi}{4}$$

$$F_2 = 18950 \text{ N} = 18,95 \text{ kN}$$

6. Koristeći se podacima iz dijagrama (**uzorak 2**), približno odredite vrijednost modula elastičnosti materijala epruvete $E = ?$

6)



$$\sigma_1 = 100 \text{ MPa} \quad \varepsilon_1 = 0,23\% = 0,0023$$

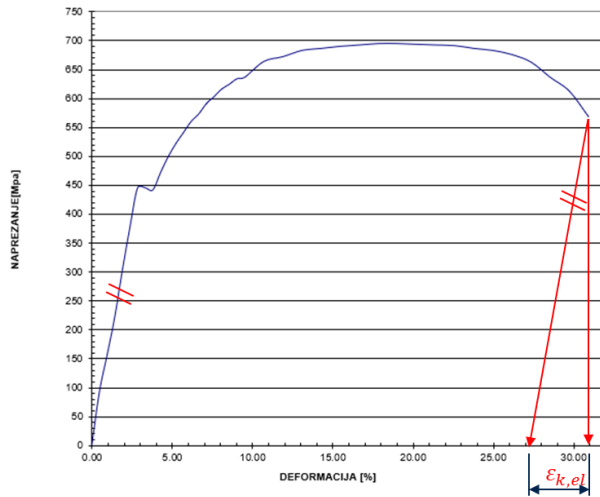
$$\sigma_2 = 300 \text{ MPa} \quad \varepsilon_2 = 1,1\% = 0,011$$

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{300 - 100}{0,011 - 0,0023}$$

$$E = 22988 \text{ MPa} = 22,998 \text{ GPa}$$

7. Približno odredite duljine elastičnog povrata (**uzorak 1**) nakon loma epruvete $\Delta l_{uk}=?$

7)



$$\varepsilon_{k,el} = 30,95 - 27,2 = 3,75\%$$

$$\Delta l_{k,el} = \varepsilon_{k,el} \cdot l_0 = 0,0375 \cdot 40$$

$$\Delta l_{k,el} = 1,5 \text{ mm}$$

14 ISPITIVANJE DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI, ŽILAVOSTI MATERIJALA I PLASTIČNOSTI MATERIJALA

14.1 Ispitivanje dinamičke izdržljivosti materijala

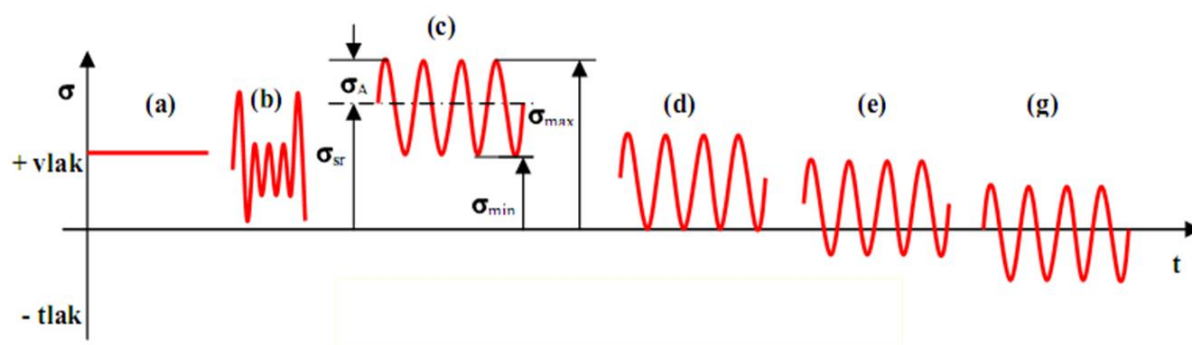
Dinamička izdržljivost materijala R_d je osnovna veličina za proračun dinamički opterećenih konstrukcija. Dinamičko naprezanje može biti (slika 14.1):

- **Istosmjerno** - krivulje (b), (c) i (d);
- **Izmjenično** - krivulje (e) i (g);

Posebno su značajna sinusoidna napreznja:

- **Pulzirajuće** ili **titrajno** dinamičko opterećenje- krivulja (d);
- **Njihajuće** ili **kolebljivo** dinamičko opterećenje- krivulja (g).

Na slici je statičko opterećenje naznačeno horizontalnom linijom označenom s (a).



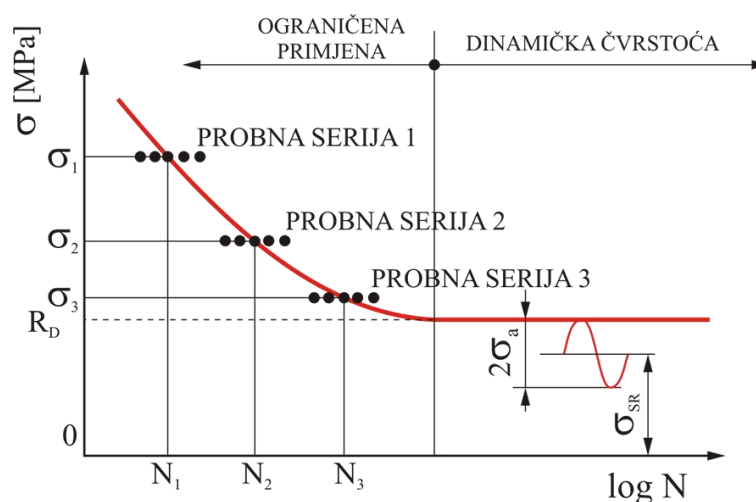
Slika 14.1 Vrste dinamičkih napreznja

U pravilu je dinamička izdržljivost materijala veća od dinamičke izdržljivosti konstrukcije izrađene iz istog materijala. Uzorci za ispitivanje dinamičke izdržljivosti površinski su obrađeni prema standardu - obično polirani, dok je kod praktičnih konstrukcija hrapavost površine veća. Veličina dinamičke izdržljivosti se izražava u MPa, kao i čvrstoća materijala. Dinamička izdržljivost materijala određuje se ispitivanjem na uređajima (umaralicama) kao granično naprezanje kod kojeg ne dolazi do loma bez obzira na broj promjena opterećenja – slika 14.2.

Ispitivanje se provodi za različita opterećenja (naprezanja) i to počev od većih prema manjim. Mjeri se broj ciklusa - promjena opterećenja do pucanja epruvete. Rezultati se prikazuju u Woehlerovom dijagramu u logaritamskom mjerilu (slika 14.5).

Primjenom većeg naprezanja, npr. σ_1 epruveta izdrži manji broj ciklusa N_1 . Smanjenjem naprezanja (na σ_2 odnosno σ_3) povećava se broj ciklusa (na N_2 odnosno N_3) koje epruveta izdrži.

Kada se naprezanje smanji na razinu dinamičke izdržljivosti R_d , epruveta praktično može izdržati beskonačan broj ciklusa.



Slika 14.5 Woehlerov dijagram

Kod određenog broja titraja krivulja se asimptotski približava vrijednosti R_d - praktično za čelik se uzima $N=10^7$, a za lake metale $N=10^8$ - u novije vrijeme za sve metale $N=10^7$.

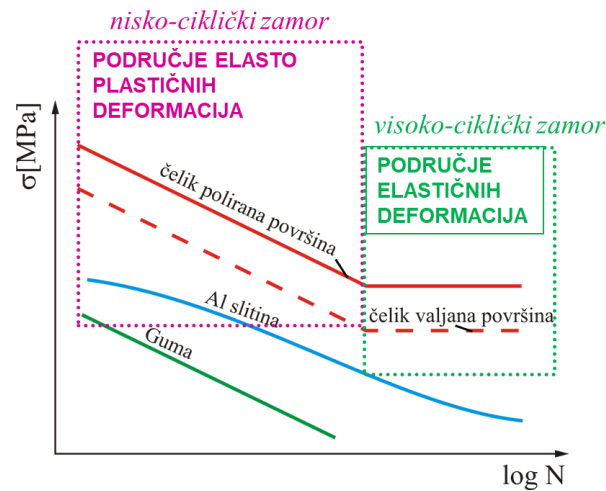
Omjer izdržljivosti predstavlja omjer granice izdržljivosti i vlačne čvrstoće materijala za određeno dinamičko opterećenje:

$$\text{omjer izdržljivosti} = \frac{R_D}{R_m}$$

Svaka Woehlerova krivulja vrijedi za samo određenu vrstu dinamičkog opterećenja u kombinaciji sa određenim statičkim opterećenjem.

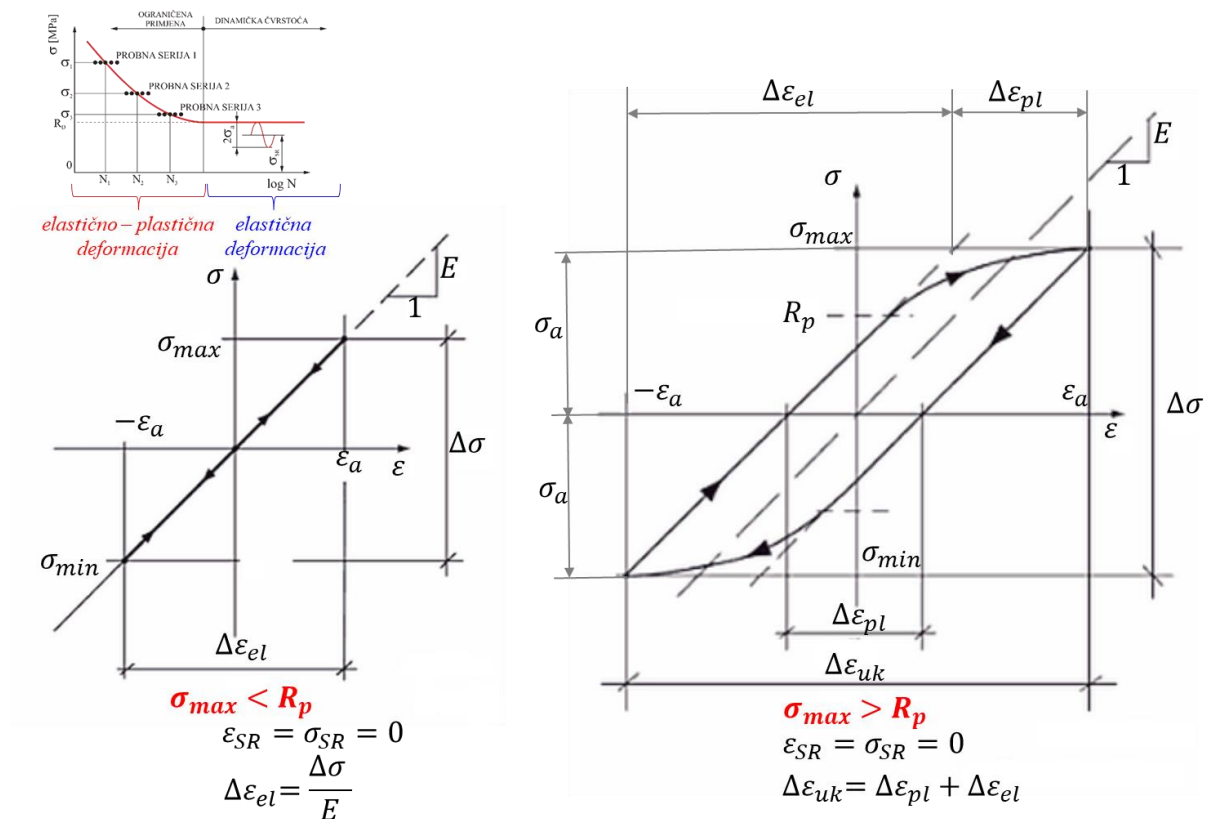
U Woehlerovom dijagramu mogu se zapaziti dva područja (slika 14.6):

- s visokim naprezanja s izmjeničnim plastičnim deformacijama, kada lom nastupa pri malom broju ciklusa opterećenja,
- s elastičnim deformacijama, kada lom nastupa nakon više od 10^5 ciklusa opterećenja.



Slika 14.6 Woehlerov dijagram za različite materijale

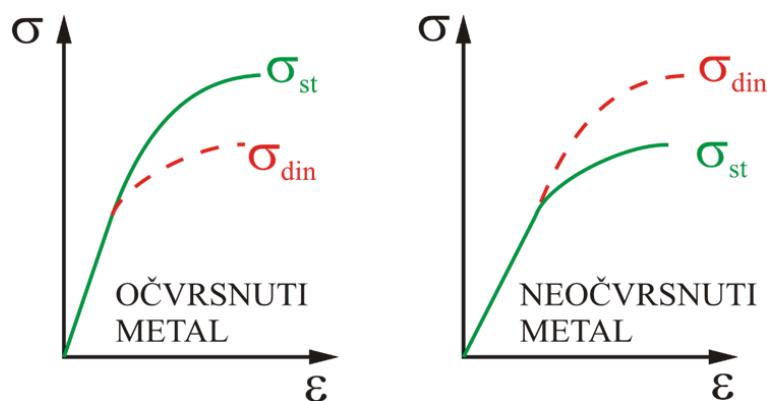
Pri malim vrijednostima dinamičkog naprezanja javljaju se samo elastične deformacije (slika 14.7 – lijevo), dok se pri većim napreznjima javljaju elastoplastične deformacije (slika 14.7 – desno).



Slika 14.7 Elastične (lijevo) i elastoplastične (desno) dinamičke deformacije

Korozija smanjuje dinamičku izdržljivost, jer ubrzava nastanak i rast pukotina uslijed zamora. Neki materijali, naročito aluminij, ne pokazuju trajnu dinamičku izdržljivost, nego stradaju pri konačnom broju promjena opterećenja.

Uslijed promjenljivog opterećenja očvrtnuti metali mogu omekšati, a meki očvrtnuti (Bauschingerov efekt – slika 14.8).



Slika 14.8 Bauschingerov efekt

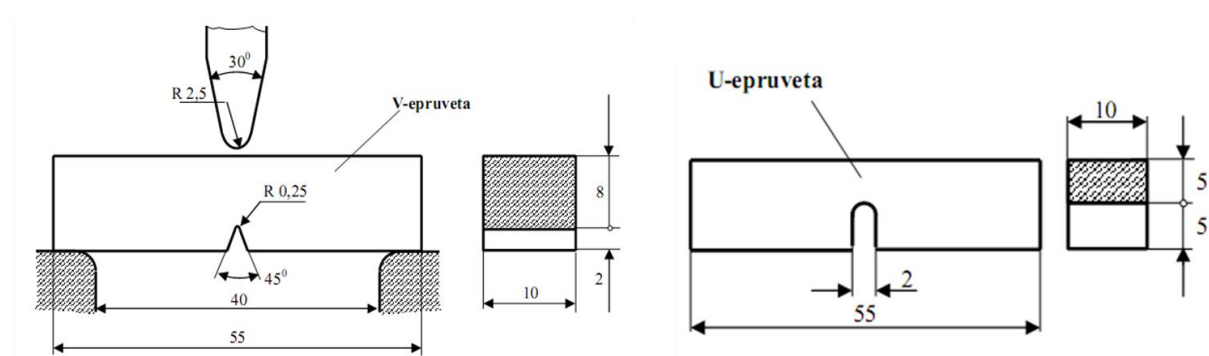
14.2 Ispitivanje žilavosti materijala

Žilavost materijala se općenito definira kao otpornost lomu. Za razliku od čvrstoće ovdje je mjera otpornosti lomu utrošena energija na razdvajanje čestica materijala. Ova energija ovisi o vrsti materijala i čvrstoći veza, ali i načinu i smjeru širenja pukotine, vrsti opterećenja i temperaturi materijala pod opterećenjem.

Vidljivo je da kod ovolikog broja utjecajnih činitelja nije lako jednoznačno odrediti žilavost. Postoji veći broj standardnih 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 po Charpy-u. Epruveta je malena, kvadratnog presjeka i zarezana na jednoj strani po sredini (slika 14.9). Epruvete s "V" žlijebom se upotrebljavaju za žilavije materijale npr. niskouglične čelike dok se epruvete sa "U" žlijebom upotrebljavaju za krte materijale.



Slika 14.9 Standardna epruveta za ispitivanje žilavosti žilavih (lijevo) i krtih materijala (desno)

Udarcem bata epruveta se lomi na osloncu uređaja za ispitivanje žilavosti. Mjera žilavosti je utrošena energija bata W za lom epruvete u Joule-ima, izmjerena iz razlika energije bata prije i nakon loma.

Kritični dio ispitivanja je priprema zareza na epruveti (bitan je radijus zaobljenja u vrhu zareza, kao koncentrator naprezanja).

Na slici 14.10 shematski je prikazan Charpy uređaj za ispitivanje žilavosti.

Žilavost po Charpy se računa prema slijedećim izrazima:

$$KV (KU) = G \cdot (h_0 - h_f) \text{ J}$$

$$KV (KU) = m \cdot g \cdot [r \cdot (1 + \sin(\alpha - 90)) - r \cdot (1 - \cos(\beta))] \text{ J}$$

gdje je: G, N – težina udarnog bata,

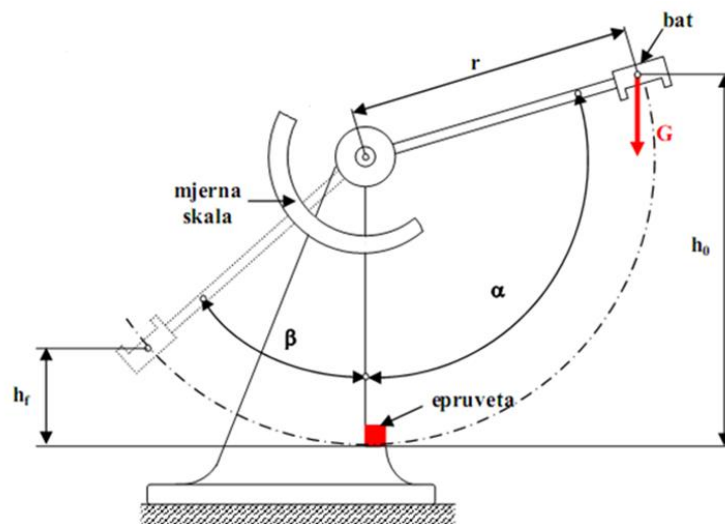
h_0, m – početna visina težišta bata

h_f, m – visina težišta bata nakon loma epruvete

r, m – udaljenost težišta bata od hvatišta

α – kut zakreta bata u početnom položaju

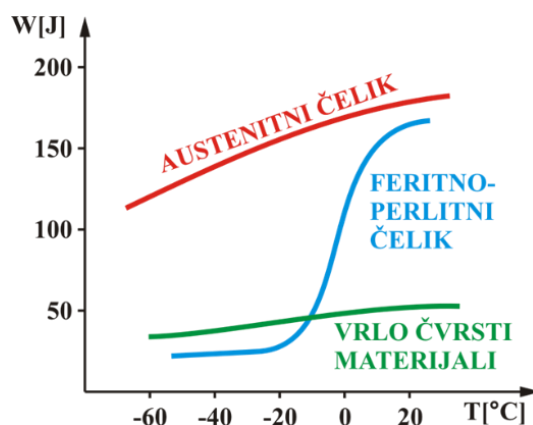
β – kut zakreta bata u krajnjem položaju (nakon loma epruvete)



Slika 14.10 Charpy uređaj za ispitivanje žilavosti

Rezultati ispitivanja žilavosti pokazuju dosta velika rasipanja, pa se obično lomi više epruveta (npr. tri epruvete) te se računa srednja vrijednost dobivenih rezultata mjerenja.

Uzorci uzeti u smjeru i okomito na smjer valjanja pokazuju velike razlike u žilavosti – anizotropnost svojstava. Na veličinu žilavosti utječe i temperatura ispitivanja. Feritni čelici pokazuju naročito izraženi pad žilavosti ispod neke kritične temperature T_{kr} (slika 14.11).



Slika 14.11 Utjecaj temperature na žilavost čelika

Osim radnje loma kao mjera žilavosti koristi se veličina poprečnog izbočenja epruvete (slika 14.12) na mjestu loma (mjera plastičnosti kod loma), te udio površine žilavog loma u površini prijeloma epruvete.



Slika 14.12 Žilava i krta Charpy epruveta nakon ispitivanja

Na slici 14.13 prikazan je izgled površine loma i pripadajuće žilavosti epruveta iz istog čelika (EN 42CrMo4), ali različito toplinski obrađenih.



KALJEN U ULJU KV=30 J



NORMALIZIRAN KV=44 J



POBOLJŠAN NA 600°C KV=48J



IZOT. POBOLJŠAN NA 350°C KV=58J

Slika 14.13 Izgled površine loma Jominy epruvete iz čelika EN 42CrMo4

Prema euro normama u primjeni su standardne oznake žilavosti čelika koje su implementirane u samu oznaku (npr. EN S235**JR**, EN S275**JO**, EN S355**J2** ili EN S355**K2**).

Značenje oznaka žilavosti:

- **JR** - materijal mora izdržati udarnu radnju loma od minimalno 27 J pri temperaturi +20 °C
- **JO** - materijal mora izdržati udarnu radnju loma od minimalno 27 J pri temperaturi 0 °C
- **J2** - materijal mora izdržati udarnu radnju loma od minimalno 27 J pri temperaturi -20 °C
- **K2** - materijal mora izdržati udarnu radnju loma od minimalno 40 J pri temperaturi -20 °C

14.3 Ispitivanje plastičnosti materijala – proba savijanja

Česta je proba savijanjem epruvete iz ispitivanog materijala. Epruveta se savija preko trna određenog promjera. Ovo ispitivanje se upotrebljava 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 °C).

Epruvete imaju pravokutni, kvadratni ili okrugli presjek (slika 14.15), a ispituju se i profili. Debljina epruvete "h" nije veća od 30 mm. Širina pravokutnih epruveta "w" iznosi od 25 do 50 mm.

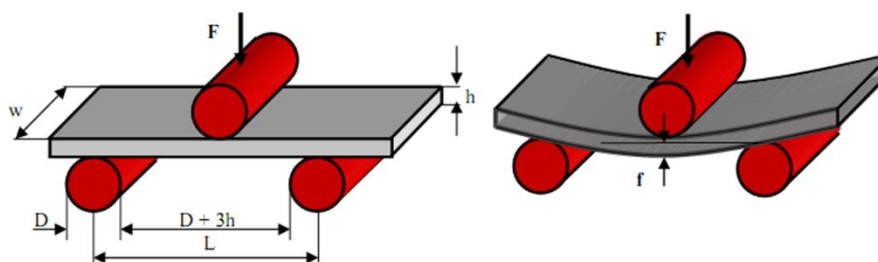
Preporučuje se duljina epruvete $l = 5 \cdot h + 150 \text{ mm}$. Promjer gornjeg valjka se određuje zavisno od materijala koji se ispituje, a propisan je standardima (slika 14.14). Za savijanje se koriste dva oslonca promjera "D":

$$\text{za } h \leq 12 \text{ mm} \rightarrow D = 50 \text{ mm}$$

$$\text{za } h > 12 \text{ mm} \rightarrow D = 100 \text{ mm}$$

Savijanje mora biti polagano i neprekinuto do određenog kuta α . Mjera ispitivanja je kut savijanja " α " do pojavljivanja pukotine (ako uopće dođe do nje).

Rastezljiviji materijali mogu se saviti za 180° oko trna, dok se čvršći materijali savijaju za manji kut.

*Slika 14.14 Ispitivanje savijanjem*

Uspješnost savijanja oko trna nekog materijala ukazuje na mogućnost hladnog oblikovanja materijala, ali i na sigurnost u slučaju havarije sa znatnim deformacijama, da neće doći do pucanja, nego samo gnječenja materijala.

U tom slučaju ispitivanje savijanjem je također mjera otpornosti lomu materijala pri velikim deformacijama.



Slika 14.15 Ispitivanje savijanjem

15 Preporučena literatura

1. Španiček, Đ.; Ćurković L.: MATERIJALI I, FSB, Zagreb, 2005.
2. Kolumbić Z.; Tomac N.: MATERIJALI, Filozofski fakultet, Rijeka, 2005.
3. Frantz, M.: Mehanička svojstva materijala, FSB, Zagreb, 2005.
4. Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011.
5. Kraut, B: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, razna izdanja
6. Metals Handbook, Vol I - XI, Metals Park, 1981 - 1980.
7. Callister, W: Materials Science and Engineering, 8th Edition, Wiley & Sons, New York, 2011.
8. Ashby, M.; Jones D.: Engineering Materials 1, 3rd Edition, Elsevier, Cambridge University, UK 2005
9. Ashby, M.; Jones D.: Engineering Materials 2, 3rd Edition, Elsevier, Cambridge University, UK 2006