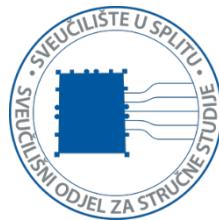


SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI 2

***PRAKTIKUM ZA LABORATORIJSKE
VJEŽBE***

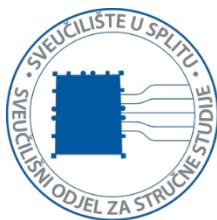
Razradio : Igor Gabrić, v. pred.

Split, veljača 2018.

SADRŽAJ

Vježba br. 1	UTJECAJ TOPLINSKE OBRADE NA PROMJENU VOLUMENA I MEHANIČKIH SVOJSTAVA	3
Vježba br. 2	METCALFOV NIZ KALJENJA	7
Vježba br. 3	ODREĐIVANJE UTJECAJA SADRŽAJA UGLIKA NA TVRDOĆU ČELIKA NAKON KALJENJA	11
Vježba br. 4	RAZMATRANJE I VERIFIKACIJA TTT - DIJAGRAMA	18
Vježba br. 5	GRIJANJE	25
Vježba br. 6	PROKALJIVOST	37
Vježba br. 7	NUMERIČKA METODA ODREĐIVANJA JOMINY KRIVULJA	44
Vježba br. 8	PRIMJENA JOMINY KRIVULJA	53
Vježba br. 9	ISPITIVANJE PROKALJIVOSTI PO GROSSMANU	60
Vježba br. 10 i 11	POBOLJŠAVANJE	67
Vježba br. 12	METALOGRAFIJA I METALOGRAFSKI PREGLED TOPLINSKI OBRAĐENIH ČELIKA	74
Vježba br. 13	NORMALIZACIJA	85
Vježba br. 14	NERAZORNA ISPITIVANJA METALA	92

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 1

***UTJECAJ TOPLINSKE OBRADE
NA PROMJENU VOLUMENA
I MEHANIČKIH SVOJSTAVA***

UTJECAJ TOPLINSKE OBRADE NA PROMJENU VOLUMENA I MEHANIČKIH SVOJSTAVA

A) PROMATRANJE PROMJENE VOLUMENA

Čeličnu žicu u poboljšanom stanju treba zagrijati na pravilnu temperaturu austenitizacije t_A . Žica je promjera $\phi 4$ [mm] i duljine $l_0 = 700$ [mm] iz čelika za opruge EN 71Si7 tj. HRN Č2135 čiji su kemijski sastav i svojstva prikazana u tablici 1 i 2.

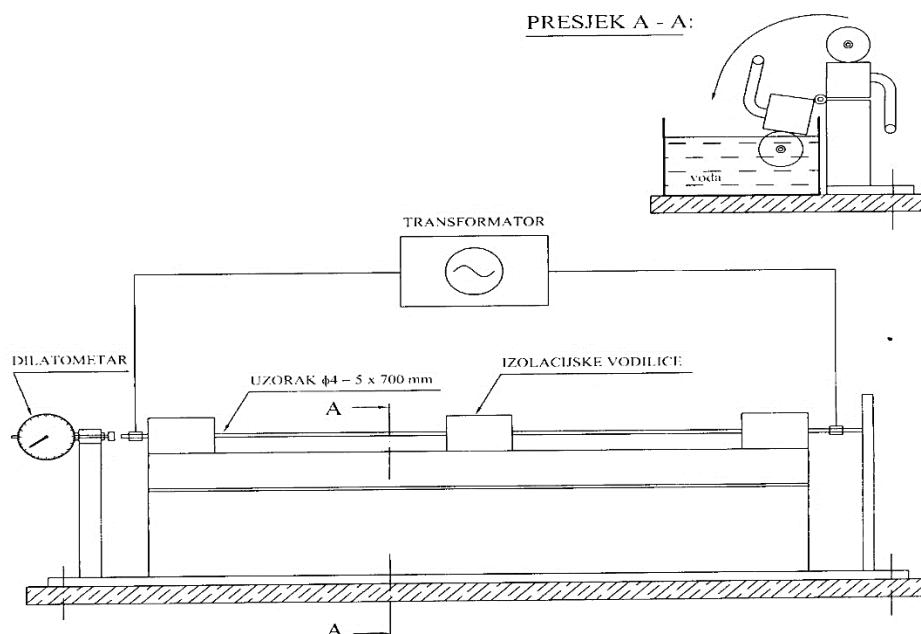
Tablica 1. Kemijski sastav čelika za opruge EN 71Si7 (HRN Č2135)

$C \leq$	$Si \leq$	$Mn \leq$	$P \leq$	$S \leq$
$0,68 \div 0,75$	$1,50 \div 1,80$	$0,60 \div 0,80$	$0,035$	$0,035$

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika za opruge EN 71Si7 (HRN Č2135)

Svojstvo	Iznos	Mjerna jedinica
Youngov modul elastičnosti E	200	GPa
Vlačna čvrstoća R_m	650 - 880	MPa
Elongacija A	$25 \div 8$	%
Granica dinamičke izdržljivosti R_d	275	MPa
Granica tečenja R_p	$350 \div 550$	MPa

Zagrijavanje vršiti pomoću transformatora za zavarivanje, uz jakost struje $I = 90 \div 135$ A, prema slici 1.



Slika 1. Prikaz uređaja za mjerjenje promjene volumena

A1) IZVOĐENJE POKUSA

- **Temperatura zagrijavanja** se procjenjuje pomoću zidne slike s bojama užarenog čelika, uspoređivanjem s bojom uzorka (žice).
- **Promjena volumena** očituje se najviše u promjeni duljine žice, što se kontinuirano prati pomoću postavljenog mjernog uređaja (komparatora) na slobodnom kraju žice. Istodobno se uočavaju dilatacijske promjene zbog alotropske modifikacije u austenit (A). U trenutku dosizanja pravilne t_A uređaj prema slici 1. omogućuje naglim zakretanjem za 180° uranjanje austenitizirane žice u podesno postavljenu posudu sa slanom vodom, dok se ne ohladi.

Ovako zakaljena žica vrati se u početni položaj, te se pomoću komparatora mjeri porast njene duljine Δl_k , u odnosu na nezakaljeno stanje.

B) PROMATRANJE PROMJENE MEHANIČKIH SVOJSTAVA

B1) IZVOĐENJE POKUSA

Radi međusobne usporedbe utjecaja toplinskog stanja na promjenu mehaničkih svojstava potrebno je pripremiti tri uzorka žice iz istog čelika za opruge duljine oko 100 mm i promjera 4 mm

Svim uzorcima, prije toplinskog tretmana, izmjeriti duljinu l_0 pomoću pomičnog mjerila i promjer d_0 pomoću mikrometra

Toplinski tretman:

1. Prvi i drugi uzorak zagrijati na temperaturu $t_A = 850^\circ\text{C}$ u komornoj peći (u trajanju 10 min) te naglo ohladiti u slanoj vodi.
2. Drugi uzorak žice ponovno zagrijati na temperaturu $t_A = 850^\circ\text{C}$ u komornoj peći te polagano ohladiti na mirujućem zraku.
3. Treći uzorak ostaviti u isporučenom stanju (patentirana žica: žica zagrijana na $t_A = 850^\circ\text{C}$ uz naknadno provlačenje kroz olovnu kupku temperature $350 - 400^\circ\text{C}$ do potpune transformacije, nakon čega je polagano ohlađena do sobne temperature).

Nakon toplinskog tretmana:

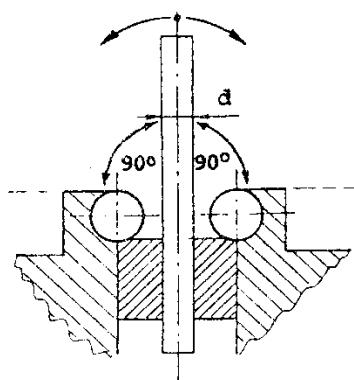
1. Svim uzorcima izmjeriti duljinu l_k i promjer d_k pomoću pomičnog mjerila i mikrometra, te odrediti relativno produljenje i relativnu promjenu volumena!

$$\text{Relativno produljenje: } \Delta l = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$\text{Relativna promjena volumena } \Delta V = \frac{V_k - V_0}{V_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

Napomena: Obzirom da dio žice koji prolazi kroz čahure ne dostiže temperaturu austenitizacije, isti nakon hlađenja nema promjenu duljine ni volumena. Približno procijeniti koliki se udio duljine žice zagrijava na temperaturu austenitizacije, te proračun relativnog produljenja i relativne promjene volumena bazirati na temelju procijenjene duljine žice.

2. Svim uzorcima ispitati sposobnost izmjeničnog previjanja



Napomena: Pod jednim previjanjem smatra se savijanje iz početnog položaja za 90° u jednu stranu, te natrag do početnog položaja. Važno je previjanje obaviti u pravilnim vremenskim intervalima (jedno previjanje u jednoj sekundi) zbog utjecaja zagrijavanja uslijed unutrašnjeg trenja materijala žice.

3. Svim uzorcima izmjeriti tvrdoću prema Vickers metodi

Na temelju dobivenih rezultata donijeti zaključke o utjecaju toplinske obrade na:

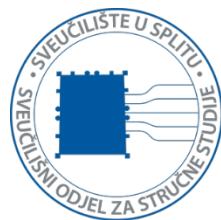
- nastale faze,
- mehanička i fizikalna svojstva.

Zadatak:

Sastaviti izvještaj o izvođenju laboratorijske vježbe s vlastitim zapažanjima:

- osvrnuti se na promjene volumena i mehaničkih svojstava i povezati s promjenama faza u strukturi materijala nakon različitih načina ohlađivanja uzorka;
- tijek toplinske obrade za svaki uzorak prikazati u odgovarajućem dijagramu;
- rezultate dobivene ispitivanjima i mjeranjima prikazati tablično;
- približno izračunati relativno produljenje uzorka, te relativnu promjenu volumena uzorka naglo ohlađenog u slanoj vodi u odnosu na polagano ohlađeni uzorak;
 - iznijeti zaključke i vlastita zapažanja.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 2

METCALFOV NIZ KALJENJA

UTJECAJ TEMPERATURE KALJENJA NA POSTIGNUTU TVRDOĆU – ODREĐIVANJE OPTIMALNE TEMPERATURE KALJENJA POMOĆU METCALFOVOG NIZA KALJENJA

A) UVOD

Toplinska obrada kaljenja čelika se sastoji od zagrijavanja na „pravilnu“ temperaturu austenitizacije, progrijavanja te naglog hlađenja (gašenja), najčešće do sobne temperature, pri čemu iz austenita (plošno centrirane kubne γ rešetke) nastaje tetragonalni martenzit (prostorno centrirana tetragonalna rešetka).

Kaljenje čelika se temelji na:

- rastvaranju ugljika u γ rešetki austenita (maksimalno 2,03 %C na 1145 °C) bitno veće koncentracije nego što je mogućnost rastvaranja u α rešetki ferita
- mogućnosti pothlađivanja austenita (zadržavanja rastvorenog ugljika sve do temperature pretvorbe u martenzit (M_s temperature)).

Martenzit može nastati samo iz austenita, te stoga veličina austenitnog zrna, udio i raspored ugljika rastvorenog u austenitu značajno određuju veličinu zrna i mehanička svojstva martenzita (tvrdiću, čvrstoću, rastezljivost, žilavost). Austenitizacija je proces koji se događa difuzijom iznad A₁ temperature. Pri zagrijavanju čelika na temperaturu austenitizacije treba paziti da temperatura ne bude previsoka te da trajanje držanja na temperaturi austenitizacije ne bude predugo.

Optimalna temperatura austenitizacije podeutektoidnih čelika je:

$$t_A = A_3 + (30 \dots 70 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (1)$$

Optimalna temperatura austenitizacije nadeutektoidnih čelika je:

$$t_A = A_I + (50 \dots 70 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

Osnovni kriteriji kaljivosti čelika su:

1. Postojanje alotropske modifikacije ferita (F) u austenit (A) i obratno, (neki legirani čelici bez ove pretvorbe nisu zakaljivi, npr. visokolegitirani feritni ili austenitni nehrđajući čelici).
2. Minimalni sadržaj ugljika kojeg čelik mora imati (dogovorno) najmanje 0,35% C kako bi dovoljan broj rešetki austenita γ rastvorio po jedan atom ugljika.
3. Čelik treba zagrijati u austenitno područje (monofazno ili dvofazno), tj. na optimalnu temperaturu austenitizacije.
4. Austenitizirani i progrijani (vrijeme potrebno da se i jezgra austenitizira) čelik treba dovoljno intenzivno hladiti kako bi se spriječila difuzija ugljikovih atoma iz austenitne rešetke te prisilno zadržalo atome ugljika u novonastaloj kristalnoj rešetki martenzita. Tvrdoča čelika praktično zavisi isključivo o sadržaju C što se vidi iz Burnsovog dijagrama.

B) EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE OPTIMALNE TEMPERATURE AUSTENITIZACIJE METODOM NIZA KALJENJA

Metcalfovim pokusom kaljenja može se ispitati:

1. sposobnost kaljenja nekog čelika;
2. optimalna temperatura austenitizacije kod toplinske obrade kaljenja.

Osnovna ideja metode niza kaljenja proizlazi iz činjenice postojanja optimalne temperature austenitizacije čelika. Ako se čelik zagrije u austenitno područje i naglo ohladi nastaje martenzitna mikrostruktura s bitno povišenom tvrdoćom. Temperatura austenitizacije jako utječe na tvrdoću postignutu kaljenjem što se pokusom niza kaljenja i pokazuje. Optimalna temperatura austenitizacije, uz sve ostale iste uvjete kaljenja, omogućava postizanje najveće tvrdoće nakon gašenja za promatrani čelik, uz finozrnastu martenzitnu mikrostrukturu.

Ova metoda se sastoji iz zagrijavanja nekoliko ispitnih uzoraka čelika nepoznatog kemijskog sastava na različite temperature austenitizacije: od područja nepotpunog austenitiziranja do područja izrazitog pregrijavanja uz naglo ohlađivanje u istom rashladnom sredstvu (npr. u mirnoj slanoj vodi sobne temperature).

Niz kaljenja se provodi s porastom temperature austenitizacije po 10°C , 20°C ili 50°C . Ispitni uzorci moraju biti približno jednakih dimenzija. U pojednostavljenom postupku ispituje se tvrdoća nakon kaljenja (metodama Vickers ili Rockwell C).

C) ZADATAK

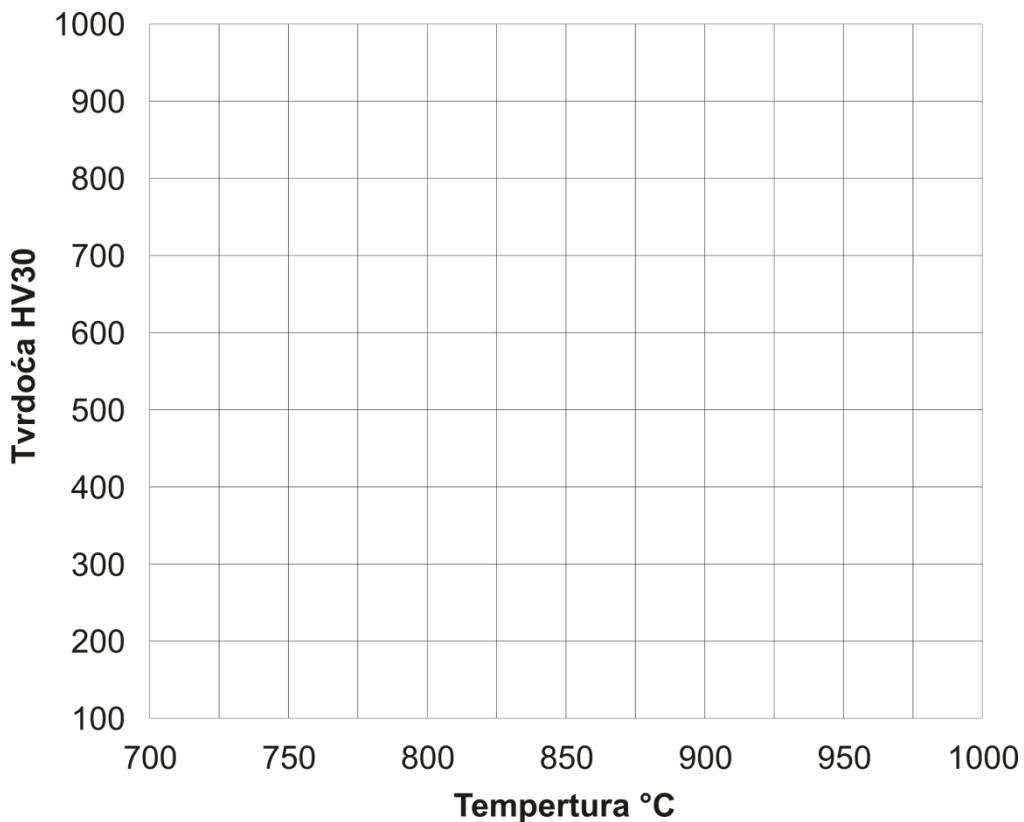
Za ispitne uzorke dimenzija $\phi 25 \times 15 \text{ mm}$ iz čelika nepoznatog kemijskog sastava treba:

1. Odabrati temperature austenitizacije te provesti niz kaljenja.
2. Ispitati postignute tvrdoće metodom prema Vickers-u *HV30* (ili prema Rockwell C metodi *HRC*)
3. Nacrtati dijagram ovisnosti postignute tvrdoće o korištenoj temperaturi austenitizacije.
4. Iz dobivenog dijagrama odrediti optimalnu temperaturu austenitizacije.

Za provedbu pokusa raspoloživa je laboratorijska komorna peć s automatskom regulacijom temperature, posuda za kaljenje sa slanom vodom sobne temperature 20°C te instrument za ispitivanje tvrdoće (tvrdomjer).

Dobivene rezultate prikazati tablično, te ih ucrtati u dijagram „Temperatura austenitizacije – Tvrdoća HV30 (ili Rockwell C tvrdoća)“. Dobivene točke interpolirati krivuljom. Iz ucrtane krivulje odrediti optimalnu temperaturu austenitizacije.

Uzorak	$t_{Amin} =$ $^{\circ}\text{C}$	Tvrdoća <i>HV30</i> (ili <i>HRC</i>)						Prosječna tvrdoća <i>HV30</i> ili <i>HRC</i>
		t_A	1	2	3	4	5	
1								
2								
3								
4								
5								

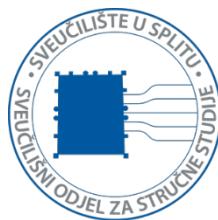


Zadatak:

Sastaviti izvještaj o izvođenju laboratorijske vježbe s vlastitim zapažanjima:

- opisati i slikama popratiti tijek izvođenja vježbe;
- u istom dijagramu toplinske obrade prikazati tijek toplinske obrade (za svaki uzorak koristiti različitu boju);
- rezultate dobivene mjerjenjem tvrdoće prikazati tablično i u odgovarajućem dijagramu;
- prokomentirati fazni sastav nakon kaljenja za svaki pojedini uzorak, a prema rezultatima mjerena tvrdoće;
- odrediti optimalnu temperaturu austenitizacije i istu naznačiti u dijagramu;
- iznijeti zaključke i vlastita zapažanja.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

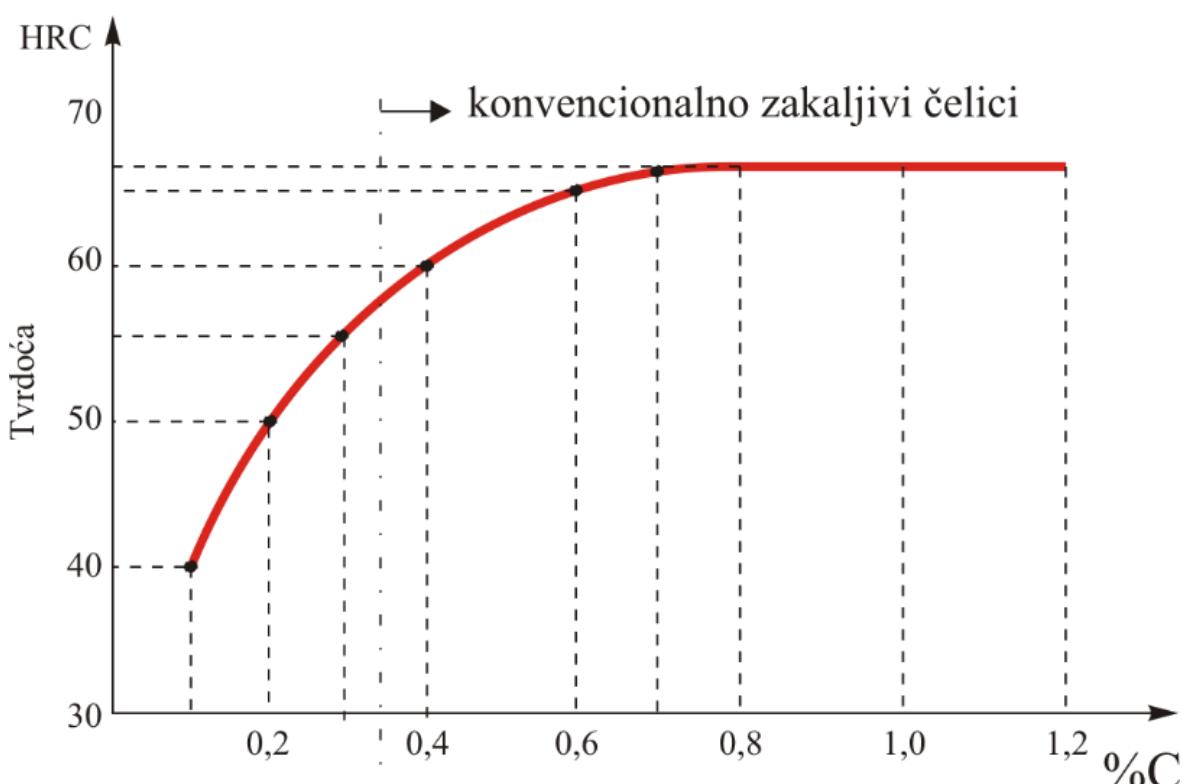
VJEŽBA br. 3

ODREĐIVANJE UTJECAJA SADRŽAJA UGLJIKA NA TVRDOĆU ČELIKA NAKON KALJENJA

ODREĐIVANJE UTJECAJA SADRŽAJA UGLJIKA NA TVRDOĆU ČELIKA NAKON KALJENJA

A) BURNSOV DIJAGRAM

Tvrdoća čelika praktično ovisi isključivo o sadržaju ugljika C , što se može vidjeti iz Burnsovog dijagrama, prema slici 1.



Slika 1. Burnssov dijagram tvrdoće zakaljenih čelika u ovisnosti o sadržaju ugljika

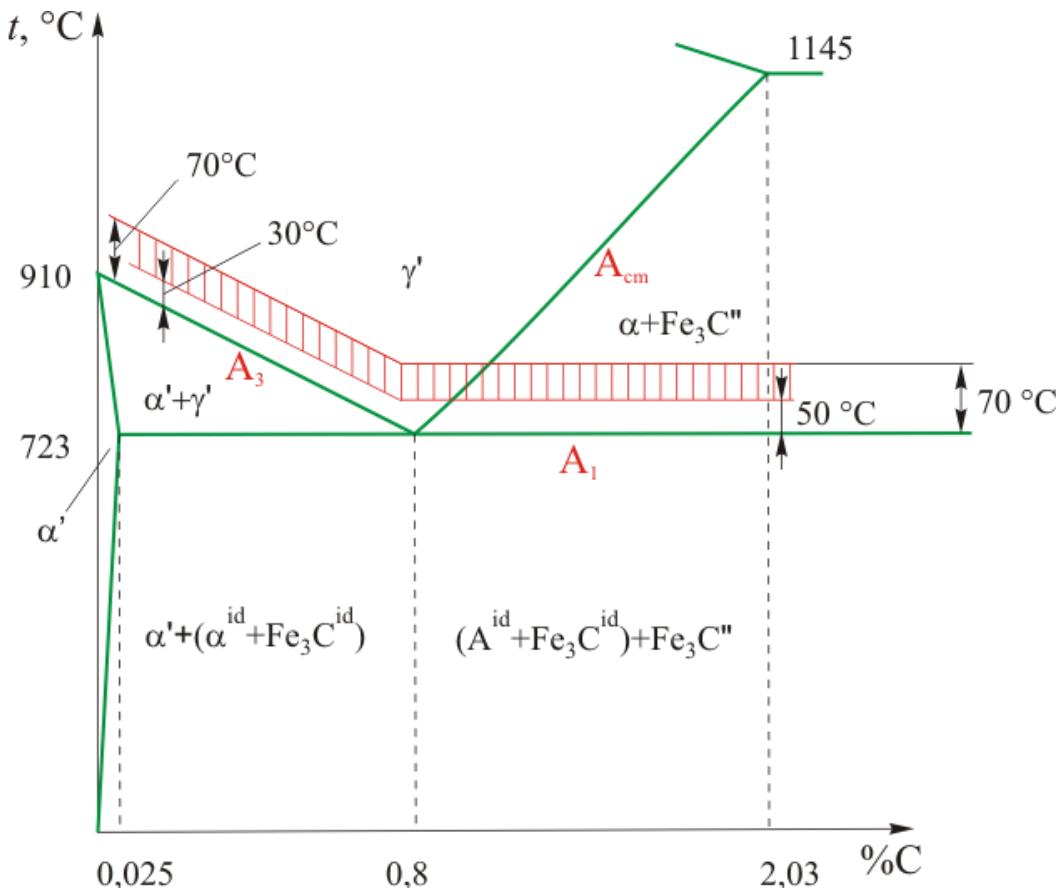
U Burnsovom dijagramu se uočava:

- do sadržaja $C = 0,5 \%$, tvrdoća raste vrlo naglo;
- za $C > 0,5 \%$, uočava se blaži porast tvrdoće;
- za $C > 0,9 \%$, porast tvrdoće se praktički potpuno zaustavlja, što se može objasniti slijedećim komentarom: Povećanjem sadržaja ugljika iznad $0,9 \%C$ povećava se količina tvrdog željeznog karbida, ali i mekog ostatnog austenita zbog čega nema porasta tvrdoće nakon kaljenja.

Poznato da je temperatura t_A cca $50^\circ C$ iznad A_3 , odnosno A_1 prema slici 2.

Za određivanje HRC tvrdoće zakaljenog čelika (kritičnom ili većom brzinom hlađenja) o sadržaju ugljika (vrijedi do 0,6 %C) koristi se empirijski izraz (1):

$$HRC = 35,395 + 6,99 \cdot C + 312,3 \cdot C^2 - 821.744 \cdot C^3 + 1015.479 \cdot C^4 - 538.346 \cdot C^5 \quad (1)$$



Slika 2. Prikaz područja pravilnih temperatura austenitizacije t_A prigodom kaljenja nelegiranih čelika u metastabilnom Fe – C dijagramu

Kod **nadeutektoidnih čelika** se ne vrši potpuna austenitizacija prigodom kaljenja (izradak se ne zagrijava iznad A_{cm} temperature) i to iz sljedećih razloga:

- s ekonomski strane nije opravdano;
- cementit Fe_3C ima nešto veću tvrdoću od martenzita M;
- dobilo bi se grublje zrno austenita A, a time nakon kaljenja i grublji martenzit M;
- nerastvoreni cementit Fe_3C prigodom kaljenja predstavlja klice oko kojih nastaje stoga finiji martenzit M;
- konačno zagrijavanjem iznad A_{cm} temperature ugljik bi se potpuno rastvorio u austenitu A, pa bi nakon kaljenja ostala relativno velika količina nepretvorenog (ostatnog) austenita A^o
- .



Na pravilnoj temperaturi austenitizacije $t_A = 50 \div 70 \text{ } ^\circ\text{C}$ iznad Ac_1 , austenit A nadeutektoidnog čelika ne može rastvoriti više od nekih 0,9 %C, pa od njega kaljenjem nastaje M koji ima tvrdoću pripadajuću tom sadržaju ugljika.

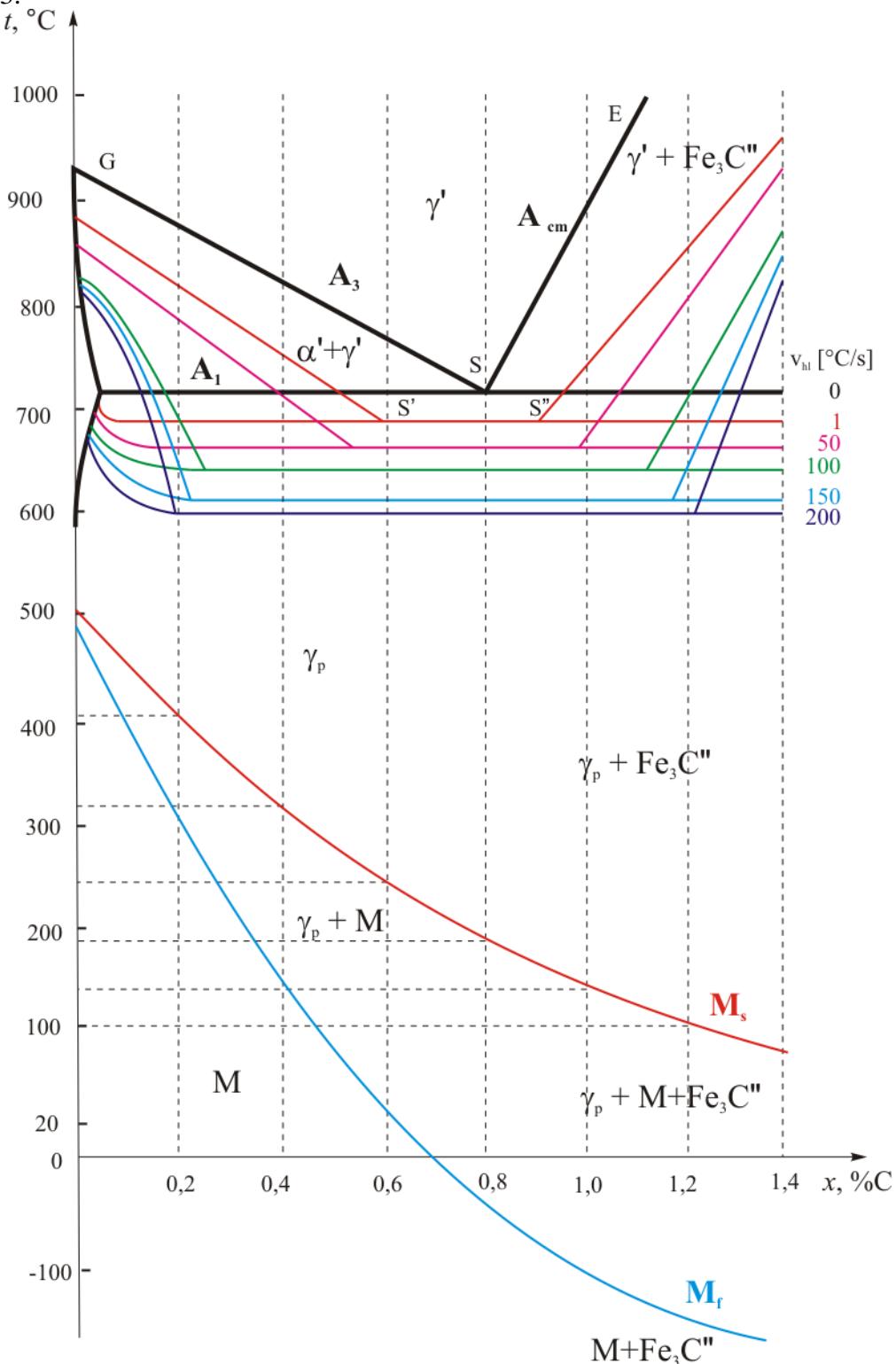
Prostorna dimenzija iglice martenzita M također ovisi o sadržaju ugljika:

- sadržaj od 0,2 \div 0,3 %C daje grublji martenzit M;
- sadržaj od 0,4 \div 0,5 %C daje sitniji i finiji martenzit M;
- veći sadržaj ugljika, npr. u alatnim čelicima, daje martenzit M koji nema izraženu igličastu strukturu, tj. izrazito je usitnjен.

Utjecaj sadržaja ugljika na strukturu nastalog martenzita je implicitno vezan uz veličinu zrna austenita A. Čelik s nižim sadržajem ugljika C grijе se na višu temperaturu austenitizacije t_A na kojoj zrno austenita A bude krupnije što rezultira grubljim martenzitom M.

B) UTJECAJ SADRŽAJA C NA TEMPERATURE M_s i M_f

Veći sadržaj ugljika C čini austenit A stabilnijim i postojanijim, prema Uptonovom dijagramu na slici 3.



Slika 3. Uptonov dijagram



Promatranjem Uptonovog dijagrama na slici 3 uočava se:

- iznad sadržaja ugljika $C = 0,6\%$ krivulja završetka pretvorbe M_f pada ispod $20^\circ C$ (ispod sobne temperature). To znači da se čitava količina austenita A ne pretvara u martenzit M, pa u čeliku na sobnoj temperaturi ima još zaostalog austenita A_z . Ovaj zaostali austenit A_z smanjuje tvrdoću zakaljenog čelika, pa je poželjno da ga bude što je moguće manje;
- dakle, budući da je količina zaostalog austenita funkcija brzine hlađenja, tj. temperature rashladnog sredstva $A_o = f(t_k)$, sniženjem temperature kaljenja t_k , tj. temperature rashladnog sredstva, može se smanjiti količina ostatnog austenita A_o ;
- količina ostatnog austenita A_o ovisi i o brzini hlađenja u intervalu između M_s i M_f temperature: čim je ta brzina veća tim je manja količina A_z ;
- ukoliko je sadržaj ugljika C veći, utoliko je veći i volumen nastalog martenzita M: visokougljični čelik može imati i do 1,5 % povećan volumen martenzita M.

Za određivanje martenzit start temperature tj. početka transformacije austenita u martenzit, može se koristiti empirijski izraz (2).

$$M_s(\text{ }^\circ\text{C}) = 539 - 432 \cdot \%C - 30,4 \cdot \%Mn - 17,7 \cdot \%Ni - 12,1 \cdot \%Cr - 7,5 \cdot Mo \quad (2)$$

C) UTJECAJ LEGIRNIH ELEMENATA U ČELIKU

O utjecaju legirnih elemenata u čeliku može se istaknuti:

- legiranjem se tvrdoća poveća samo malo, i to ne tvrdoća martenzita već se stvaraju karbidi koji imaju tvrdoću veću i od samog martenzita;
- legirni elementi u pravilu povećavaju svojstvo prokaljivosti (snižavajući kritičnu brzinu kaljenja - npr. Ni, Mn, Cr), što omogućuje primjenu blažeg rashladnog sredstva (sporije hlađenje) pri kaljenju → manja zaostala naprezanja;
- legirni elementi utječu na postojanost mehaničkih svojstava kod povišenih temperatura (npr. kod vatrootpornih čelika, alatnih čelika za topli rad, brzoreznih čelika);
- ako se karbidi ne raspadnu prilikom austenitizacije, tj. ako se čitava količina ugljika C ne rastvori u austenitu, onda legirni elementi ne utječu na prokaljivost.

D) UTJECAJ INTENZITETA HLAĐENJA „H“ RASHLADNOG SREDSTVA

- ukoliko je intenzitet hlađenja rashladnog sredstva H veći, odvođenje topline s površine izratka je brže, a tim je brže i hlađenje izratka;
- veće brzine hlađenja povećavaju dubinu prokaljivanja (prokaljivost) do koje se može smatrati da je austenit A prešao u M;
- gibanje rashladnog sredstva također igra veliku ulogu (npr. mirujući zrak ili struja zraka). Relativnim gibanjem rashladnog sredstva u odnosu na izradak može se hlađenje ubrzati. Ovo gibanje sprječava i stvaranje plinskog omotača, tj. pojавu stvaranja parnih mjehurića oko užarenog izratka (tzv. Leidenfrostov fenomen) koji su nepoželjni izolacijski sloj (slabo provođenje topline);
- vrijeme držanja izratka u rashladnom sredstvu (dok se ne ohladi jezgra uzorka) je od velike važnosti: postoje orijentacijski empirijski dijagrami za procjenu vremena držanja. U praksi se najčešće vrijeme držanja određuje na temelju iskustva.

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Upute za vježbe iz kolegija Materijali 2



E) VERIFIKACIJA BURNSOVOG DIJAGRAMA

Zadatak: Utjecaj sadržaja ugljika u čeliku dokazati laboratorijski pomoću tri uzorka iz nelegiranog čelika s rastućim sadržajem ugljika, te jednim uzorkom iz legiranog čelika. Epruvete se odrežu od okrugle šipke dimenzija približno $\phi 25 \times 10$ mm. Kaljenje svakog pojedinog uzorka treba obaviti s pravilne temperature austenitizacije t_A naglim ohlađivanjem u slanoj vodi uz intenzivno miješanje.

Nakon kaljenja, čeone površine epruveta poravnati i očistiti od oksida brušenjem i poliranjem uz intenzivno hlađenje. Nakon pripreme čeonih površina izmjeriti prosječne tvrdoće svakog pojedinog uzorka.

Po mogućnosti tretirati uzorke slijedećeg sadržaja ugljika C:

Uzorak br.	Oznaka čelika po standardu			Sadržaj C u čeliku u %	Tvrdoća prije kaljenja	Tvrdoća nakon kaljenja	Očekivana tvrdoća prema Burnsovom dijagramu
	HRN	DIN	EN				
1	Č.1221	Ck15	2C15	0,15			
2	Č.1531	Ck45	2C45	0,45			
3	Č.1941	100W1	100W1	1,00			
4	Č.4732	42CrMo4	42CrMo4	0,42			

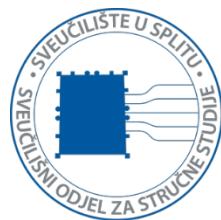
Uzorak br.	Oznaka čelika po standardu	Očekivani fazni sastav			
		EN			
1	2C15				
2	2C45				
3	100W1				
4	42CrMo4				

Uzorak br.	Tvrdoća prije kaljenja (HV)				HRC	Tvrdoća nakon kaljenja (HV)				HRC
	Mjer. 1	Mjer. 2	Mjer. 3	Sred.vr.		Mjer. 1	Mjer. 2	Mjer. 3	Sred.vr.	
1										
2										
3										
4										

Zadatak:

- Sastaviti izvještaj o izvođenju laboratorijske vježbe s vlastitim zapažanjima.
- U izvještaj upisati rezultate dobivene ispitivanjima.
- Nacrtati teoretski Burnsov dijagram i u njemu ucrtati rezultate (točke) dobivene pokusom.
- Za svaki uzorak (prema izmjerenim tvrdoćama i izvršenoj toplinskoj obradi) procijeniti fazni sastav prije i nakon kaljenja.
- Iznijeti zaključke i vlastita zapažanja

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 4

**RAZMATRANJE I VERIFIKACIJA
TTT - DIJAGRAMA**



RAZMATRANJE I VERIFIKACIJA TTT - DIJAGRAMA

A) ZAŠTO SU POTREBNI TTT - DIJAGRAMI

Za praktično provođenje pravilne toplinske obrade čelika nužno je u prvom redu do srži poznavati metastabilni Fe – C (Fe – Fe₃C) dijagram. Međutim, to nije dovoljno i to iz sljedećih razloga:

- a) Fe – Fe₃C dijagram vrijedi samo za idealni (metastabilni) slučaj skrućivanja i hlađenja, kada se u čeliku nalaze samo dvije komponente (Fe i C). U praksi su čelici namijenjeni toplinskoj obradi legirani s više komponenti (pored redovitih pratilaca Mn i Si mogu sadržavati Cr, Mo, V itd.);
 - b) metastabilni Fe – Fe₃C dijagrami predstavljaju ipak rezultat ravnotežne pretvorbe, a za toplinsku obradu je zapravo važno promatrati izvan ravnotežna stanja;
 - c) metastabilni Fe – Fe₃C dijagram ne daje uvid u kinetiku pretvorbe faza jer ne sadrži parametar vrijeme kao varijablu.
- Ipak iz metastabilnog Fe – Fe₃C dijagraama uzimaju se neophodno potrebni podatci i za svaku koncentraciju (%C) se formiraju novi, tzv. TTT – dijagrami. Poznato je da su sve fazne pretvorbe difuzijske tj. funkcija su temperature, ali i vremena (trajanja pretvorbe). To znači da će pretvorba djelomično ili potpuno izostati, ukoliko je vrijeme za difuziju prekratko! Ta činjenica je upravo temelj za toplinsku obradu.

Dakle, pomoću TTT – dijagraama (od engl. Time Temperature Transformation = vrijeme, temperatura, pretvorba) razmatra se ovisnost fazne pretvorbe (austenita) o temperaturi t i vremenu τ , tj.:

$$\text{pretvorba austenita} = f(t, \tau)$$

B) VRSTE TTT - DIJAGRAMA

S obzirom na način provođenja faznih promjena koje nastaju (bržim) hlađenjem austenita A u čeliku, razvile su se dvije vrste TTT - dijagrama i to:

- a) **kontinuirani** (anizotermički)
- b) **izotermički** (diskontinuirani)

Tako je za svaki pojedini čelik na raspolaganju jedan kontinuirani i jedan izotermički TTT – dijagram (npr. ATLAS ZUR WARMEBEHANDLUNG DER STAHL, Max-Planck-Institut, Dusseldorf, ili baza podataka čelika na internet stranicama željezare Ravne <http://sij.metalravne.com/steelselector/selector.html>).

C) VERIFIKACIJA TTT - DIJAGRAMA

Na laboratorijskim vježbama, naravno nije moguće prezentirati konstrukciju TTT – dijagrama, zbog nedostatka skupe i sofisticirane opreme potrebne za tu svrhu. Stoga se radije pristupa verifikaciji postojećih TTT – dijagrama dobivenih u renomiranim istraživačkim laboratorijima.

Zadatak:

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Upute za vježbe iz kolegija Materijali 2



a) Verifikaciju **kontinuiranog TTT** – dijagrama jednog čelika poznatog kemijskog sastava izvršiti na slijedeći način:

- 1) odrezati 4 jednakе epruvete (cilindrične $\phi 25 \times 10$ mm ili Charpy $55 \times 10 \times 10$ mm) od raspoloživog čelika i zajedno zagrijati na pravilnu temperaturu t_A i zatim:
 - prvu epruvetu naglo ohladiti u vodi (po potrebi u slanoj) sobne temperature;
 - drugu epruvetu naglo ohladiti u ulju sobne temperature;
 - treću epruvetu polagano ohladiti na mirujućem zraku (položenu na opeku zagrijanu u peći zajedno s uzorkom);
- 2) svakoj epruveti izmjeriti pripadajuću tvrdoću nakon hlađenja i usporediti s približno jednakom tvrdoćom u kružiću na dnu dotične krivulje hlađenja u kontinuiranom TTT – dijagramu tretiranog čelika (npr. iz spomenutog ATLASA)

b) Verifikaciju **izotermičkog TTT** – dijagrama istog čelika izvršiti na slijedeći način:

- 1) jednu (četvrtu) epruvetu nakon austenitizacije naglo prenijeti u olovnu kupku zagrijanu na temperaturu cca 400°C (nešto iznad M_s) i držati dok se pretvorba u bajnit potpuno i sigurno ne završi (trajanje držanja na odabranoj izotermi očitati u pripadajućem izotermičkom TTT – dijagramu tretiranog čelika), a zatim ohladiti na zraku do sobne temperature.
- 2) i ovoj epruveti izmjeriti pripadajuću tvrdoću nakon hlađenja i usporediti s približno jednakom tvrdoćom u kružiću na razini temperature dotične izoterme u izotermičkom TTT – dijagramu tretiranog čelika (npr. iz spomenutog ATLASA)

c) Sve 4 Charpy epruvete ispitati na Charpy uređaju u cilju određivanja pripadajuće žilavosti.

d) Tabelarno prikazati rezultate ispitivanja

Uzorak br.	Oznaka čelika po standardu			Sadržaj ugljika C u čeliku %	Tvrdoća HRC prije toplinskog tretmana i fazni sastav	Tvrdoća nakon toplinskog tretmana (hlađenja) i fazni sastav	Žilavost K J
	HRN	DIN	EN				
1							
2							
3							
4							

Uzorak br.	Tvrdoća HRC					
	Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3	Mjerenje 4	Mjerenje 5	Srednja vrijednost
1						
2						
3						
4						

Zadatak:

Sastaviti izvještaj o izvođenju laboratorijske vježbe s vlastitim zapažanjima:

- Odrediti pravilnu temperaturu austenitizacije uzorka.
- Rezultate dobivene ispitivanjima prikazati tablično i u odgovarajućem dijagramu.
- Skicirati kvantitativno priložene izotermički i anizotermički TTT dijagram te u iste ucrtati odgovarajuće krivulje hlađenja tretiranih uzoraka.
- Komentirati fazni sastav prije i nakon toplinske obrade.
- Iznijeti zaključke i vlastita zapažanja.

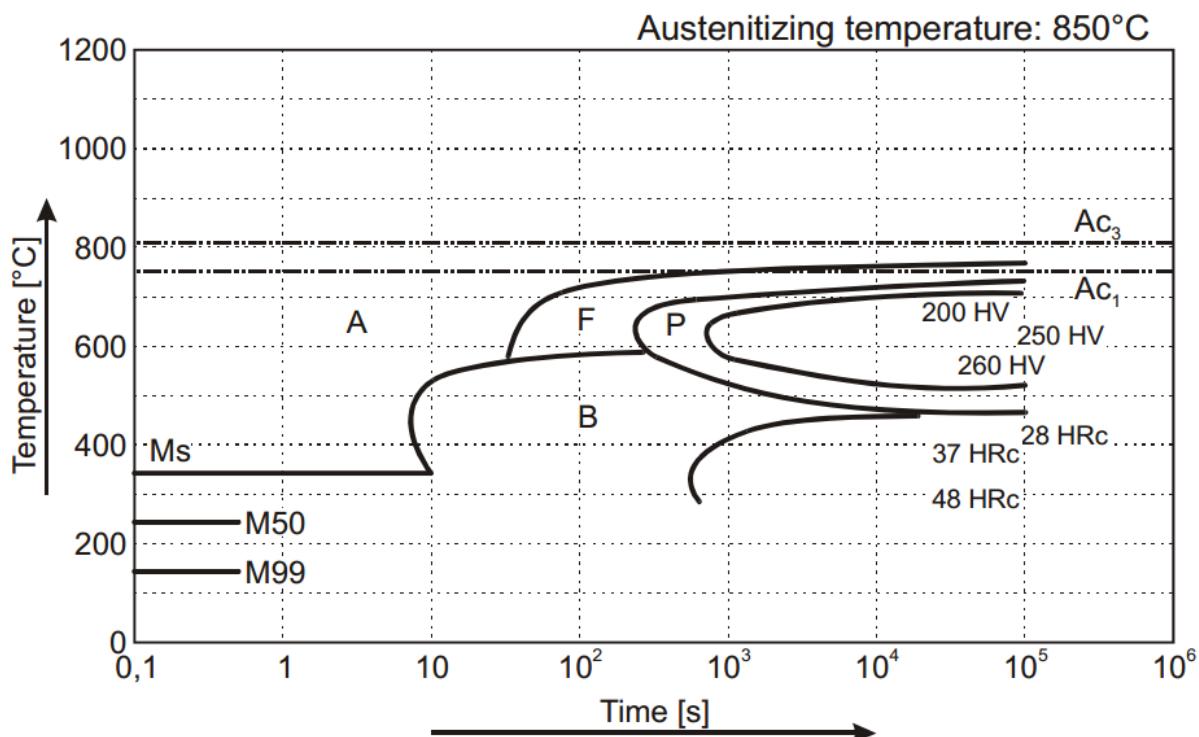
Prilog: Pripadajući TTT – dijagrami i metalografske slike

Prilog A1 – Izotermički TTT dijagram za čelik EN 42CrMo4 (Č.4732)

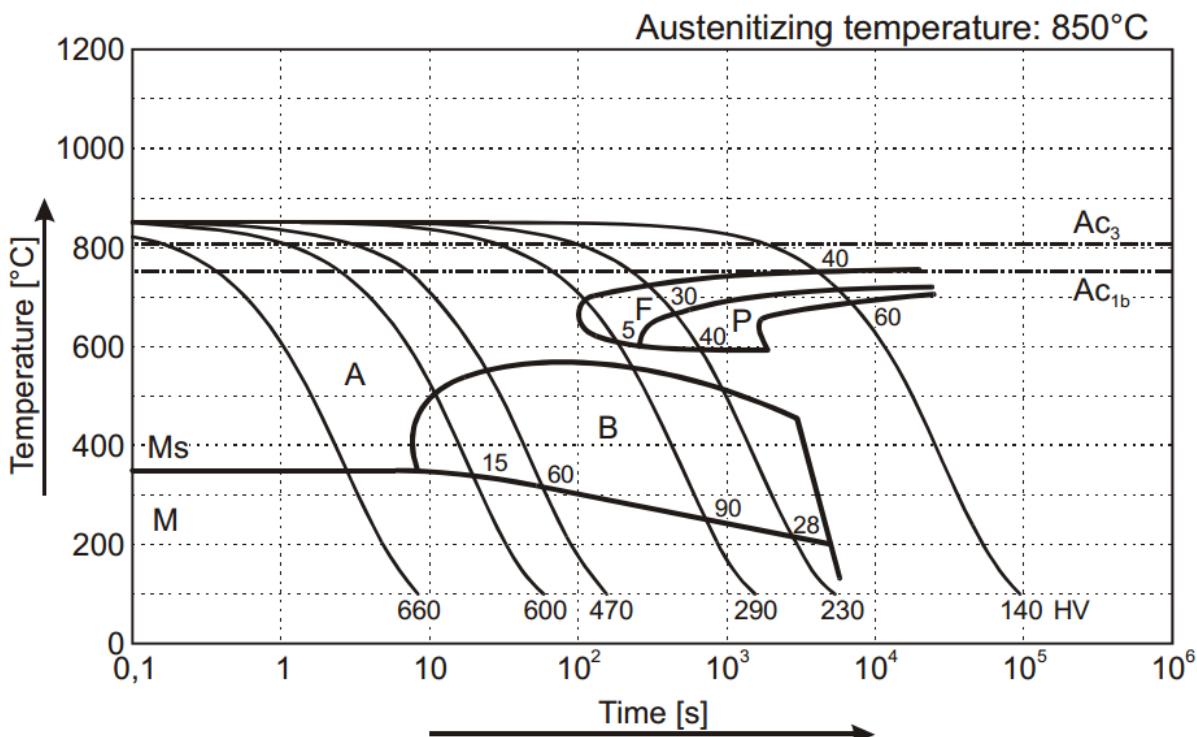
Chemical composition:

(Typical analysis in %)

C	Cr	Mo					
0,42	1,10	0,25					



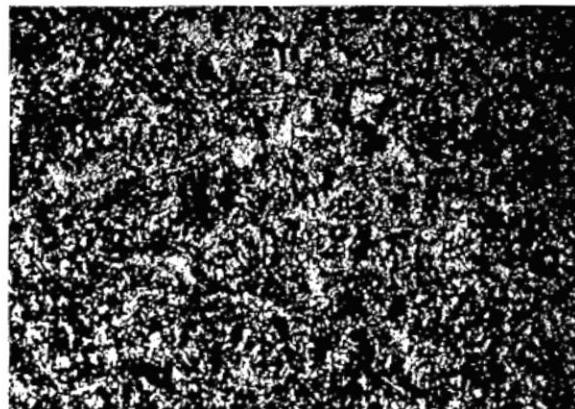
Prilog B1 – Kontinuirani TTT dijagram za čelik EN 42CrMo4 (Č.4732)



Prilog C1 – Metalografske slike čelika EN 42CrMo4 (Č.4732)



Umwandlungstemperatur 650° C
20% Ferrit, 80% Perlit
Härte 240 HV



Umwandlungstemperatur 400° C
Zwischenstufengefüge
Härte 35 HRc

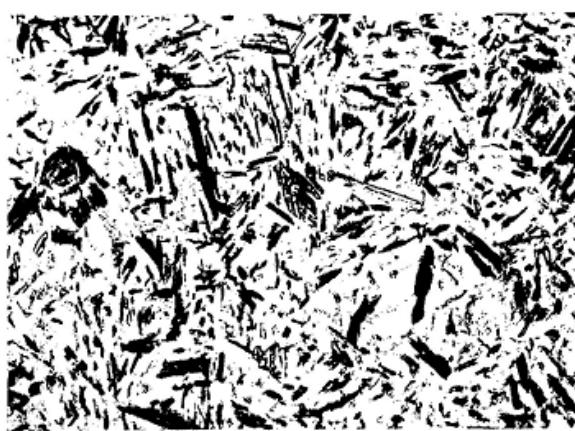
kontinuierlich



30% Ferrit, 70% Perlit
Härte 230 HV



7% Ferrit, 5% Perlit, 85% Zwischenstufengefüge,
3% Martensit
Härte 28 HRc

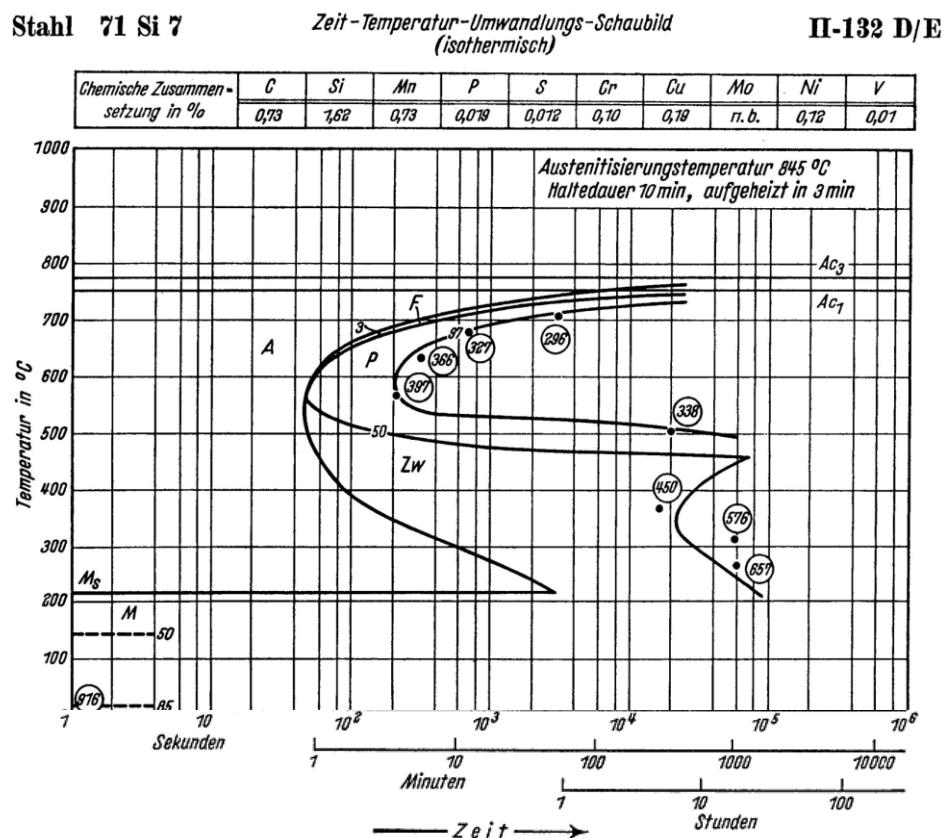


3% Zwischenstufengefüge, 97% Martensit
Härte 52 HRc

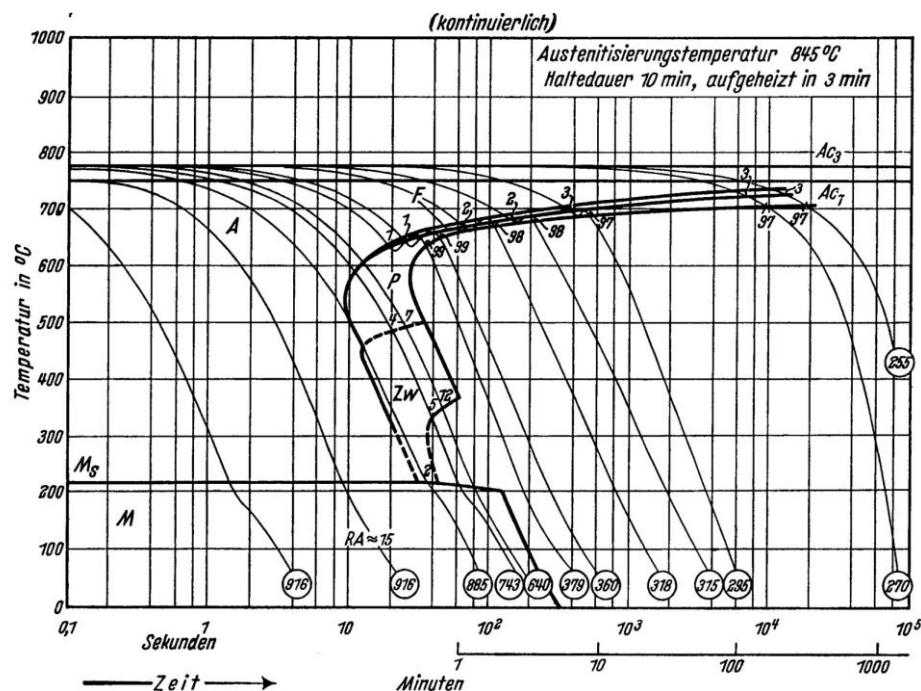


Martensit
Härte 58 HRc

Prilog A2 – Izotermički TTT dijagram za čelik EN 71Si7 (Č.2135)



Prilog B2 – Kontinuirani TTT dijagram za čelik EN 71Si7 (Č.2135)



Prilog C2 – Metalografske slike čelika EN 71Si7 (Č.2135)

Za izotermičko (diskontinuirano) hlađenje sa $t_A=845\text{ }^\circ\text{C}$



Umwandlungstemperatur $630\text{ }^\circ\text{C}$
3 % Ferrit, 97 % Perlit
Härte 366 HV



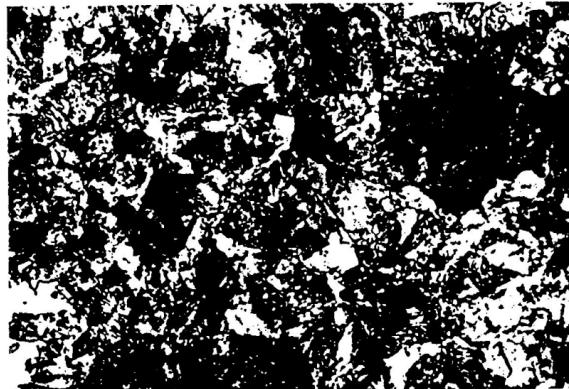
Umwandlungstemperatur $310\text{ }^\circ\text{C}$
Zwischenstufengefüge
Härte 576 HV

Za anizotermičko (kontinuirano) hlađenje sa $t_A=845\text{ }^\circ\text{C}$

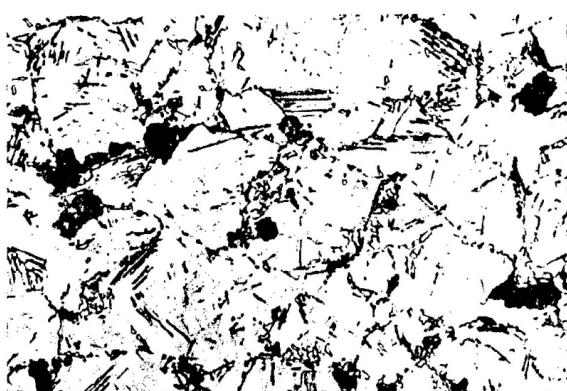
kontinuierlich



3 % Ferrit, 97 % Perlit
Härte 255 HV



1 % Ferrit, 99 % Perlit
Härte 379 HV

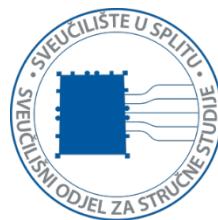


7 % Perlit, 12 % Zwischenstufengefüge,
81 % Martensit
Härte 640 HV



Martensit und Restaustenit
Härte 916 HV

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 5

GRIJANJE

GRIJANJE

A) ODREĐIVANJE PARAMETARA GRIJANJA PRIGODOM TOPLINSKE OBRADE ČELIKA

Cilj ove vježbe je steći sposobnost određivanja parametara grijanja prigodom toplinske obrade različitih čelika, a u cilju postizanja upravo željenih svojstava izratka.

To će se odraditi u koracima kroz sljedeći **zadatak**:

Za jedan konstrukcijski element (npr. osovinu) od nelegiranog ugljičnog čelika za poboljšanje i to EN 2C45 (HRN Č1531), te za jedan pneumatski alat za hladni i vrući rad od čelika EN 60WCrV7 (HRN Č6444) treba odrediti:

- 1) temperaturu austenitizacije t_A ;
- 2) koje dimenzije presjeka je moguće odabrati prije grijanja izradaka na temperaturu t_A , ako se želi nakon kaljenja na **površini** osovine od EN 2C45 postići tvrdoća cca 320 HV, a kod alata od EN 60WCrV7 u **jezgri** tvrdoća cca 670 HV;
- 3) vrijeme i način grijanja do temperature t_A ;
- 4) vrijeme držanja na temperaturi t_A ;
- 5) nacrtati odgovarajući dijagram pripadajuće toplinske obrade za oba čelika u istim koordinatama, tj. t , °C - τ , min.

NAPOMENA: a) prepostaviti da se konstrukcijski element zagrijava u **solnoj kupki**, a da se alat zagrijava u **komornoj peći**;

b) koristiti pripadajuće TTT – dijagrame za pojedini čelik kao i ostale pripadajuće dijagrame, formule i tablice u Prilogu.

A1) IZVOĐENJE VJEŽBE

1) Određivanje temperature austenitizacije t_A :

Iz tablica u priručniku (npr. B.Kraut) za **EN 2C45 (HRN Č1531)** se pronađazi:

$t_A = 820 - 850$ °C za hlađenje u vodi (**v**),

$t_A = 830 - 860$ °C za hlađenje u ulju (**u**), a

za **EN 60WCrV7 (HRN Č6444)** nalazimo:

$t_A = 860 - 900$ °C za hlađenje u ulju (**u**).

2) Određivanje dimenzija presjeka prije grijanja izradaka na temperaturu t_A :

Iz **TTT – dijagrama u Prilogu 1.** pronađe se ili interpolira krivulja hlađenja koja odgovara postavljenom zahtjevu tvrdoće:

za **EN 2C45 (HRN Č1531)** to je upravo krivulja s tvrdoćom na površini 318 HV, a

za **EN 60WCrV7 (HRN Č6444)** to je krivulja s tvrdoćom u jezgri 669 HV (što je praktično 670 HV).

Sjecište krivulja hlađenja s s izotermom $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ daje:

za Č.1531 $K = 5\text{ s}$, a

za Č.6444 $K = 90\text{ s}$, gdje K predstavlja vrijeme hlađenja od temperature t_A do temperature $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Iz dijagrama na *slici 1 - POKROVNI LIST*, mogu se, u odnosu na vrijeme hlađenja K [s], odrediti tražene dimenzije izradaka:

za HRN Č1531 i $K = 5\text{ s}$.. površina (krivulja P – voda) daje dimenziju $D = 60\text{ mm}$ za osovinu, a

za HRN Č6444 i $K = 90\text{ s}$ jezgra (krivulja J – ulje) daje dimenziju $D = 85\text{ mm}$ za alat.

U nastavku se prihvaćaju - biraju dimenzije izradaka: *promjer osovine* $D = 60\text{ mm}$, a

promjer alata $D = 85\text{ mm}$.

3) Vrijeme i način grijanja do temperature t_A :

Iz ponuđenog raspona temperatura t_A za promatrane čelike se usvaja:

za Č.1531 $t_A = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$,

za Č.6444 $t_A = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ovdje treba istaknuti da se kod grijanja razlikuje:

- Stvarna brzina zagrijavanja koju daje grijati agregat (npr. komorna peć, solna kupka itd.), i
- Tehnološka brzina zagrijavanja.

a) Stvarna brzina zagrijavanja:

Prema *slici 2* se mogu pronaći krivulje brzina zagrijavanja određenog presjeka (dimenzija D u mm) u komornoj peći sa zrakom. Iz tog dijagrama se očita:

za HRN Č1531: $D = 60\text{ mm}$ i $t_A = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ vrijeme iznosi $\approx 1\text{ sat}$, a

za HRN Č6444: $D = 85\text{ mm}$ i $t_A = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ vrijeme iznosi također $\approx 1\text{ sat}$.

Ovoliko bi vremena proteklo ako se izradak stavi u peć unaprijed ugrijanu na temperaturu t_A . Peć je tada sposobna kroz ovo vrijeme zagrijati jedan izradak. Ako se istodobno želi grijati veći broj istovrsnih izradaka (npr. serijska proizvodnja), onda i razmještaj izradaka u peći utječe na brzinu zagrijavanja, prema *slici 4*. Npr. za zbijeni raspored okruglih izradaka su vremena zagrijavanja dvostruko duža, a za zbijeni kvadratni presjek su vremena četverostruko

duža. Razmagnuti raspored izradaka u komori omogućuje izlaganje većeg dijela oplošja izradaka izmjeni topline i trajanje zagrijavanja je kraće u odnosu na zbijeni raspored.

b) Tehnološka brzina zagrijavanja:

To je zapravo ona s kojom treba računati s obzirom na tretirani materijal. Utjecajni faktori su:

- 1) Ishodna struktura i tvrdoća čelika: Jednakomjernost ishodne strukture i tvrdoće po presjeku dopušta povećanje brzine zagrijavanja. Ako se čelik, nakon prethodne vruće prerade, polagano ohladio te zadržao nisku i jednoliku tvrdoću, može se brže zagrijavati nego li čelik s visokom i nejednolikom tvrdoćom.
- 2) Oblik i težina izratka: Postoji velika opasnost krivljenja, čak i pucanja ako se zagrijavaju predmeti komplikiranih oblika i promjenjivih presjeka.
- 3) Kemijski sastav čelika:

Što je veći % C i legirnih elemenata u čeliku, to je prema *slici 5* toplinska vodljivost lošija i u toliko veću pažnju treba posvetiti na polagano i jednoliko zagrijavanje!

Tako je npr. za legirane čelike i velike predmete uputno poduzeti **zagrijavanje u više stupnjeva**.

Također postoje i opasna temperaturna područja:

- **u intervalu od 250 °C do 600 °C** čelik još nema dovoljnu plastičnost, koja bi izjednačila unutrašnja naprezanja. Tek iznad 600 °C plastičnost je dovoljno visoka i opasnost pri grijanju prestaje;
- **interval oko temperature A₁**: kod naglog prijelaza ove temperature može doći do krivljenja izratka zbog fazne promjene, tj. zbog promjene volumena prigodom transformacije u austenit;
- **iznad 850 °C** prema *slici 5*, toplinska vodljivost postaje približno jednaka za sve čelike, pa se može zagrijavati brže jer je temperatura dovoljno iznad opasnih temperaturnih područja. Međutim, naglo zagrijavanje i visoke temperature utječu na ukrupnjenje (porast) zrna, a to opet smanjuje žilavost, što kod naglog hlađenja može izazvati pukotine.

Važan čimbenik u određivanju načina zagrijavanja jest tzv. **C – ekvivalent**.

Ova veličina predstavlja opću orijentacijsku vrijednost osjetljivosti na pukotine kod pojedinih vrsta čelika. Taj kompleksni utjecaj ugljika C i drugih legirnih elemenata izražava se sljedećom formulom:

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + \frac{V}{5} + \frac{Si - 0,5}{5} + \frac{Ti}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Al}{10}, \text{ gdje su: } C, Mn, Cr \dots \text{ u \% !}$$

Formula vrijedi uz sljedeća ograničenja maksimalnog sadržaja pojedinih elemenata:

Element	C	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Si	Ti	W	Al
Sadržaj u %	0,9	1,1	1,8	0,5	5	0,25	1,8	0,5	2	2

Ako je sadržaj pojedinog elementa u % veći od navedenoga, u gornju formulu se uvrštava maksimalna navedena vrijednost!

Što je C – ekvivalent veći, to je veća i osjetljivost na pukotine

Kemijski sastav tretiranih čelika:

Materijal	Kemijski sastav u %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W	
EN 2C45 (HRN Č1531)	0,44	0,22	0,66	0,022	0,029	0,15	-	-	0,02	-	
EN 60WCrV7 (HRN Č6444)	0,55	0,94	0,34	0,015	0,012	1,27	0,05	0,12	0,18	2,10	

Prema tome: za EN 2C45 (HRN Č1531):

$$C_{ekv} = 0,44 + \frac{0,66}{5} + \frac{0,15}{4} + 0 + 0 + \frac{0,02}{5} + \frac{0,22 - 0,5}{5} + 0 + 0 + 0 \Rightarrow C_{ekv} = 0,56$$

za EN 60WCrV7 (HRN Č6444):

$$C_{ekv} = 0,55 + \frac{0,34}{5} + \frac{1,27}{4} + \frac{0,05}{3} + \frac{0,12}{10} + \frac{0,18}{5} + \frac{0,94 - 0,5}{5} + 0 + \frac{2,1}{10} + 0 \Rightarrow C_{ekv} = 1,30$$

Prema slici 6 slijedi:

za EN 2C45 (HRN Č1531) promatra se krivulja za $C_{ekv} < 0,65$ prema kojoj za $D = 60$ mm na pripadajućoj apscisi očita vrijeme zagrijavanja osovine na temperaturu t_A koje ukupno iznosi 2,7 sati, uz jedno predgrijavanje na 680 °C;

za EN 60WCrV7 (HRN Č6444) promatra se krivulja za $C_{ekv} > 0,85$ prema kojoj za $D = 85$ mm na pripadajućoj apscisi (za $D = 100$ mm) očita vrijeme zagrijavanja alata na temperaturu t_A koje ukupno iznosi 9 sati, uz tri predgrijavanja i to na 200 °C, 400 °C i 680 °C.

Još neki utjecaji na brzinu zagrijavanja:

- sitnozrnati čelici se mogu zagrijavati brže zbog izraženijeg svojstva žilavosti;
- ishodna struktura i stanje čelika: npr. normalizirani ili meko žareni se čelik može zagrijavati brže nego li čelik koji je ostavljen ohlađen nakon vruće prerade i zbog toga vjerojatno zadržao unutrašnja naprezanja;
- žilaviji čelici se mogu brže zagrijavati, jer npr. hladno valjani ili zakaljeni čelici već na 200 °C pucaju ako ih u vruću peć stavljamo hladne.

4) Vrijeme držanja na temperaturi t_A :

Označe li se pojedini vremenski periodi s:

τ_{pe} = vrijeme zagrijavanja peći do temperature t_A

τ_{po} = vrijeme zagrijavanja površine izratka do temperature t_A

τ_{je} = vrijeme zagrijavanja jezgre izratka do temperature t_A

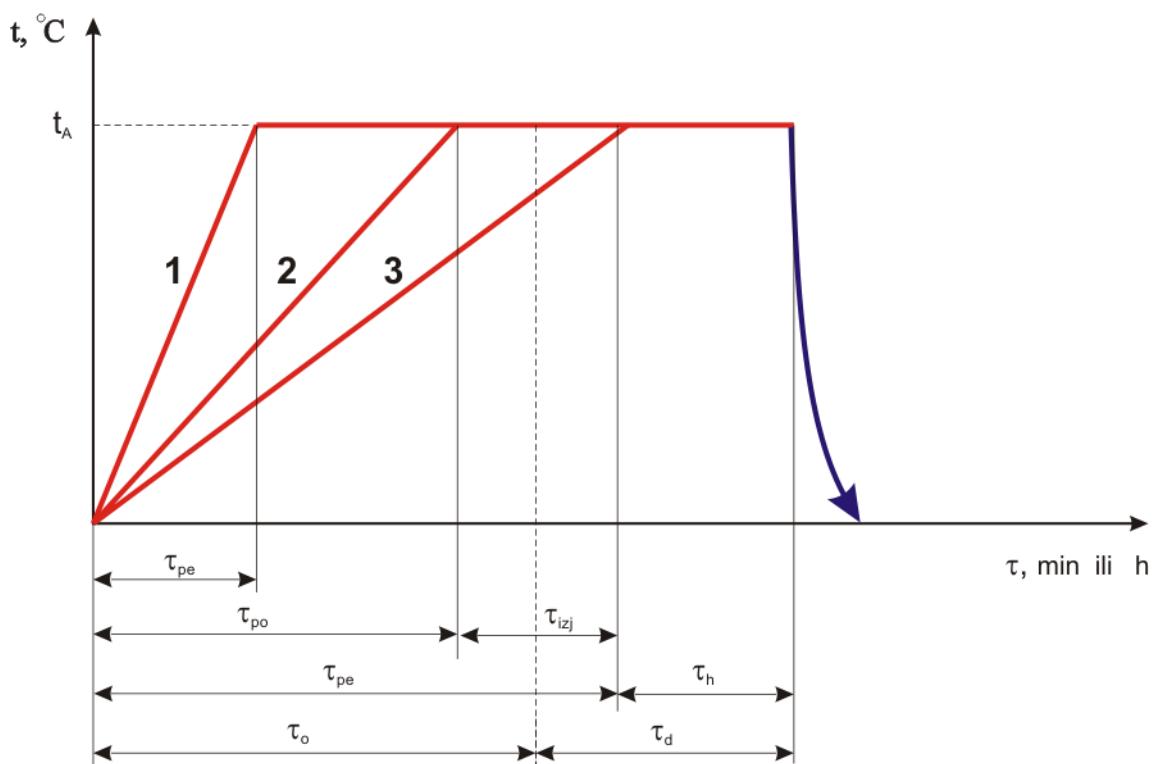
τ_{izj} = vrijeme potrebno za izjednačenje površine i jezgre na temperature t_A

τ_h = vrijeme potrebno za homogenizaciju strukture na temperature t_A

τ_o = vrijeme određeno iskustvom (okom) kao vrijeme izjednačenja temperature

τ_d = vrijeme držanja na temperaturi t_A ,

dobiva se sljedeći dijagram:



Određivanje vremena držanja T_d na temperaturi t_A :

- Za manje promjere uzima se prema empirijskoj formuli: $T_d = 20 + \frac{D}{2}$ u [min],

- Za velike promjere uzima se prema empirijskoj formuli: $T_d = \frac{1}{2} + \frac{D}{120}$ u [h].

Promjer D uvrštava se u [mm].

- Razvijena je i metoda po kojoj se vrijeme držanja T_d određuje iz dijagrama na *slici 3* i prema *slici 8* i to na sljedeći način:

za **EN 2C45 (HRN Č1531)**:

- koeficijent oblika: $k = 1$ (prema *slici 8* za osovinu),
- umnožak: $D \cdot k = 60 \cdot 1 = 60 \text{ mm}$;

Iz dijagrama na *slici 3* očita se za grijanje u solnoj kupki:

$T_d=25 \text{ [min]}$.

za **EN 60WCrV7 (HRN Č6444)**:

- koeficijent oblika: $k = 1$ (prema *slici 8* za okrugli alat, npr. probijač),
- umnožak: $D \cdot k = 85 \cdot 1 = 85 \text{ mm}$;

Iz dijagrama na *slici 3* očita se za grijanje u komornoj peći:

$T_d=85 \text{ [min]}$.

- Tanki komadi se brže griju, ali vrijeme homogenizacije strukture nije razmjerno kraće, nego je isto!
Zbog toga je vrijeme držanja T_d svedeno na 1 mm debljine, duže kod tanjih nego li kod debljih izradaka.
- Legirani čelici zahtijevaju duže držanje i zbog rastvaranja karbida, ali to opet ne izrazito, jer je njihova temperatura t_A već dosta viša!
Sve ovo u principu vrijedi i za popuštanje!

5) Crtanje dijagrama (hodografa) toplinske obrade za EN 2C45 (HRN Č1531) i za EN 60WCrV7 (HRN Č6444)

Dijagrame $t \text{ [} ^\circ \text{C} \text{] - } \tau \text{ [h]}$ za Č1531 (čelik za poboljšanje) i za HRN Č6444 (alatni čelik za rad u hladnom stanju) prikazati u istim koordinatama, radi lakše međusobne usporedbe parametara. Pripadajuću temperaturu visokog popuštanja prigodom poboljšanja osovine od HRN Č1531, kao i temperaturu niskotemperaturnog popuštanja alata od čelika HRN Č6444, odabrati također iz Strojarskog priručnika – B.Kraut!

Prilozi:

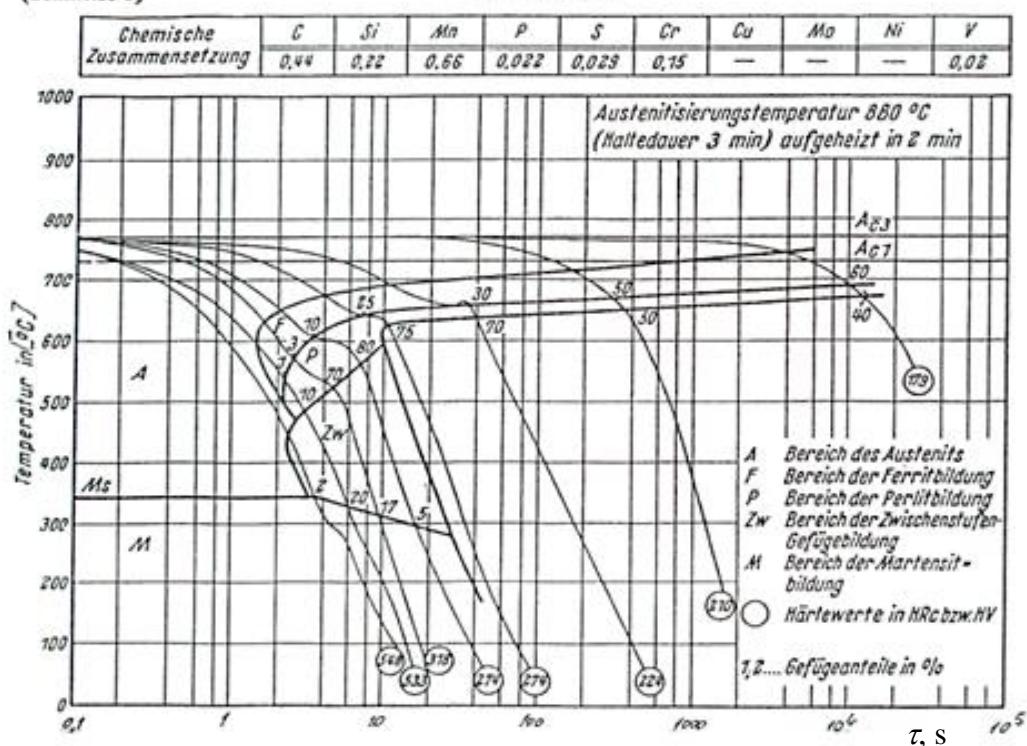
1. pripadajući TTT – dijagrami iz ATLASA;
2. pokrovni list;
3. priručni odlomci iz literature;

Kontinuirani TTT dijagram čelika EN 2C45 (HRN Č1531)

Stahl Ck 45
(Schmelze 3)

Zeit - Temperatur - Umwandlungs - Schaubild
(kontinuierlich)

II-101 E

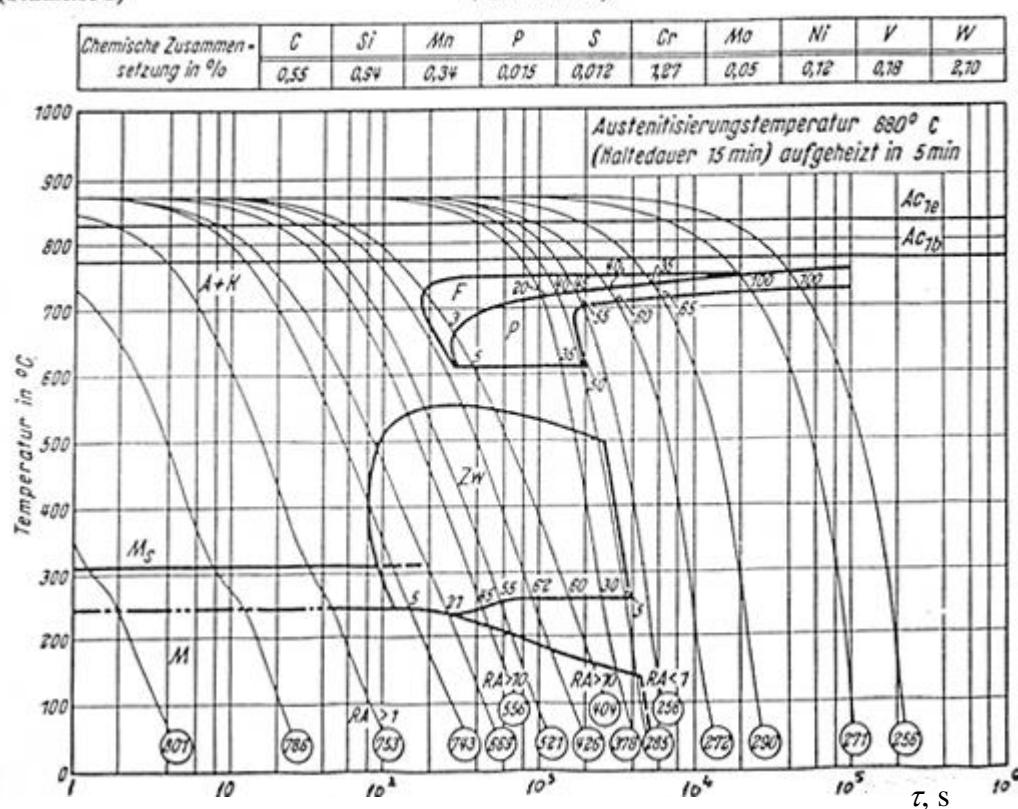


Kontinuirani TTT dijagram čelika EN 60WCrV7 (HRN Č6444)

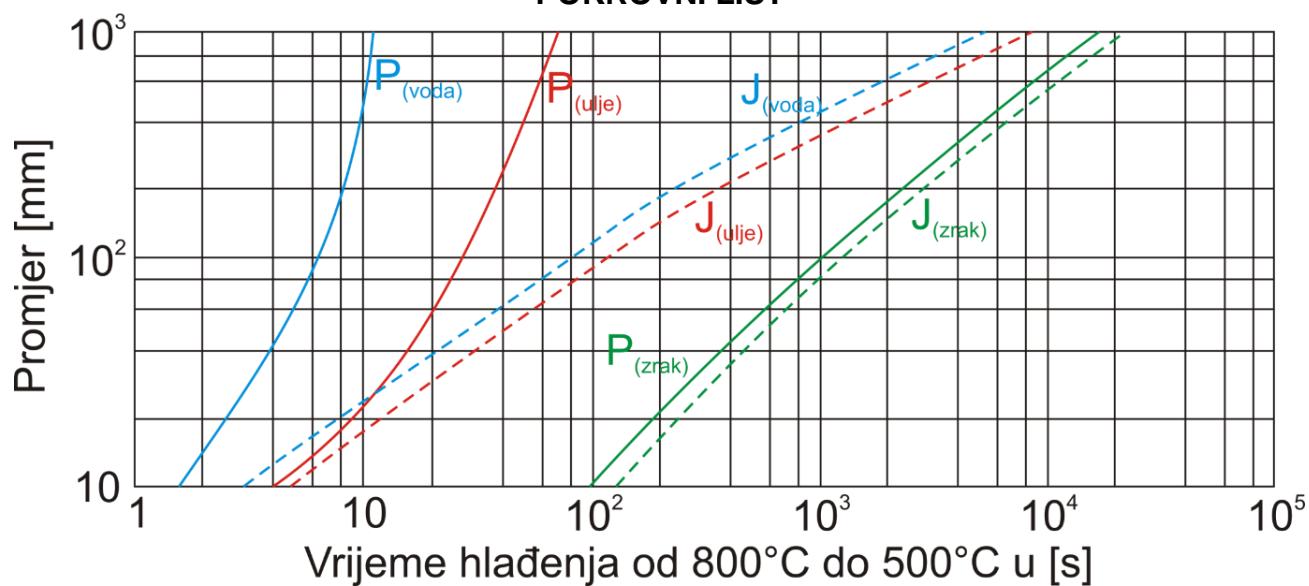
Stahl 60 WCrV 7
(Schmelze 2)

Zeit - Temperatur - Umwandlungs - Schaubild
(kontinuierlich)

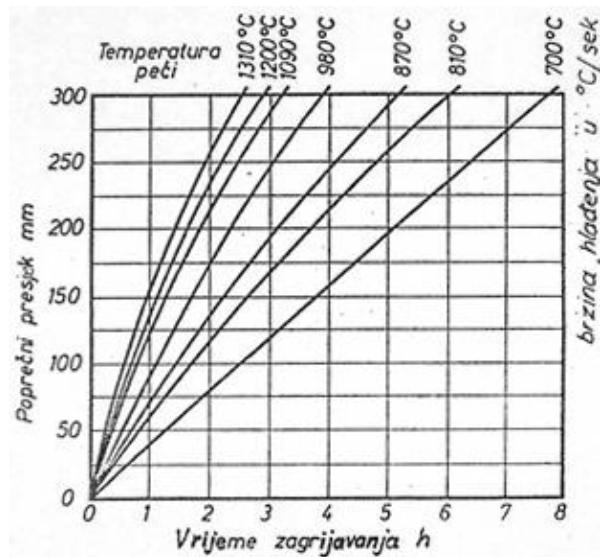
II-228 E



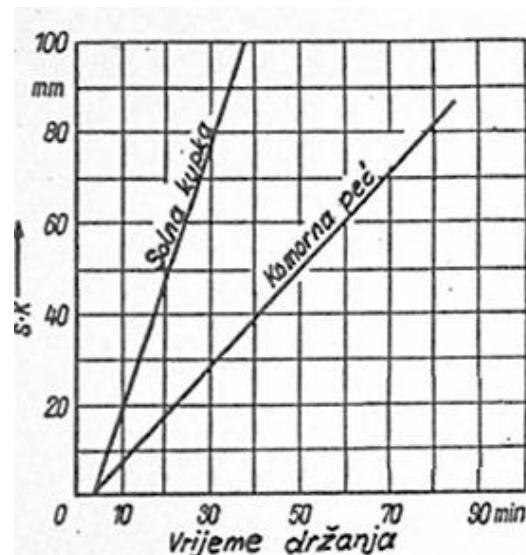
POKROVNI LIST



Slika 1



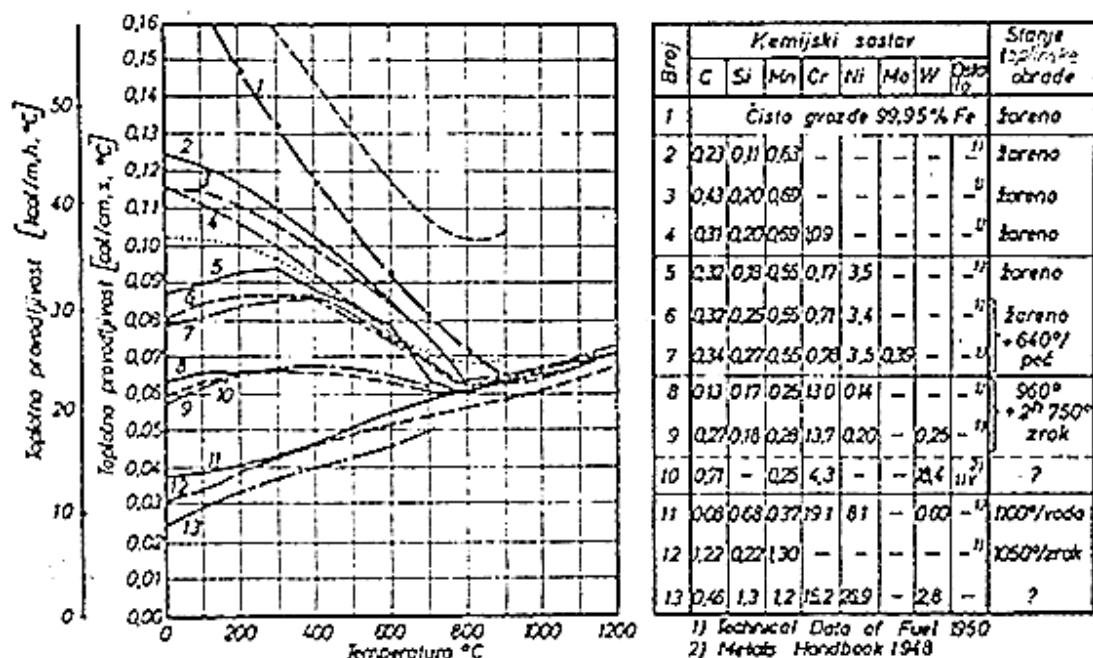
Slika 2



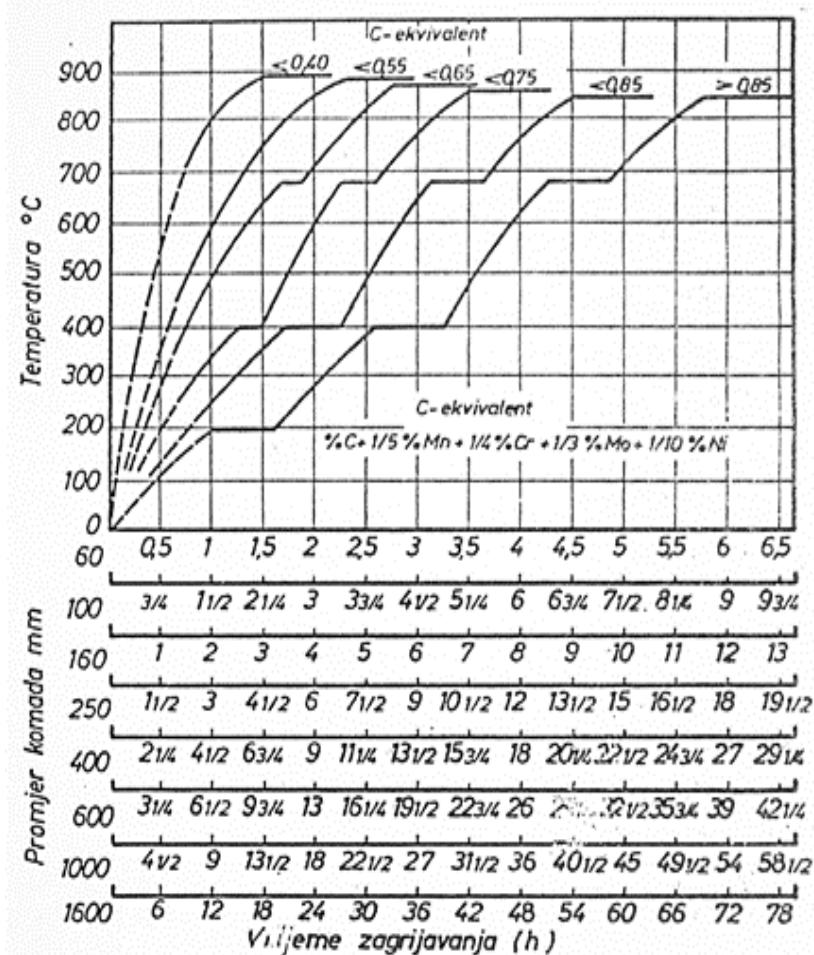
Slika 3

Okrugle šipke $d = 60 \text{ mm}$	Vrijeme zagrijava-nja (sat)	Kvadratne šipke $b = 60 \text{ mm}$	Vrijeme zagrijava-nja (sat)
	1		1,4
	1,4		2
	2		4

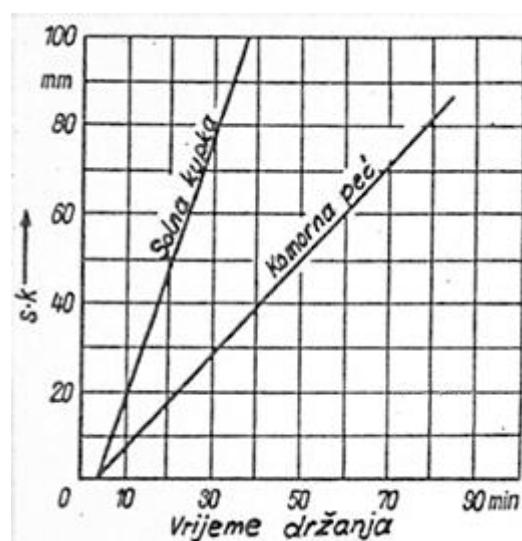
Slika 4



Slika 5



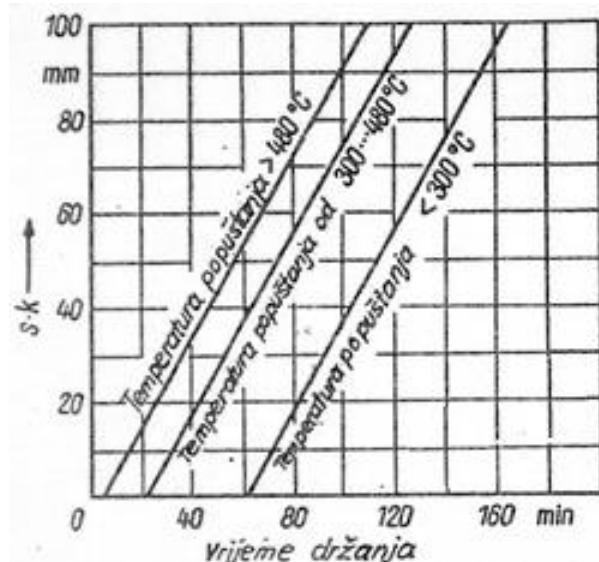
Slika 6



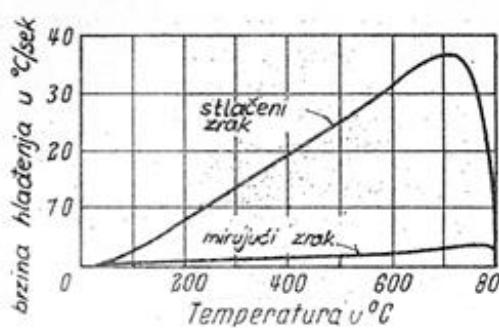
Slika 7

Oblik predmeta	Koeficijent oblika K
	0,70
	1,0
	1,5
	1,5
	2,0
	2,0 za kratke, otvorene cijevi 4,0 za dugu, na kraju zatvorene cijevi

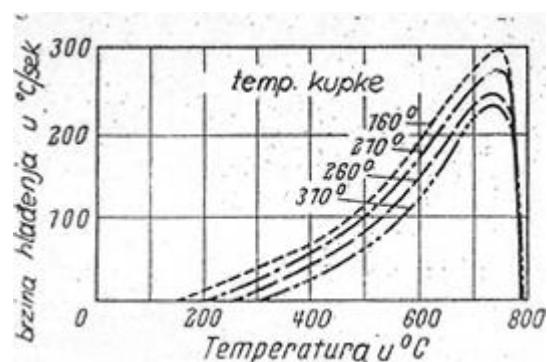
Slika 8



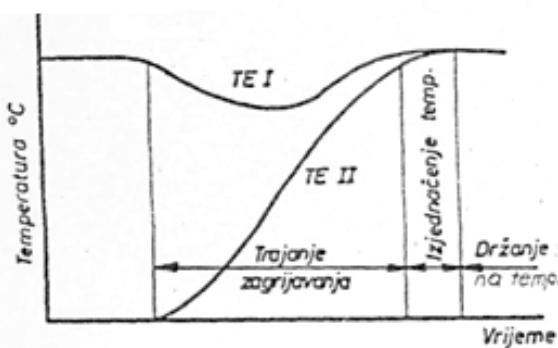
Slika 9



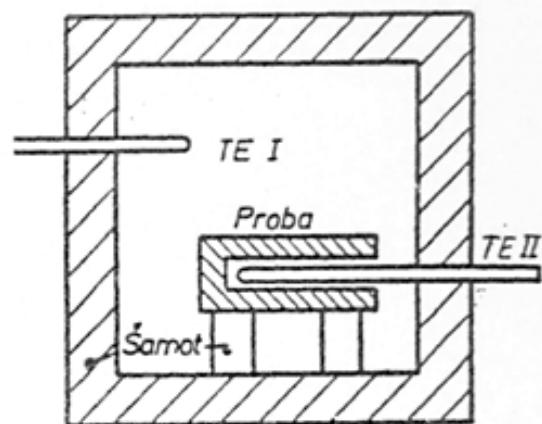
Slika 10



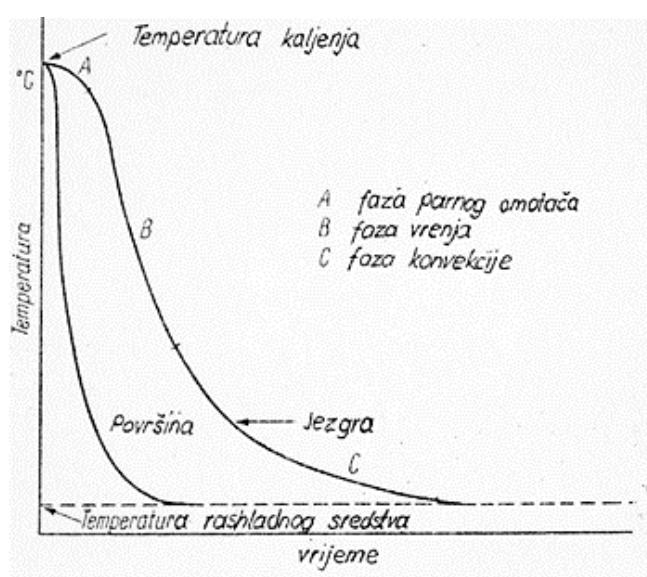
Slika 11



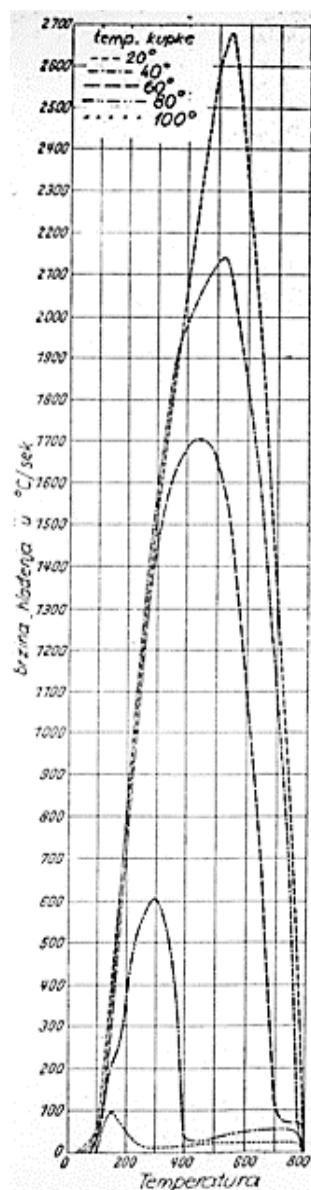
Slika 12



Slika 13

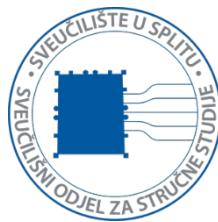


Slika 14



Slika 15

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 6

PROKALJIVOST

PROKALJIVOST

A) ISPITIVANJE PROKALJIVOSTI ČELIKA PO STANDARDU

A1) PRINCIP ISPITIVANJA

Ovim se ispitivanjem određuje svojstvo prokaljivosti čelika. Treba razlikovati pojma **zakaljenost** od pojma **prokaljivost**!

Zakaljenost je stanje u kojem se čelik nalazi, a prokaljivost je svojstvo čelika da uz određenu brzinu hlađenja nastaje martenzitna struktura do neke dubine.

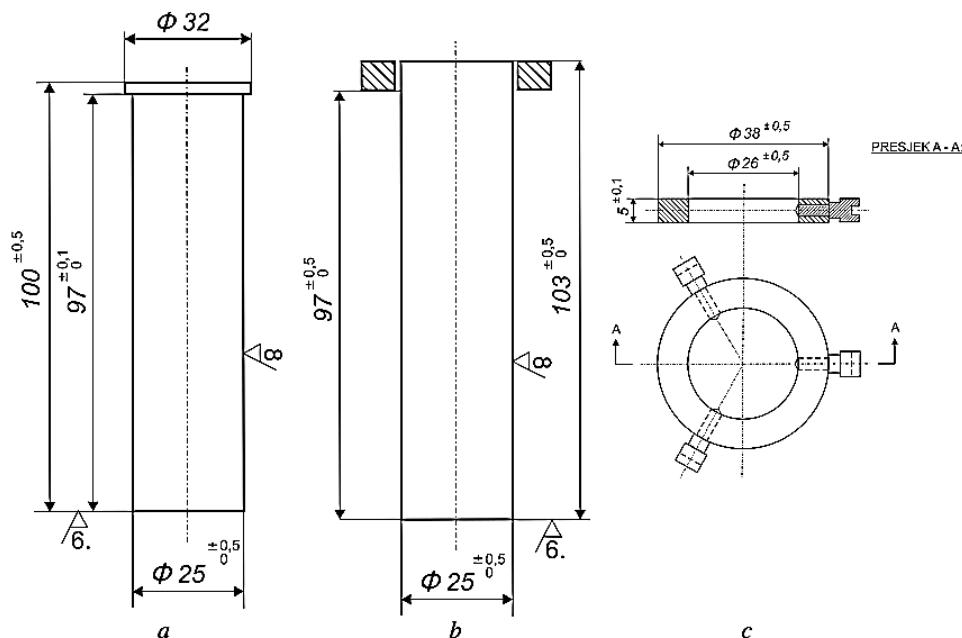
- **Zakaljenost** ovisi najviše o brzini hlađenja (martenzit M sam nastaje do one dubine u kojoj je još brzina hlađenja veća od kritične brzine hlađenja v_k za taj čelik, prema TTT - dijagramu tretiranog čelika).
- **Prokaljivost** raste s povećanjem sadržaja ugljika i legirnih elemenata izuzev Co. U manjoj mjeri je također ovisna o veličini zrna i o jednolikosti strukture.

Za međusobno uspoređivanje svojstva prokaljivosti različitih čelika, uputno je ispitivati uzorke jednakih presjeka i postupak provesti pri istim uvjetima hlađenja. Standardima je propisano ispitivanje prokaljivosti čelika po **Jominyu** (prema HRN C.A2.051 ili prema EN ISO 642). Ispitivanje po ovom postupku sastoji se u kaljenju vodom jednog kraja (čela) epruvete. Nakon ohlađivanja cijele epruvete mjeri se tvrdoća duž jedne njene izvodnice, pod uvjetima propisanim standardom.

A2) SREDSTVA ZA RAD

a) Epruveta

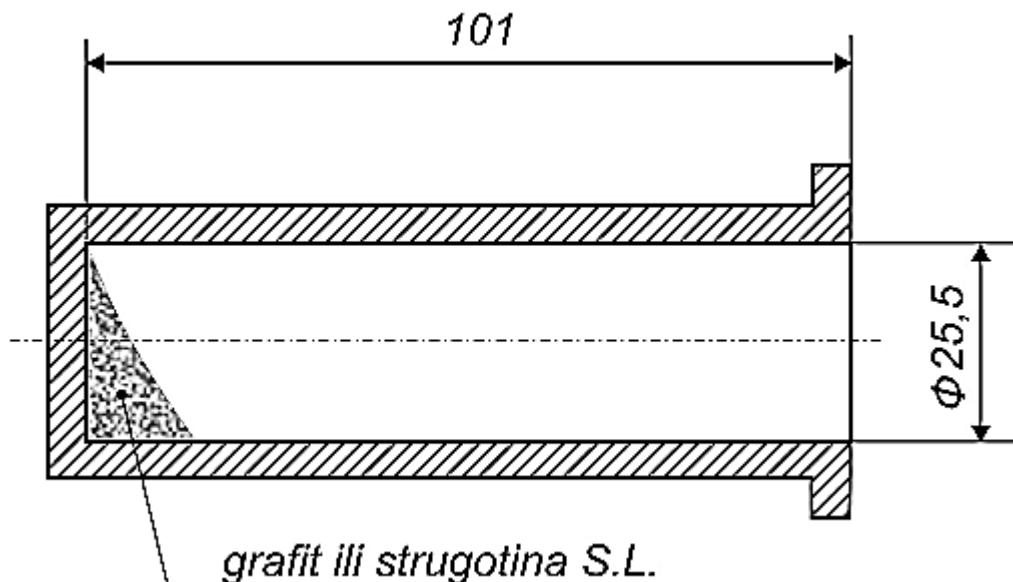
Od šipkastog uzorka se izrađuje epruveta, prema slici 1a ili prema slici 1b. Čeona površina mora biti potpuno glatka. Uz epruvetu prema slici 1b, koristi se prsten (slika 1c).



Slika 1. Izgled epruvete s glavom i epruvete s prstenom

b) Peć za zagrijavanje

Peć mora biti sposobna zagrijati epruvetu na temperaturu austenitizacije t_A kroz 40 min i da se temperatura t_A može podesiti u granicama točnosti ± 5 °C. Epruveta se mora lako vaditi iz peći. Po mogućnosti grijati u peći sa zaštitnom atmosferom, a ako takva peć nije na raspolaganju epruvetu treba uložiti u kutiju prema slici 2 i zajedno postaviti u komoru. Na dnu kutije ispred čela epruvete ubaciti grafitnu pločicu, grafitni prah ili sloj strugotine od sivog lijeva.

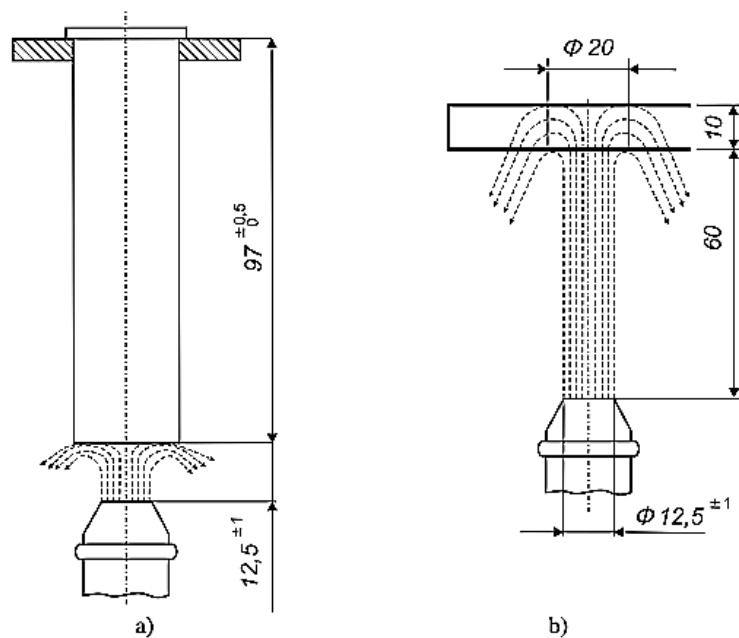


Slika 2. Zaštitna kutija za epruvetu

c) Uređaj za kaljenje

Uređaj za kaljenje smješten je u posudi, koja je spojena s dovodom i odvodom vode. Bitni dijelovi uređaja su: nosač epruvete i mlaznica $\phi 12,5 \pm 1$ mm.

Epruveta je u istoj vertikalnoj osi s mlaznicom i to na udaljenosti koja je jednaka navedenom promjeru mlaznice, tako da razmak od sapnice do čela epruvete bude u okviru dozvoljenog odstupanja ($12,5 \pm 1$ mm), prema slici 3a. Visina slobodnog mlaza postiže se hidrostatskim tlakom vode i mora iznositi 65 ± 5 mm, što se vizualno provjerava prema ugrađenom donjem i gornjem kontrolniku slobodne visine mlaza, prema slici 3b. Pri kaljenju mlaz vode udara u glatko čelo epruvete i odbija se u vidu otvorenog kišobrana.



Slika 3. a) Odbijanje mlaza vode o čelo epruvete

b) Kontrola visine slobodnog mlaza vode prije postavljanja epruvete

d) Uredaj za mjerjenje tvrdoće

Nakon kaljenja je potrebno izmjeriti tvrdoću epruvete na određenim točkama i stoga se preporuča izraditi posebnu napravu za pričvršćenje epruvete s mehanizmom za pomicanje (diobeni stol za ekvidistantna mjerena). Ova naprava s epruvetom se postavlja na aparat za ispitivanje tvrdoće po Rockwell-u (HRC) ili po Vickersu (HV).

A3) POSTUPAK ISPITIVANJA

a) Zagrijavanje

Epruveta se zagrijava u peći prema opisu u točki A2.b) na temperaturu t_A za tretirani čelik. Nakon zagrijavanja epruvetu treba progrijavati zbog homogenizacije (vidi vježbu 5 – „Grijanje“). Zagrijavanje približno traje 30 minuta ukoliko se epruveta ulaže u unaprijed zagrijanu peć na temperaturu austenitizacije.

b) Kaljenje

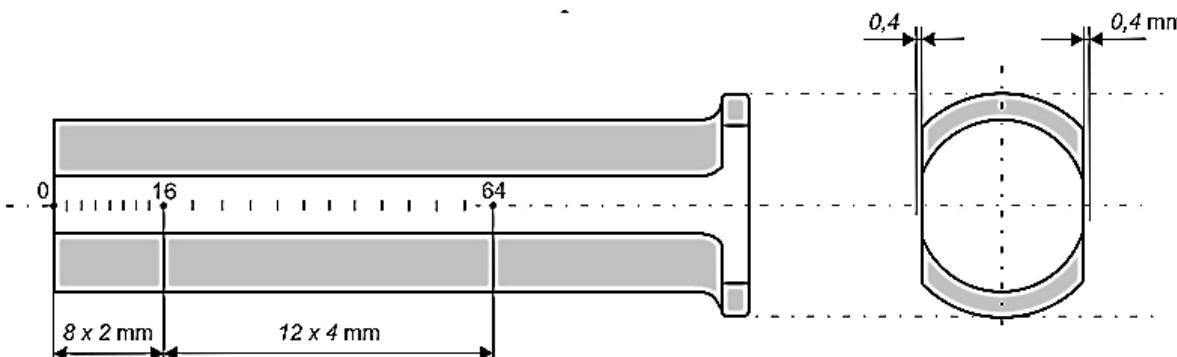
Najduže vrijeme koje smije proteći od vađenja epruvete iz peći do početka djelovanja mlaza iznosi 5 s. Djelovanje mlaza traje 15 minuta, a temperatura vode za kaljenje iznosi od 5 – 30 °C (što je u granicama temperature vode u gradskoj mreži tijekom cijele godine).

c) Brušenje epruvete

Nakon kaljenja se uzduž epruvete izbruse dvije paralelne ravne površine na dubinu od 0,4 mm. Jedna služi za nalijeganje u napravu, a druga (gornja) za mjerjenje tvrdoće. Brusiti treba pažljivo, da ne dođe do promjene strukture uslijed zagrijavanja pri brušenju.

d) Mjerjenje tvrdoće

Mjerjenje tvrdoće vrši se na ravno izbrušenoj površini epruvete uzduž izvodnice po Rockwell-u (HRC), a može i po Vickers- u (HV). Do udaljenosti 16 mm od čela epruvete tvrdoća se mjeri svaka 2 mm, a dalje svaka 4 mm i to po izvodnici – središnjici izbrušene površine, prema slici 4.



Slika 4. Mjerjenje tvrdoće po izvodnici

e) Ispunjavanje izvještaja

Izmjerene tvrdoće, kao i sve podatke o ispitivanom čeliku, upisuje se u „**Izvještaju o ispitivanju prokaljivosti**. Formular za izvještaj propisan je standardom (u prilogu).

f) Indeks prokaljivosti

Indeks prokaljivosti može se označiti na jedan od sljedeća tri načina:

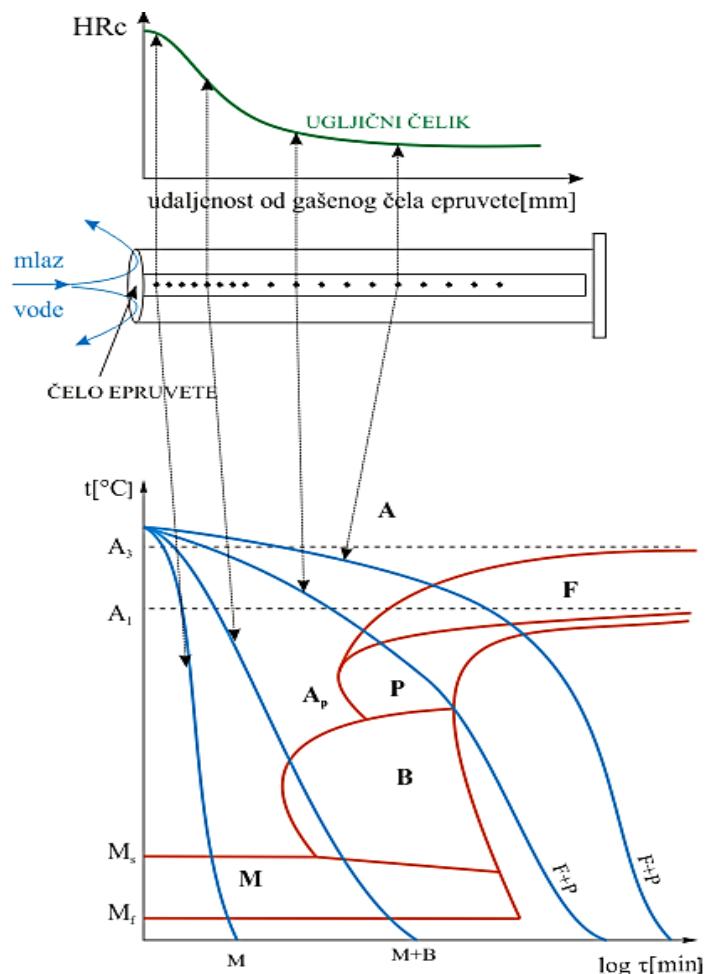
- 1) $J_H = d$ ili
- 2) $J_{H1-H2} = d$ ili
- 3) $J_H = d_1 - d_2$

Ako se naručuje npr. čelik po EN 42CrMo4 (stare HRN Č.4732) željene prokaljivosti, može se to izraziti indeksom prokaljivosti po Jominyu na jedan od gornjih načina:

- 1) $J_{40}=35 \dots\dots$ traži se baš tvrdoća od 40 HRC na J-udaljenosti 35 mm od čela epruvete (ovaj zahtjev je najskuplji);
- 2) $J_{34-45}=35 \dots\dots$ traži se raspon tvrdoće od 34 do 45 HRC na J-udaljenosti 35 mm od čela epruvete;
- 3) $J_{40=25-45} \dots\dots$ traži se baš tvrdoća od 40 HRC na intervalu J-udaljenosti od 25 do 45 mm od čela epruvete.

Na slici 5 je prikazan raspored tvrdoća po izvodnici, koje su samo odraz faznog sastava u promatranoj točki. Jasno, čelo epruvete hlađeno neposredno mlazom vode se zapravo kali

brzinom $v \geq v_k$ i u njegovoj blizini se razvija martenzit M. Podalji slojevi od čela prema glavi epruvete hlađe se sve sporije i fazni sastav u tim točkama je od prijelazne faze bajnita B do metastabilnog ferita F i perlita P.



Slika 5. Sprega tvrdoća na dobivenoj J-krivulji uzduž epruvete s pripadajućim krivuljama hlađenja u TTT - dijagramu

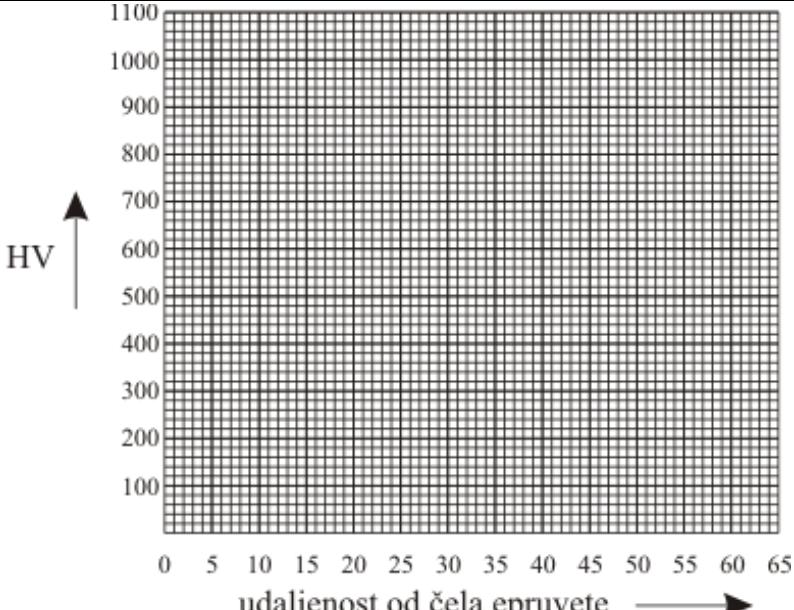
Zadatak:

- Izvršiti ispitivanje prokaljivosti po Jominy ugljičnog čelika EN C45E (stare HRN Č.1531) i legiranog EN 42CrMo4 (stare HRN Č.4732).
- Ukratko opisati standardni Jominy postupak ispitivanja prokaljivosti.
- Rezultate ispitivanja za oba čelika prikazati tabično.
- Nacrtati pripadajuće Jominy krivulje za oba ispitana čelika u istom dijagramu.
- Prokomentirati razlike u obliku Jominy krivulje nelegiranog i legiranog čelika.
- Definirati termin prokaljivosti, te dati osvrt o prokaljivosti tretiranih čelika.
- Zaključiti o utjecaju legirnih elemenata na prokaljivost.

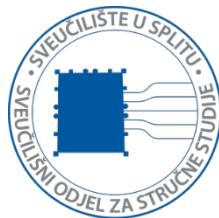
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Upute za vježbe iz kolegija Materijali 2



ISPITIVANJE PROKALJIVOSTI ČELIKA PO HRN C.A2.051									br. ispitivanja:		datum:									
Ispitivanje provedeno u:																				
Br.	Oznaka epruvete	ANALIZA KEMIJSKOG SASTAVA %									A_{c3} °C	Veličina austenitnog zrna								
		C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V												
1.																				
2.																				
3.																				
4.																				
Mjesto i način uzimanja i pripreme uzorka za epruvetu:																				
		 <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>																		
(Skica)																				
PODACI O IZVRŠENOJ TOPLINSKOJ OBRADI																				
Br.	Oznaka epruvete	NORMALIZACIJA				MEKO ŽARENJE				KALJENJE										
		t °C	vrij. zagr.	vrij. prog.	rashl. sred	t °C	vrij. zagr.	vrij. prog.	rashl. sred.	t °C	vrij. zagr.	vrij. prog.	trajanje hlad.							
1.																				
2.																				
3.																				
4.																				
TVRDOĆA UZDUŽ EPRUVETE po ROCKWELL – u ili po VICKERS – u																				
J-udaljen. mm	2	4	6	8	10	12	14	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64
tvrdoća																				
																				

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 7

NUMERIČKA METODA ODREĐIVANJA JOMINY KRIVULJE



NUMERIČKA METODA ODREĐIVANJA JOMINY KRIVULJE¹

Metoda određivanja Jominy prokaljivosti na temelju poznatog kemijskog sastava i idealnog kritičnog promjera se zasniva na originalnom radu M.A.Grossmana. Metoda je ograničena na čelike određenog kemijskog sastava. Vrijedi za raspone kemijskog sastava legirnih elemenata prema tablici:

Element	Područje, %
Ugljik	0.10 - 0.70
Mangan	0.50 - 1.65
Silicij	0.15 - 0.60
Krom	1.35max
Nikal	1.50max
Molibden	0.55max

Navedeni kemijski sastav odgovara srednje i visokougljičnim nelegiranim čelicima, te niskolegiranim čelicima.

Jominy metoda koristi se za procjenu prokaljivosti čelika na temelju dijagrama dobivenog pokusom na standardnoj epruveti. Razvijeno je više metoda za procjenu tvrdoće po presjeku okruglih izradaka („U krivulje“) na temelju eksperimentalno dobivenih Jominy krivulja.

Prokaljivost ovisi o više faktora:

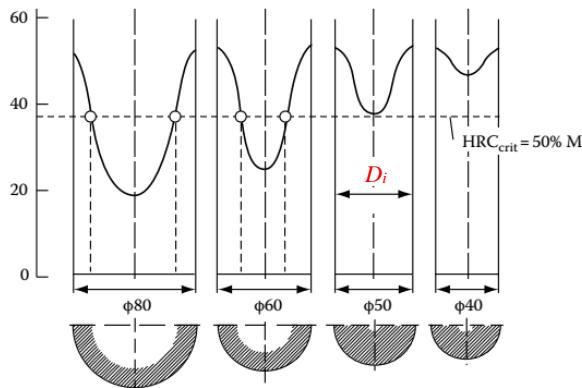
- Veličini i obliku poprečnog presjeka izratka (jako utječe na intenzitet odvođenja topline s površine izratka - intenzitet odvođenja topline ovisi o površini izloženoj rashladnom sredstvu).
- Prokaljivosti samog materijala (ovisi o veličini zrna i kemijskom sastavu).
- Uvjetima hlađenja (vrsta rashladnog sredstva, mirno sredstvo ili strujanje rashladnog sredstva).

Utjecaj kemijskog sastava na prokaljivost može se izračunati u funkciji „idealnog kritičnog promjera D_i “. Idealni kritični promjer je najveći promjer za koji će u samoj jezgri, nakon kaljenja u idealnom rashladnom sredstvu ($H = \infty$), nastati 50% martenzita.

Idealno rashladno sredstvo trenutno snižava temperaturu površine izratka. Pod ovim uvjetima intenzitet hlađenja jezgre ovisi samo o difuzivnosti materijala (kombinacija toplinske vodljivosti λ , specifičnog toplinskog kapaciteta C_p i gustoće materijala ρ - $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$).

Na slici 1 treći uzorak ima odgovarajući idealni kritični promjer D_i (50% martenzita u samom središtu presjeka).

¹ ASTM 255



Slika 1. Određivanje idealnog kritičnog promjera D_i

Idealni kritični promjer D_i može se izračunati primjenom izraza:

$$D_i = DI_{Base} \cdot f_{Mn} \cdot f_{Si} \cdot f_{Ni} \cdot f_{Cr}$$

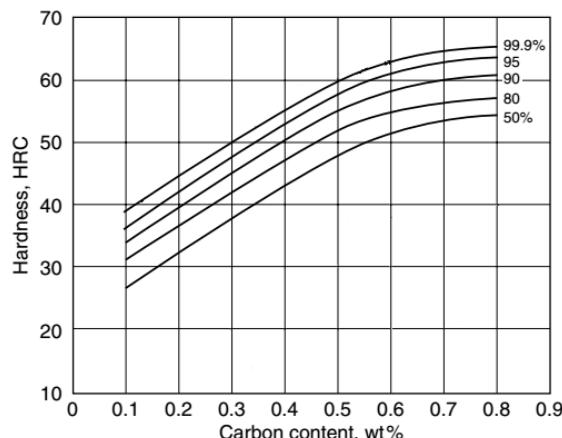
gdje je:

- DI_{Base} – faktor ovisan o sadržaju ugljika i veličini zrna G² prema ASTM-u
- f_n – faktori za konkretnе kemijske elemente

Navedeni faktori mogu se odrediti pomoću podataka u tablici 1. iz priloga.

Maksimalna tvrdoća zakaljenog čelika (100% M) se može odrediti na temelju poznatog sadržaja ugljika primjenom Burnsovog dijagrama (slika 2) ili pomoću empirijskog izraza:

$$HRC_{100\%M} = 35,395 + 6,99 \cdot \%C + 312,33 \cdot \%C^2 - 821,744 \cdot \%C^3 + 1015,479 \cdot \%C^4 - 538,346 \cdot \%C^5$$



Slika 2. Tvrdoća u ovisnosti o masenom udjelu ugljika i sadržaju martenzita u strukturi

Tvrdoća strukture s 50% martenzita (tvrdoća u jezgri izratka idealnog kritičnog promjera) se također može odrediti uz poznati sadržaj ugljika prema empirijskom izrazu:

$$HRC_{50\%M} = 22,974 + 6,214 \cdot \%C + 356,364 \cdot \%C^2 - 1091,488 \cdot \%C^3 + 1465,88 \cdot \%C^4 - 750,441 \cdot \%C^5$$

² Veličina zrna G prema ASTM-u (na koju se referira tablica 1) je u korelaciji s prosječnom duljinom presjeka zrna pri povećanju 100X i računa se prema izrazu: $G = 10 - 2 \cdot \ln(L)$ gdje je L prosječna duljina presjeka zrna. Manja vrijednost G ukazuje na veće zrna, a veća vrijednost indicira manje zrno.
Veličina zrna utječe na prokaljivost – veću prokaljivost imaju mikrostrukture s krupnijim zrnom.

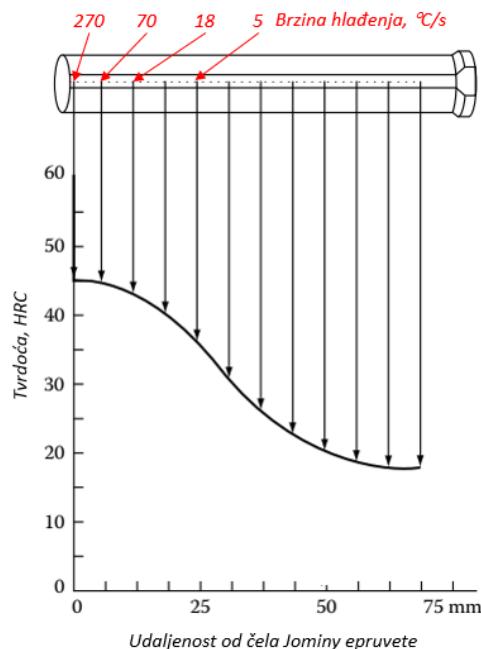
Uz poznatu veličinu idealnog kritičnog promjera D_i i inicijalnu tvrdoću $HRC_{100\%M}$ može se odrediti tvrdoća u funkciji udaljenosti od čela Jominy epruvete:

$$HRC(J_{Udaljenost}) = \frac{HRC_{100\%M}}{FR} \quad (1)$$

gdje je:

- $HRC_{100\%M}$ – inicijalna tvrdoća – 100% martenzit
- FR – faktor redukcije tvrdoće – faktor koji se određuje iz tablice 2 za poznati idealni kritični promjer D_i

Na slici 3 prikazana je Jominy epruveta s mjernim mjestima i krivulja raspodjele tvrdoće za različite Jominy udaljenosti. U gornjem dijelu slike naznačene su načelne brzine hlađenja za četiri različite Jominy udaljenosti.



Slika 3. Jominy epruveta i raspodjela tvrdoće duž epruvete

Zadatak

- a) Računski odrediti raspodjelu tvrdoće duž Jominy epruvete za čelik EN CK45 (HRN Č1531) ukoliko je poznata veličina zrna prema ASTM-u G=7 i kemijski sastav:

Element	C	Si	Mn	P max	S max	Ostali
Maseni udio	0,46	0,3	0,65	0,03	0,035	$\leq 0,63$

Rezultate prikazati tablično i u odgovarajućem dijagramu!

- b) Računski odrediti raspodjelu tvrdoće duž Jominy epruvete za čelik EN 42CrMo4 (HRN Č4732) ukoliko je poznata veličina zrna prema ASTM-u G=8 i kemijski sastav:

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	P max	S max
Maseni udio	0,4	0,4	0,6	0,9	0,2	0,025	0,035

Rezultate prikazati tablično i u odgovarajućem dijagramu!

Usporediti rezultate dobivene računskim putem i rezultate dobivene Jominy pokusom te iznijeti vlastita zapažanja i zaključke.

Tablica 1. Tablica za određivanje idealnog kritičnog promjera na temelju veličine zrna i kemijskog sastava

Le - C, %	DI_{Base}			$Legirni\ element\ (f_{Mn} / f_{Si} / f_{Ni} / f_{Cr} / f_{Mo})$				
	Veličina zrna prema ASTM standardu			Mn	Si	Ni	Cr	Mo
	6	7	8					
0.05	2.06756	1.905	1.77038	1.167	1.035	1.018	1.108	1.15
0.1	2.92862	2.7051	2.5273	1.333	1.07	1.036	1.216	1.3
0.15	3.58902	3.3401	3.07848	1.5	1.105	1.055	1.324	1.45
0.2	4.12242	3.83286	3.556	1.667	1.14	1.073	1.432	1.6
0.25	4.6228	4.26212	3.9624	1.833	1.175	1.091	1.54	1.75
0.3	5.05714	4.69646	4.318	2	1.21	1.109	1.648	1.9
0.35	5.47116	5.08	4.67868	2.167	1.245	1.128	1.756	2.05
0.4	5.842	5.4102	5.01904	2.333	1.28	1.146	1.864	2.2
0.45	6.1976	5.73786	5.3086	2.5	1.315	1.164	1.972	2.35
0.5	6.5532	6.0452	5.588	2.667	1.35	1.182	2.08	2.5
0.55	6.9342	6.3754	5.8674	2.833	1.385	1.201	2.188	2.65
0.6	7.2136	6.6548	6.1214	3	1.42	1.219	2.296	2.8
0.65	7.493	6.9342	6.3754	3.167	1.455	1.237	2.404	2.95
0.7	7.7724	7.1882	6.604	3.333	1.49	1.255	2.512	3.1
0.75	8.0264	7.4422	6.858	3.5	1.525	1.273	2.62	3.25
0.8	8.2804	7.6962	7.0612	3.667	1.56	1.291	2.728	3.4
0.85	8.5344	7.9248	7.2898	3.833	1.595	1.309	2.836	3.55
0.9	8.7884	8.1534	7.5184	4	1.63	1.321	2.944	3.7
0.95	9.1358	8.3438	7.6997	4.167	1.665	1.345	3.052	3.85
1	9.5839	8.4787	7.8174	4.333	1.7	1.364	3.16	4

Tablica 2. Tablica za određivanje faktora redukcije tvrdoće
ODREĐIVANJE FAKTORA REDUKCIJE TVRDOĆE ZA POJEDINE JOMINY UDALJENOSTI

Idealni kritični promjer D_i , mm	Faktor redukcije tvrdoće FR												Jominy udaljenost J , mm								
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	20	24	28									
25	1.00	1.00	1.43	1.91	2.32	2.65	2.92	3.14	3.31	3.56	3.72	3.86	4.01	4.19	4.40	4.64	4.87	5.06	5.18	5.17	5.01
26	1.00	1.00	1.41	1.88	2.28	2.60	2.87	3.08	3.25	3.49	3.66	3.80	3.95	4.13	4.33	4.56	4.79	4.97	5.08	5.07	4.91
28	1.00	1.00	1.36	1.82	2.20	2.51	2.76	2.97	3.14	3.38	3.54	3.68	3.83	4.00	4.20	4.41	4.62	4.80	4.89	4.88	4.72
30	1.00	1.00	1.32	1.76	2.12	2.42	2.67	2.87	3.03	3.26	3.43	3.56	3.71	3.87	4.06	4.27	4.47	4.63	4.71	4.69	4.54
32	1.00	1.00	1.29	1.70	2.05	2.34	2.57	2.77	2.92	3.15	3.32	3.45	3.59	3.75	3.94	4.13	4.32	4.47	4.54	4.52	4.37
34	1.00	1.00	1.25	1.65	1.98	2.26	2.48	2.67	2.82	3.05	3.21	3.35	3.49	3.64	3.82	4.00	4.18	4.31	4.38	4.36	4.22
36	1.00	1.00	1.22	1.60	1.91	2.18	2.40	2.58	2.73	2.95	3.11	3.25	3.38	3.53	3.70	3.88	4.04	4.17	4.23	4.20	4.07
38	1.00	1.00	1.19	1.55	1.85	2.11	2.32	2.50	2.64	2.86	3.02	3.15	3.28	3.43	3.59	3.76	3.91	4.03	4.09	4.06	3.94
40	1.00	1.00	1.17	1.51	1.80	2.04	2.24	2.41	2.56	2.77	2.93	3.06	3.19	3.33	3.49	3.64	3.79	3.90	3.95	3.92	3.81
42	1.00	1.00	1.15	1.47	1.74	1.98	2.17	2.34	2.47	2.68	2.84	2.97	3.10	3.24	3.39	3.54	3.67	3.77	3.82	3.79	3.69
44	1.00	1.00	1.12	1.43	1.69	1.91	2.10	2.26	2.40	2.60	2.76	2.89	3.02	3.15	3.29	3.43	3.56	3.65	3.70	3.67	3.59
46	1.00	1.00	1.11	1.39	1.64	1.86	2.04	2.19	2.32	2.53	2.68	2.81	2.93	3.06	3.20	3.34	3.45	3.54	3.58	3.56	3.48
48	1.00	1.00	1.09	1.36	1.60	1.80	1.98	2.13	2.25	2.45	2.61	2.73	2.86	2.98	3.11	3.24	3.35	3.43	3.47	3.45	3.39
50	1.00	1.00	1.07	1.33	1.56	1.75	1.92	2.06	2.19	2.38	2.53	2.66	2.78	2.91	3.03	3.15	3.26	3.33	3.37	3.35	3.31
52	1.00	1.00	1.06	1.30	1.52	1.70	1.87	2.01	2.13	2.32	2.47	2.59	2.71	2.83	2.95	3.07	3.17	3.24	3.27	3.26	3.23
54	1.00	1.00	1.05	1.28	1.48	1.66	1.81	1.95	2.07	2.25	2.40	2.53	2.64	2.76	2.88	2.99	3.08	3.15	3.18	3.18	3.16
56	1.00	1.00	1.04	1.25	1.45	1.62	1.77	1.90	2.01	2.19	2.34	2.47	2.58	2.69	2.80	2.91	3.00	3.06	3.09	3.09	3.09
58	1.00	1.00	1.03	1.23	1.41	1.58	1.72	1.85	1.96	2.14	2.28	2.41	2.52	2.63	2.74	2.83	2.92	2.98	3.01	3.02	3.03
60	1.00	1.00	1.02	1.21	1.38	1.54	1.68	1.80	1.91	2.08	2.23	2.35	2.46	2.57	2.67	2.76	2.84	2.90	2.93	2.95	2.97
62	1.00	1.00	1.02	1.19	1.36	1.50	1.63	1.75	1.86	2.03	2.17	2.30	2.41	2.51	2.61	2.70	2.77	2.82	2.86	2.88	2.92

Faktor redukcije tvrdoće FR
Idealni kritični promjer Di, mm
Jominy udaljenost J, mm

Di, mm	0	2	4	6	8	10	12	14	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64
64	1.00	1.00	1.01	1.18	1.33	1.47	1.60	1.71	1.81	1.98	2.12	2.24	2.35	2.45	2.55	2.63	2.70	2.75	2.79	2.82	2.88
66	1.00	1.00	1.01	1.16	1.30	1.44	1.56	1.67	1.77	1.94	2.08	2.19	2.30	2.40	2.49	2.57	2.64	2.69	2.72	2.76	2.84
68	1.00	1.00	1.00	1.15	1.28	1.41	1.53	1.63	1.73	1.89	2.03	2.15	2.25	2.35	2.44	2.51	2.58	2.62	2.66	2.71	2.80
70	1.00	1.00	1.00	1.13	1.26	1.38	1.49	1.60	1.69	1.85	1.99	2.10	2.21	2.30	2.38	2.46	2.52	2.56	2.60	2.66	2.77
72	1.00	1.00	1.00	1.12	1.24	1.35	1.46	1.56	1.65	1.81	1.95	2.06	2.16	2.25	2.33	2.40	2.46	2.51	2.55	2.61	2.74
74	1.00	1.00	1.00	1.11	1.22	1.33	1.43	1.53	1.62	1.78	1.91	2.02	2.12	2.21	2.28	2.35	2.41	2.45	2.50	2.57	2.71
76	1.00	1.00	1.00	1.10	1.21	1.31	1.41	1.50	1.59	1.74	1.87	1.98	2.08	2.16	2.24	2.30	2.35	2.40	2.45	2.53	2.69
78	1.00	1.00	1.00	1.09	1.19	1.29	1.38	1.47	1.55	1.71	1.83	1.94	2.04	2.12	2.19	2.25	2.30	2.35	2.40	2.49	2.66
80	1.00	1.00	1.00	1.08	1.17	1.27	1.36	1.44	1.52	1.67	1.80	1.91	2.00	2.08	2.15	2.21	2.26	2.30	2.36	2.46	2.64
82	1.00	1.00	1.00	1.08	1.16	1.25	1.33	1.42	1.50	1.64	1.77	1.87	1.96	2.04	2.11	2.16	2.21	2.26	2.32	2.42	2.63
84	1.00	1.00	1.00	1.07	1.15	1.23	1.31	1.39	1.47	1.61	1.73	1.84	1.93	2.00	2.07	2.12	2.17	2.21	2.28	2.39	2.61
86	1.00	1.00	1.00	1.06	1.13	1.21	1.29	1.37	1.44	1.58	1.70	1.81	1.89	1.97	2.03	2.08	2.13	2.17	2.24	2.36	2.59
88	1.00	1.00	1.00	1.06	1.12	1.20	1.27	1.35	1.42	1.56	1.67	1.78	1.86	1.93	1.99	2.04	2.09	2.13	2.20	2.33	2.58
90	1.00	1.00	1.00	1.05	1.11	1.18	1.25	1.33	1.40	1.53	1.65	1.75	1.83	1.90	1.96	2.00	2.05	2.09	2.17	2.31	2.57
92	1.00	1.00	1.00	1.05	1.10	1.17	1.24	1.31	1.38	1.51	1.62	1.72	1.80	1.87	1.92	1.97	2.01	2.06	2.14	2.28	2.56
94	1.00	1.00	1.00	1.04	1.09	1.15	1.22	1.29	1.35	1.48	1.59	1.69	1.77	1.83	1.89	1.93	1.97	2.02	2.10	2.26	2.54
96	1.00	1.00	1.00	1.04	1.08	1.14	1.20	1.27	1.34	1.46	1.57	1.66	1.74	1.80	1.85	1.90	1.94	1.99	2.07	2.23	2.53
98	1.00	1.00	1.00	1.03	1.08	1.13	1.19	1.25	1.32	1.44	1.54	1.64	1.71	1.77	1.82	1.86	1.90	1.95	2.04	2.21	2.52
100	1.00	1.01	1.00	1.03	1.07	1.12	1.18	1.24	1.30	1.42	1.52	1.61	1.68	1.74	1.79	1.83	1.87	1.92	2.02	2.19	2.51
102	1.00	1.01	1.01	1.02	1.06	1.11	1.16	1.22	1.28	1.40	1.50	1.59	1.66	1.71	1.76	1.80	1.84	1.89	1.99	2.17	2.49
104	1.00	1.02	1.01	1.02	1.05	1.10	1.15	1.21	1.26	1.38	1.48	1.56	1.63	1.69	1.73	1.77	1.81	1.86	1.96	2.14	2.48
106	1.00	1.02	1.01	1.02	1.05	1.09	1.14	1.19	1.25	1.36	1.46	1.54	1.61	1.66	1.70	1.74	1.78	1.83	1.93	2.12	2.47

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Upute za vježbe iz kolegija Materijali 2



Faktor redukcije tvrdoće FR Jominy udaljenost J, mm

Ideální
kritiční
promjer
Di, mm

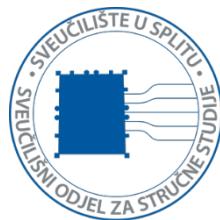
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64
108	1.00	1.03	1.01	1.01	1.04	1.08	1.13	1.18	1.23	1.34	1.43	1.52	1.58	1.63	1.67	1.71	1.75	1.80	1.91	2.10	2.45
110	1.00	1.03	1.01	1.01	1.03	1.07	1.12	1.17	1.22	1.32	1.41	1.49	1.56	1.61	1.65	1.68	1.72	1.78	1.88	2.08	2.44
112	1.00	1.03	1.01	1.01	1.03	1.06	1.11	1.15	1.21	1.31	1.40	1.47	1.53	1.58	1.62	1.65	1.69	1.75	1.86	2.06	2.42
114	1.00	1.04	1.01	1.00	1.02	1.05	1.10	1.14	1.19	1.29	1.38	1.45	1.51	1.56	1.59	1.63	1.66	1.72	1.83	2.04	2.41
116	1.00	1.04	1.01	1.00	1.02	1.05	1.09	1.13	1.18	1.27	1.36	1.43	1.49	1.53	1.57	1.60	1.64	1.70	1.81	2.01	2.39
118	1.00	1.04	1.01	1.00	1.01	1.04	1.08	1.12	1.17	1.26	1.34	1.41	1.47	1.51	1.54	1.57	1.61	1.67	1.78	1.99	2.37
120	1.00	1.04	1.01	1.00	1.01	1.04	1.07	1.11	1.16	1.24	1.32	1.39	1.44	1.49	1.52	1.55	1.58	1.64	1.76	1.97	2.34
122	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.03	1.06	1.10	1.15	1.23	1.31	1.37	1.42	1.46	1.49	1.52	1.56	1.62	1.73	1.94	2.32
124	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.02	1.06	1.14	1.22	1.29	1.35	1.40	1.44	1.47	1.50	1.54	1.60	1.71	1.92	1.92	2.30
126	1.00	1.05	1.00	1.00	1.00	1.02	1.05	1.09	1.13	1.20	1.28	1.33	1.38	1.42	1.45	1.48	1.51	1.57	1.69	1.89	2.27
128	1.00	1.05	1.00	1.00	1.00	1.01	1.04	1.08	1.12	1.19	1.26	1.32	1.36	1.40	1.43	1.46	1.49	1.55	1.66	1.87	2.24
130	1.00	1.05	1.00	1.00	1.00	1.01	1.04	1.07	1.11	1.18	1.25	1.30	1.34	1.38	1.41	1.43	1.47	1.53	1.64	1.84	2.21
132	1.00	1.05	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.07	1.10	1.17	1.23	1.28	1.33	1.36	1.39	1.41	1.45	1.51	1.61	1.82	2.18
134	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.03	1.06	1.09	1.16	1.22	1.27	1.31	1.34	1.37	1.39	1.43	1.48	1.59	1.79	2.14
136	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.02	1.05	1.08	1.15	1.20	1.25	1.29	1.32	1.35	1.37	1.41	1.46	1.57	1.76	2.10	
138	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.02	1.05	1.08	1.14	1.19	1.24	1.27	1.30	1.33	1.36	1.39	1.44	1.54	1.73	2.06	
140	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02	1.04	1.07	1.13	1.18	1.22	1.26	1.29	1.31	1.34	1.37	1.42	1.52	1.70	2.02
142	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02	1.04	1.07	1.12	1.17	1.21	1.24	1.27	1.30	1.32	1.35	1.40	1.50	1.67	1.98
144	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.04	1.06	1.11	1.16	1.19	1.23	1.25	1.28	1.31	1.34	1.39	1.47	1.64
146	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.03	1.06	1.10	1.15	1.18	1.21	1.24	1.27	1.29	1.32	1.37	1.45	1.60
148	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.03	1.05	1.10	1.13	1.17	1.20	1.23	1.25	1.28	1.31	1.35	1.43	1.57
150	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.03	1.05	1.12	1.16	1.19	1.21	1.24	1.26	1.29	1.33	1.40	1.53	1.78	

Faktor redukcije tvrdoće FR

Idealni
kritični
promjer
 D_i , mm

Jominy udaljenost J, mm	Faktor redukcije tvrdoće FR																				
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64
152	1.00	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.08	1.11	1.14	1.17	1.20	1.23	1.25	1.28	1.32	1.38	1.50	1.73
154	1.00	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.04	1.07	1.11	1.13	1.16	1.19	1.21	1.24	1.27	1.30	1.36	1.46	1.67
156	1.00	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.04	1.07	1.10	1.12	1.15	1.18	1.20	1.23	1.26	1.29	1.33	1.42	1.61
158	1.00	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.06	1.09	1.11	1.14	1.16	1.19	1.22	1.24	1.27	1.31	1.38	1.54
160	1.00	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.18	1.21	1.23	1.26	1.29	1.35	1.48
162	1.00	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.05	1.07	1.09	1.12	1.14	1.17	1.20	1.23	1.24	1.26	1.30	1.41
164	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.06	1.08	1.11	1.14	1.17	1.20	1.22	1.23	1.24	1.26	1.33
166	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.04	1.05	1.07	1.10	1.13	1.16	1.19	1.21	1.22	1.22	1.22	1.26
168	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.20	1.21	1.19	1.17	1.18
170	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.05	1.08	1.11	1.15	1.18	1.20	1.19	1.17	1.13	1.10	
172	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.07	1.10	1.14	1.18	1.19	1.18	1.14	1.08	1.02
174	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.02	1.03	1.06	1.10	1.14	1.17	1.19	1.17	1.12	1.03	1.00
176	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.05	1.09	1.13	1.17	1.18	1.16	1.10	1.00	1.00	
178	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.04	1.08	1.13	1.17	1.18	1.15	1.15	1.07	1.00	1.00

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

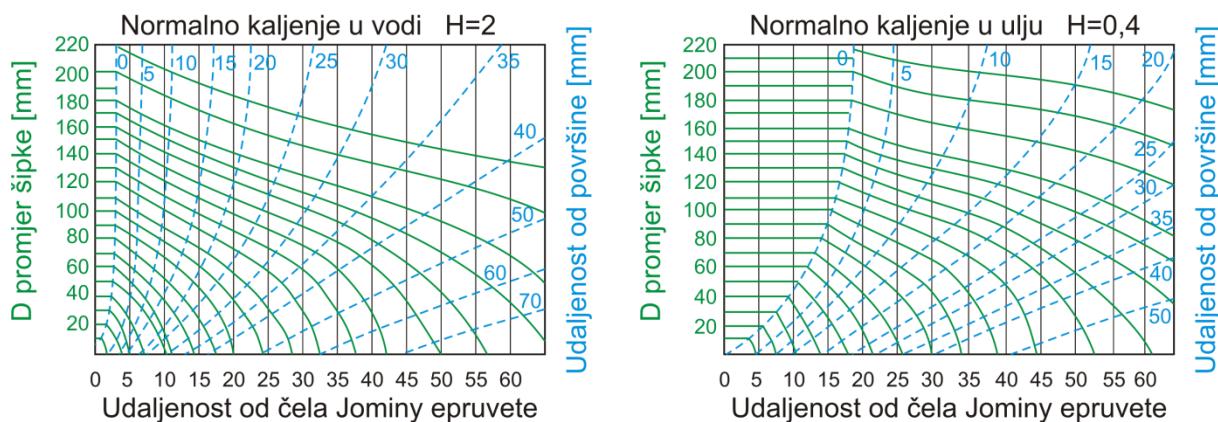
VJEŽBA br. 8

PRIMJENA JOMINY KRIVULJA

PRIMJENA JOMINY KRIVULJA

A) GERBER – WYSS dijagrami

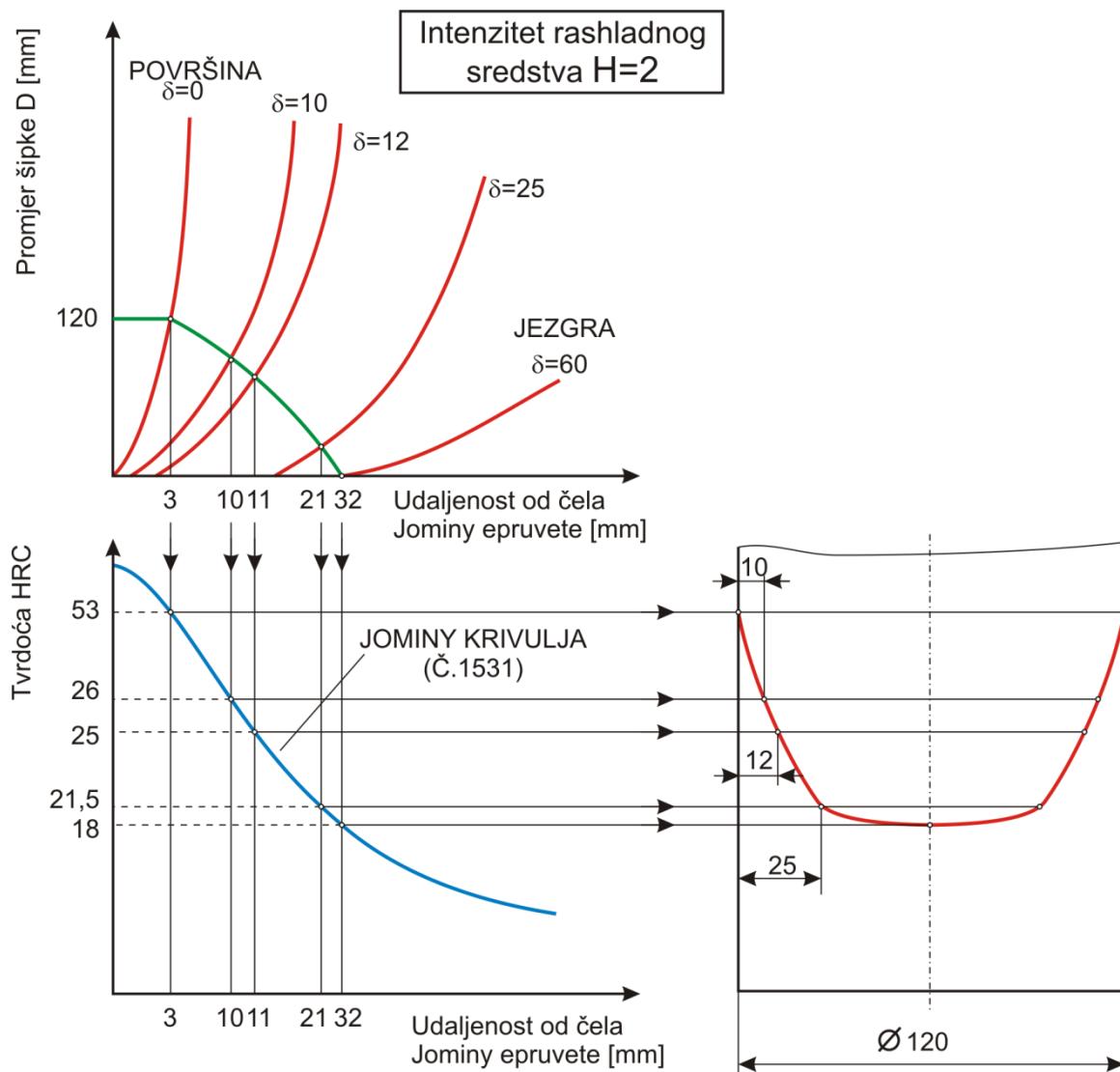
Gerber Wyss dijagrami se koriste za određivanje toka tvrdoće po presjeku okruglog kaljenog izratka. Da bi mogli odrediti tok tvrdoće po presjeku pretpostavka je snimljena ili poznata Jominy krivulja materijala izratka dobivena Jominy metodom određivanja prokaljivosti. Za svaki intenzitet hlađenja H vrijedi samo jedan Gerber – Wyss dijagram. Na slici 1 su prikazani dijagrami za intenzitete hlađenja $H=2$ što odgovara postupku kaljenja uz gibanje izratka u vodi sobne temperature, a $H=0,4$ za kaljenje u ulju sobne temperature uz gibanje izratka.



Slika 1. Gerber – Wyss dijagrami

Princip konstrukcije U-krivulje (krivulje toka tvrdoće po presjeku izratka) prikazan je na slici 2. Najprije za zadan promjer izratka odaberemo krivulju u Gerber Wyssovom dijagramu (gore) i to npr. 120 mm. Nakon toga sjecišta odabranje krivulje s krivuljama koja označavaju udaljenost od površine δ spuštamo do Jominy krivulje (dijagram dolje lijevo). Na koncu iz ovih sjecišta povlačimo horizontalne linije prema dijagramu U krivulja (dolje desno). Sjecište ovih linija s odgovarajućim promjerima daju točke U-krivulje.

Odabirom različitog promjera izratka u gornjem dijagramu možemo dobiti U krivulje za različite promjere izradaka. Dobivena U-krivulja daje uvid o dubini kaljenja tj. o postignutim fazama po dubini presjeka.



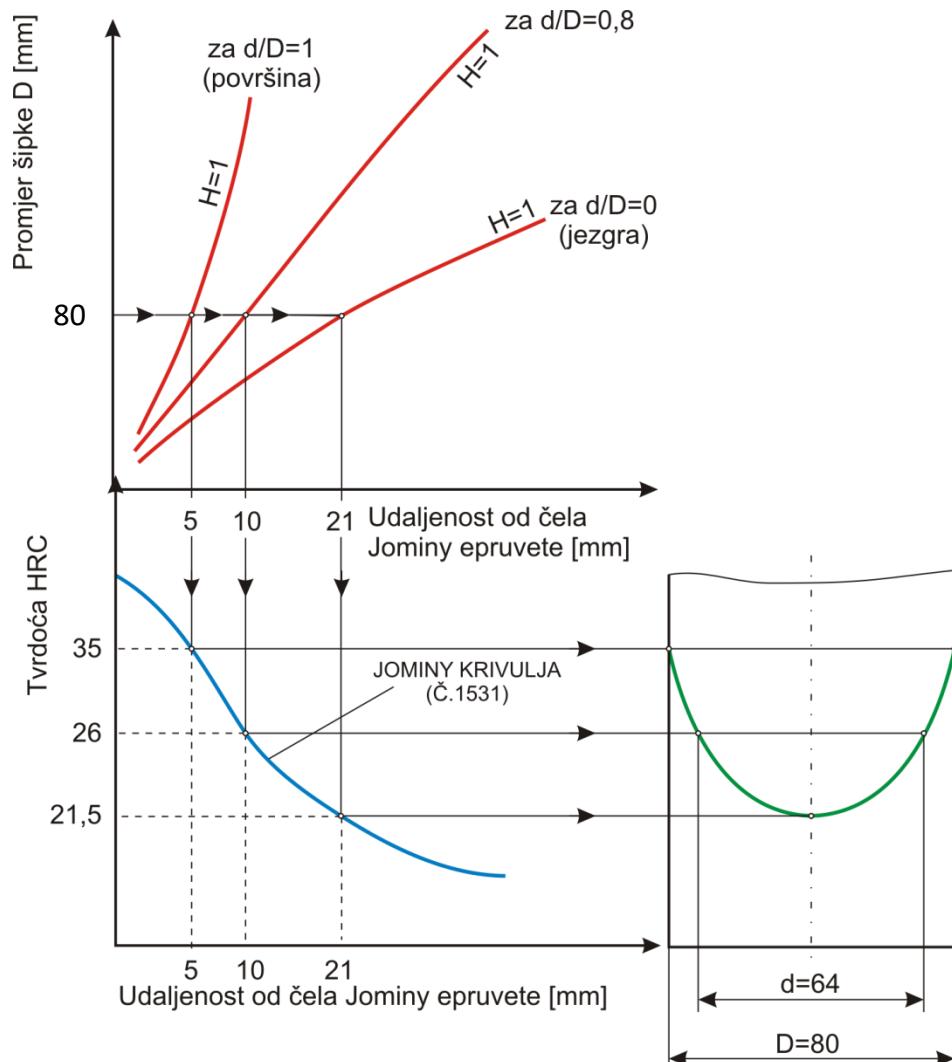
Slika 2. Princip određivanja toka tvrdoće po presjeku kaljenog obratka pomoću Gerber Wyss-ovog dijagrama i Jominy krivulje

B) CRAFTS – LAMONT dijagrami

Praktični pokazatelj prokaljivosti nekog čelika, kaljenog u sredstvu poznatog rashladnog učinka H , jest postignuta raspodjela tvrdoće po presjeku određenih dimenzija. Svaki dijagram vrijedi za gašenje za različita rashladna sredstva, ali samo za jednu udaljenost od površine šipke, što je iskazano vrijednošću omjera promjera na kojem želimo mjeriti tvrdoću i vanjskog promjera šipke (d/D). Tako vrijednost $d/D = 0$ vrijedi za određivanje tvrdoće u središtu presjeka šipke, a $d/D = 1$ za tvrdoću na površini. U tablici 1 navedeni su intenziteti rashladnog sredstva H za različita sredstva i načine hlađenja. Princip korištenja Craft Lamont dijagonala za određivanje U-krivulja prikazan je shematski na slici 3 i to za šipku promjera 80 mm gašenu nakon austenitizacije u mirnoj vodi ($H=1$). Određene su tvrdoće za površinu ($d/D = 1$), jezgru ($d/D = 0$), te za mjesto udaljeno 8 mm od površine ($d/D = 0,8$). Prigodom određivanja U-krivulje isti postupak se ponavlja za sve raspoložive dijagrame (odnose d/D).

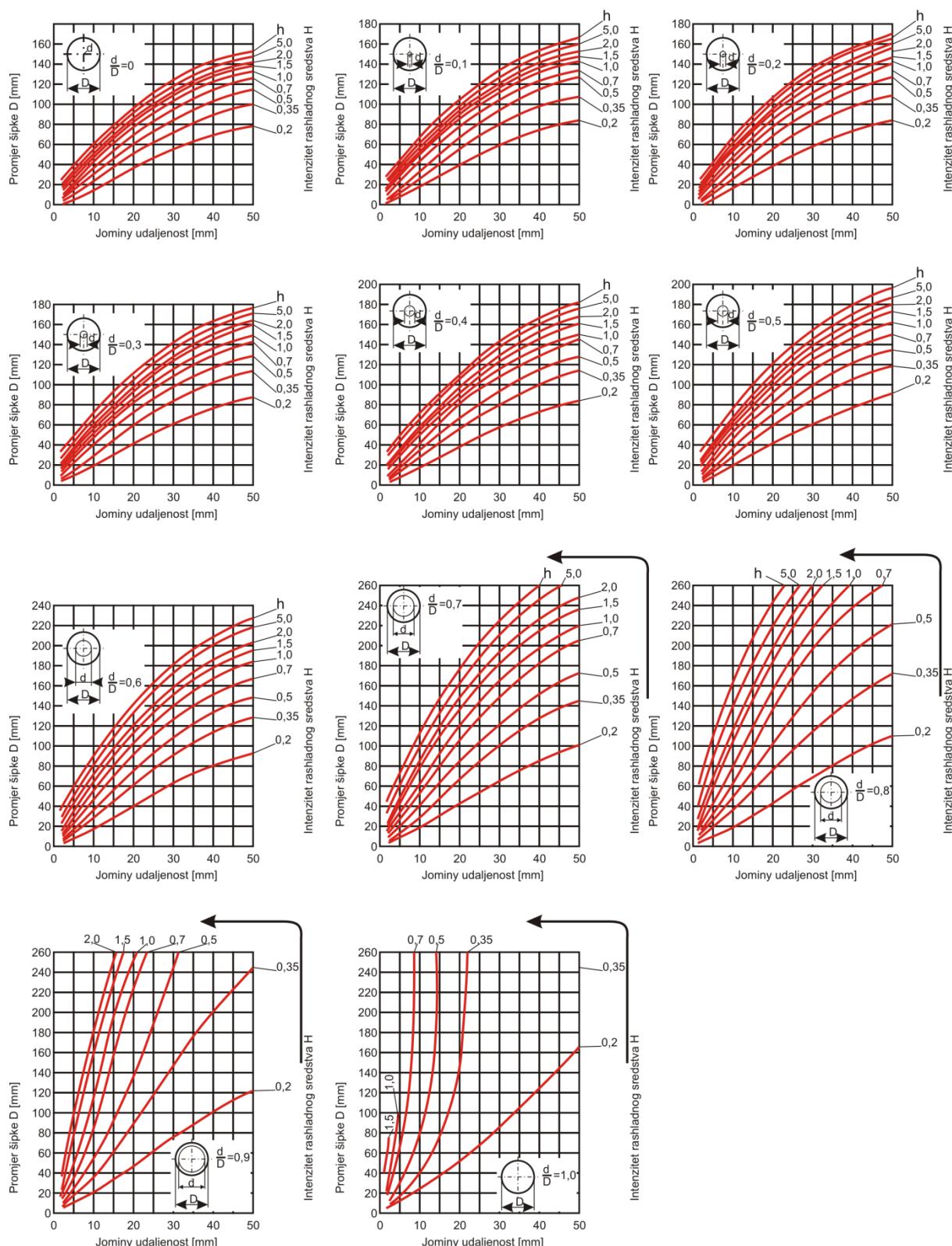
Tablica 1. Inteziteti rashladnog sredstva H za različita sredstva i načine hlađenja

Gibanje izratka u rashladnom sredstvu	Ulje	Voda	Slana voda
Bez gibanja	0,25-0,3	0,9 – 1	2
Slabo gibanje	0,3-0,35	1,1 – 1	2 – 2,2
Srednje gibanje	0,35-0,4	1,2 – 1,3	-
Jače gibanje	0,4-0,5	1,4 – 1,5	-
Intenzivno gibanje	0,5-0,8	1,5 – 2	-
Jako intenzivno gibanje	0,8-1,1	2 - 6	2 - 8



Slika 3. Princip određivanja toka tvrdoće po presjeku kaljenog obratka pomoći Craft - Lamont dijagrama i Jominy krivulje

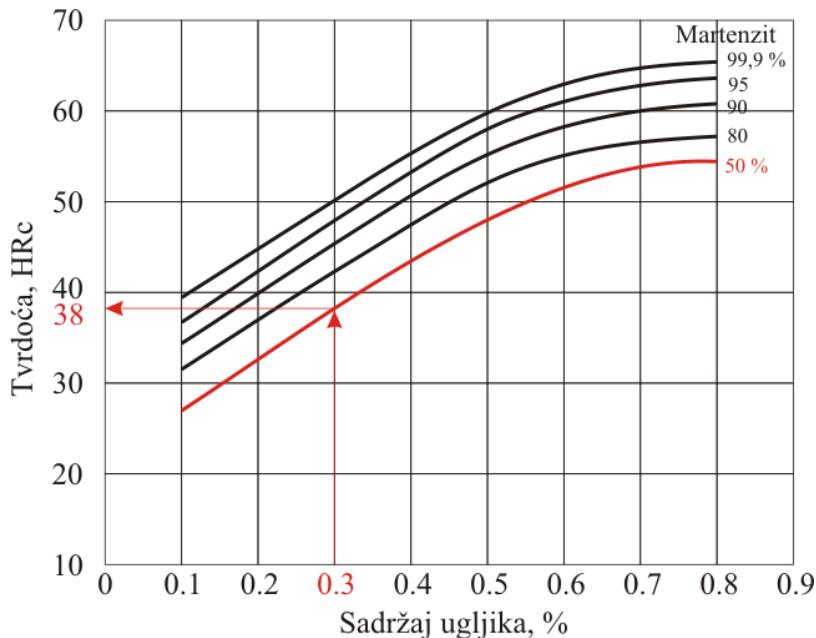
CRAFTS - LAMONT dijagrami



Slika 2. Crafts – Lamont dijagrami

Zadatak:

- Pomoću Jominy krivulje u prilogu potrebno je odrediti tok tvrdoće po presjeku osovine (U-krivulju) iz čelika EN C45E (stara HRN Č.1531) promjera 80 mm korištenjem Gerber Wyssovog dijagrama ako je osovina nakon pravilne austenitizacije gašena u mirnoj slanoj vodi. Dobivene rezultate usporediti s rezultatima dobivenim upotrebom Craft Lamont dijagrama.
- Odrediti tok tvrdoće po presjeku osovine iz čelika EN 42CrMo4 (stara HRN Č.4732) promjera 80 mm, ako je poznata Jominy krivulja (u prilogu), korištenjem Gerber Wyssovog dijagrama. Osovina je nakon pravilne austenitizacije kaljena uz jače gibanje u ulju. Dobivene rezultate usporediti s rezultatima dobivenim upotrebom Craft Lamont dijagrama.
- Primjenom dijagrama Hodge – Orebovski odredite dubinu kaljenja za osovinu a) i b). Napomena: zakaljenom smatramo onu strukturu koja nakon kaljenja sadrži barem 50% martenzita.



Slika 3. Dijagram Hodge - Orebovski

Zadatak:

- Sastaviti izvještaj o izvođenju laboratorijske vježbe te nacrtati dijagrame toka tvrdoće po presjeku za slučaj a) i b).*
- Dobivene rezultate (mjerne točke) prikazati i tablicno (sa stupcima: redni broj mjerne točke, udaljenost od površine osovine, odgovarajuća udaljenost od čela Jominy epruvete, tvrdoća)*
- Kritički se osvrnuti na dobivene rezultate u pogledu prokaljivosti tretiranih čelika.*

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

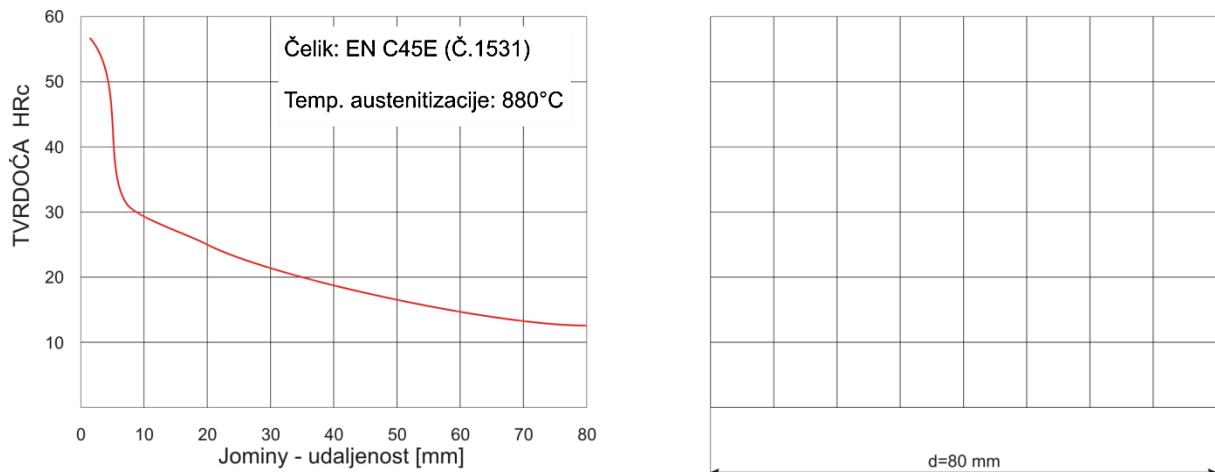
Upute za vježbe iz kolegija Materijali 2



PRILOG

R.b.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d* [mm]											
J - udaljenost											
Tvrdoća HRc											

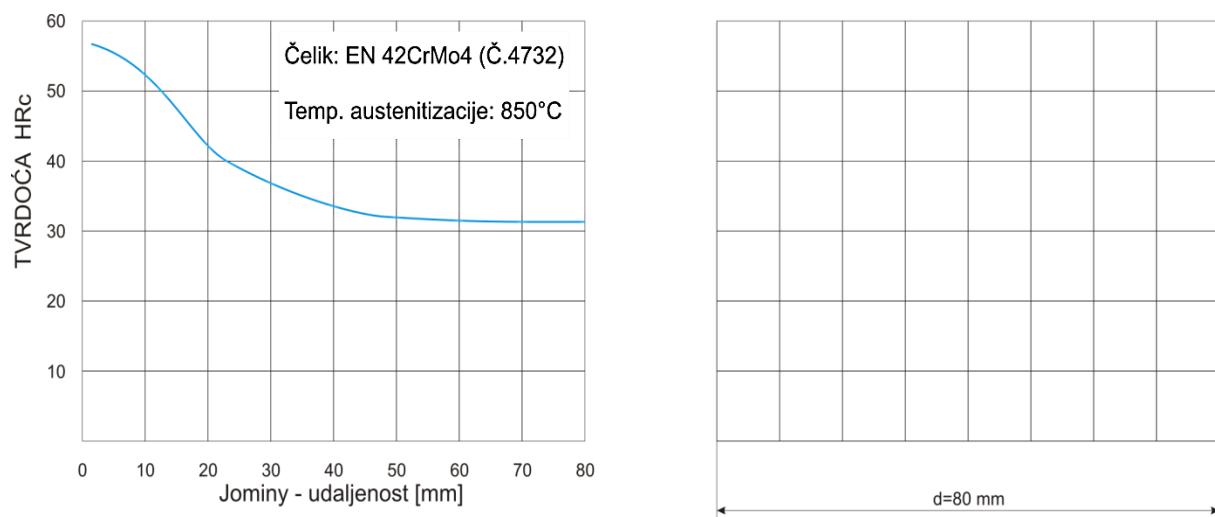
R.b.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d* [mm]											
J - udaljenost											
Tvrdoća HRc											



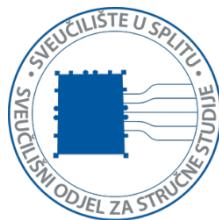
R.b.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d* [mm]											
J - udaljenost											
Tvrdoća HRc											

R.b.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d* [mm]											
J - udaljenost											
Tvrdoća HRc											

d* - udaljenost od površine



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 9

**ISPITIVANJE PROKALJIVOSTI PO
GROSSMANU**

ISPITIVANJE PROKALJVOSTI PO GROSSMANU

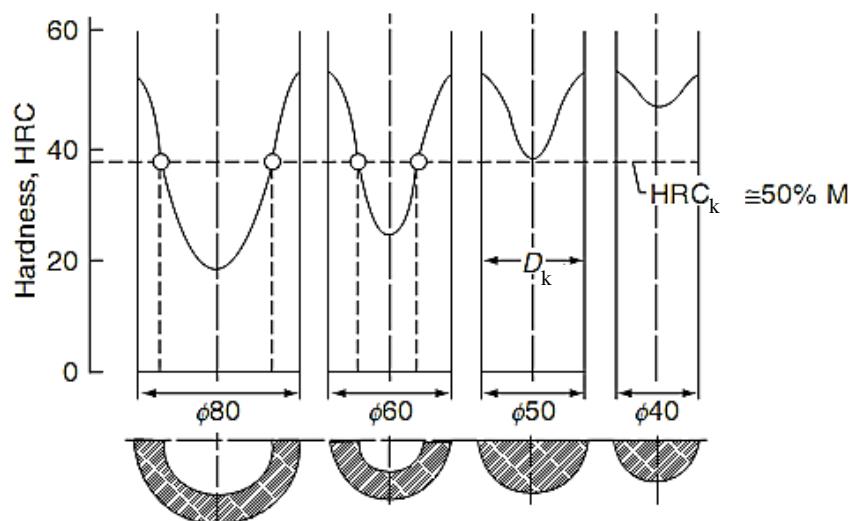
Ispitivanje prokaljivosti po Grossmanu se provodi na čeličnim uzorcima (epruvetama okruglog presjeka) različitog promjera u zadanom rashladnom mediju za gašenje (kaljenje). Ovom metodom se ispituje sposobnost nekog čelika da se zakali do određene dubine. Prema ovoj metodi određivanja prokaljivosti kao osnovna struktura uzima se ona s 50% martenzita. Karakteristika ove strukture je infleksija na krivuljama promjene tvrdoće po poprečnom presjeku ima (najstrmiji pad) upravo za sadržaj 50% martenzita (vidi *sliku 1*).

Tvrdoću za sadržaj martenzita 50% za čelike različitog sadržaja ugljika određujemo prema Hodge Oreovski dijagramu na *slici 2*.

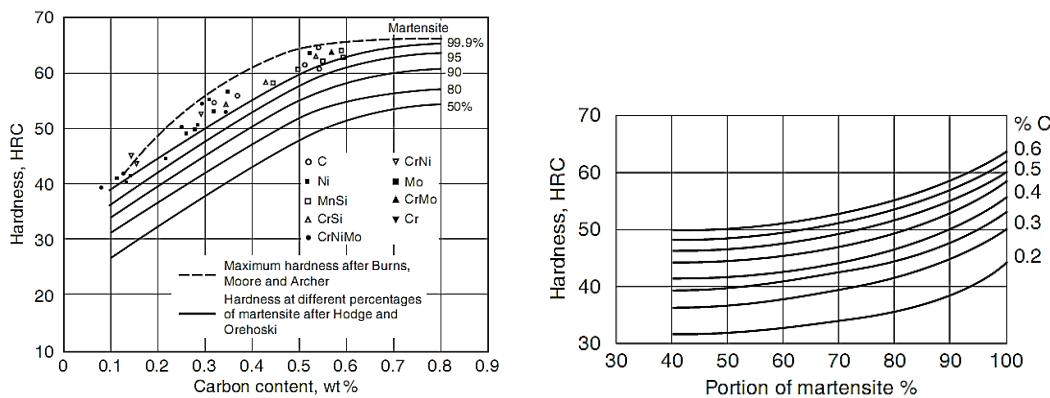
Tvrdoća koja odgovara strukturi 50% martenzita za promatrani čelik naziva se **kritična tvrdoća HRC_k** . Mjerilo prokaljivosti prema ovoj metodi jest **kritični promjer D_k** koji odgovara strukturi 50% martenzita u središtu zakaljene epruvete, tj. kritični promjer je onaj najveći promjer, za određenu brzinu hlađenja, koji nakon kaljenja nema „nezakaljenu“ jezgru (struktura sa manje od 50% martenzita).

Nedostatak ove metode je njena velika ovisnost o uvjetima hlađenja. Kako bi definirali kritični promjer neovisno o intenzitetu rashladnog sredstva uveden je teoretski pojam **idealni kritični promjer D_i** . Idealni kritični promjer D_i je točno određeni promjer, za koji se u središtu dobije struktura s 50% martenzita kaljenjem u **idealnom rashladnom sredstvu**.

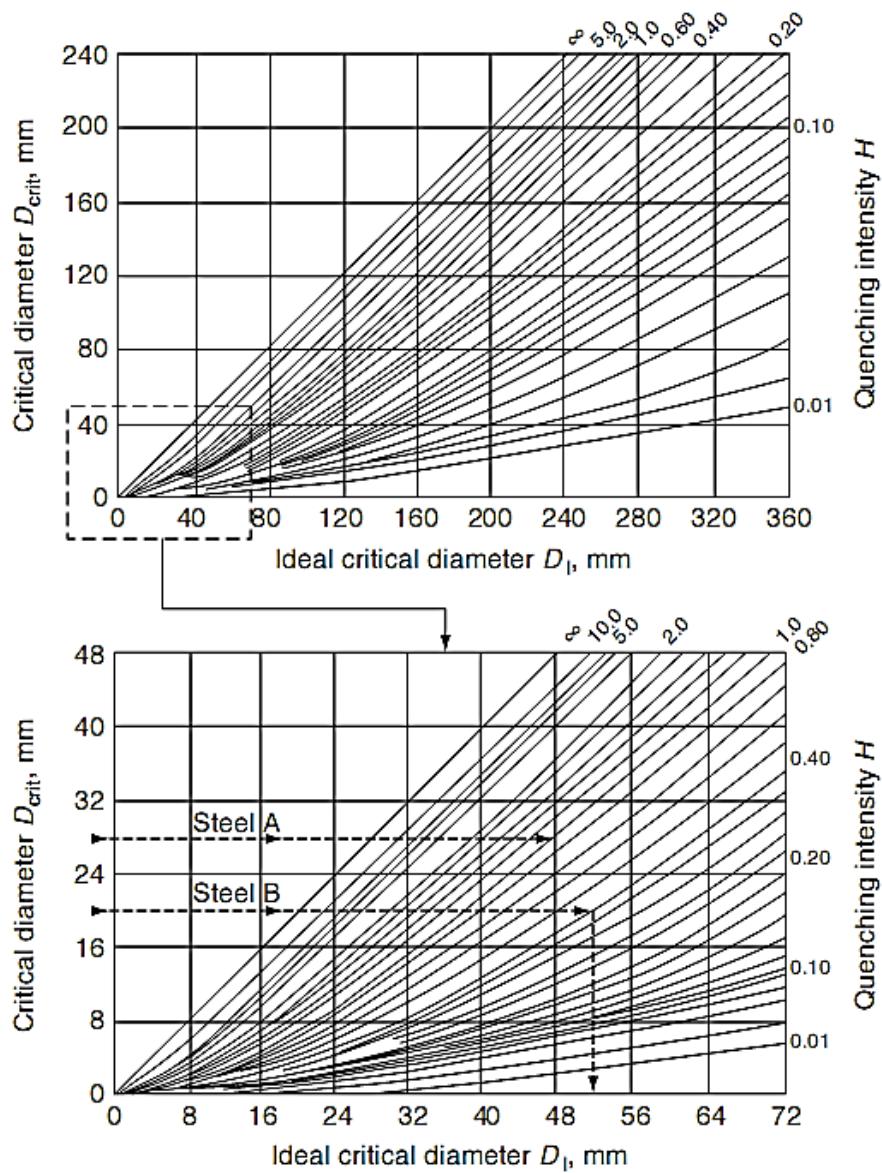
Idealno rashladno sredstvo jest ono čiji je faktor intenziteta hlađenja $H=\infty$ tj. ako je intenzitet hlađenja takav da je vrijeme potrebno za smanjenje površinske temperature austenitiziranog čelika na temperaturu rashladnog medija jednako nuli. Dakle, idealni kritični promjer D_i je pokazatelj prokaljivosti čelika, neovisan o rashladnom sredstvu čijim poznavanjem uz pomoć dijagrama na *slici 3* određujemo kritični promjer D_k za bilo koje realno rashladno sredstvo, odnosno intenzitet rashladnog sredstva H .



Slika 1. Određivanje kritičnog promjera D_k prema Grossmanu



Slika 2. Korelacija tvrdoća – sadržaj ugljika - udio martenzita u strukturi prema Hodge i Orehoski



Slika 3. Dijagram za određivanje idealnog kritičnog promjera D_i iz poznatog intenziteta rashladnog sredstva H i kritičnog promjera D_k

Provodenje ispitivanja

1. Priprema epruveta

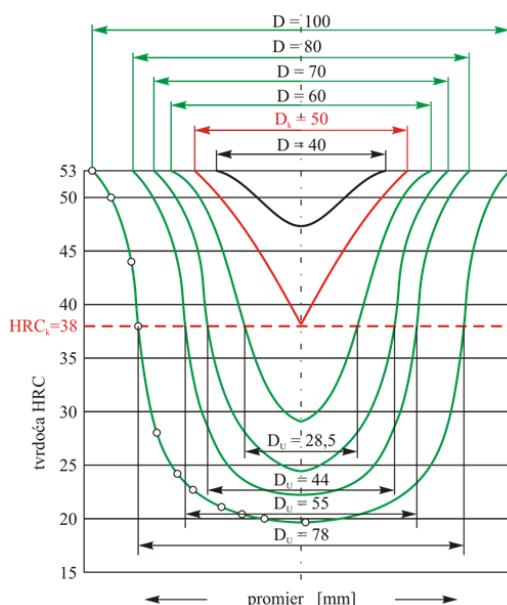
Više epruveta okruglog presjeka (najmanje dvije) različitog promjera se nakon austenitizacije i hlađenja (kaljenja) poprečno prerežu. Prilikom izbora promjera epruveta važno je da promjer bude toliki da se u presjeku dobije zakaljeni ($>50\%$ martenzita) i nezakaljeni dio ($<50\%$ martenzita). Rezanje se vrši uz intenzivno hlađenje kako unos topline prilikom rezanja ne bi utjecao na promjenu strukture.

Epruveta kritičnog promjera D_k jest ona koja u središtu poprečnog presjeka ima upravo strukturu sa 50% martenzita. Epruvete manjeg presjeka $D < D_k$ koje imaju strukturu $>50\%$ martenzita u središtu, imaju i odgovarajuću veću tvrdoću. Nasuprot ovima, epruvete promjera $D > D_k$ sadrže strukturu s $>50\%$ martenzita samo u površinskom dijelu do određene dubine. Vidi „U krivulje“ za šipke različitih promjera na *slici 1*.

2. Snimanje „U“ krivulja

Nakon rezanja i brušenja epruvete te mjerena tvrdoća duž izvodnice poprečnog presjeka dobiju se „U krivulje“ prema *slici 4*.

„U krivulje“ ucrtane u dijagramu odnose se na epruvete iz čelika s $0,3\%C$. Za ovaj čelik kritična tvrdoća prema Hodge Orehovski dijagramu na *slici 2* iznosi $HRC_k = 38$. Sjedište ove tvrdoće s „U krivuljama“ daje promjere D_U koji odgovaraju strukturi s manje od 50% martenzita za epruvetu odgovarajućeg promjera D .



Slika 4. „U krivulje“ za čelik s $0,3\%C$ i $3\%Ni$

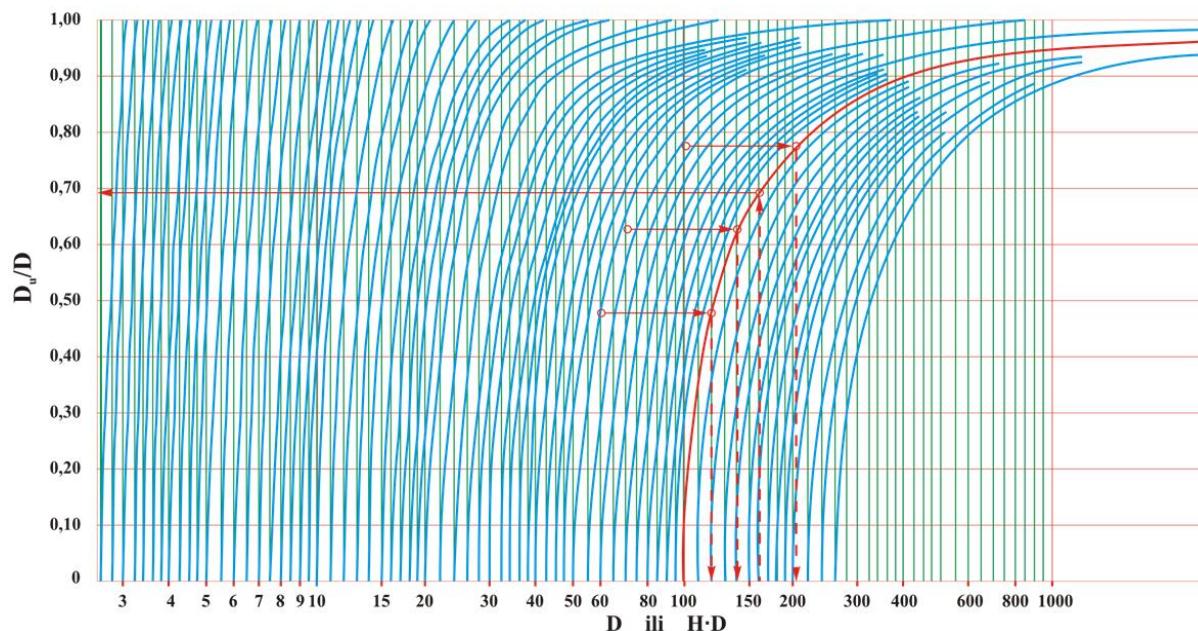
3. Određivanje intenziteta rashladnog sredstva H

Podaci dobiveni snimanjem „U krivulja“ prikazuju se prema *tablici 1*.

Tablica 1. Podaci dobiveni snimanjem „U krivulja“

Podaci iz „U krivulja“ na <i>slici 4</i>			Uz pomoć dijagrama na <i>slici 5</i>	
D	D_U	D_U/D	$(H \cdot D)$	H
100	78	0,78	200	2
70	44	0,63	140	2
60	28,5	0,475	120	2

Nadalje pomoću dobivenih podataka D i D_U/D ucrtaju se točke na prozirnu foliju preko dijagrama na *slici 5*. Pomicanjem folije lijevo ili desno pronalazi se krivulja na kojoj se preklapaju sve ucrtane točke. Projekcije preklopljenih točaka na os apscisu predstavljaju umnoške $H \cdot D$. Dijeljenjem vrijednosti $H \cdot D$ s odgovarajućim promjerom D dobiva se vrijednost intenziteta rashladnog sredstva $H = 2$ za sve promjere epruveta, vidi *tablicu 1*.



Slika 5. Dijagram za određivanje intenziteta rashladnog sredstva H i kritičnog promjera D_k

4. Određivanje kritičnog promjera D_k

Dimenzija kritičnog promjera D_k određuje se također pomoću dijagrama na *slici 5*. Prema definiciji kritični promjer je onaj kod kojeg je struktura u središtu upravo 50% martenzita tj. $D_U = 0$. Dakle uočena krivulja siječe os apscisu upravo na vrijednosti $H \cdot D_k = 100$. Slijedi uz poznati $H = 2$ da je $D_k = 50$ [mm].

5. Određivanje idealnog kritičnog promjera D_i

Idealni kritični promjer određuje se pomoću dijagrama na *slici 3* uz poznavanje vrijednosti kritičnog promjera D_k i intenziteta rashladnog sredstva H , pa je za $D_k = 50$ mm i $H = 2$ idealni kritični promjer $D_i = 60$ mm.

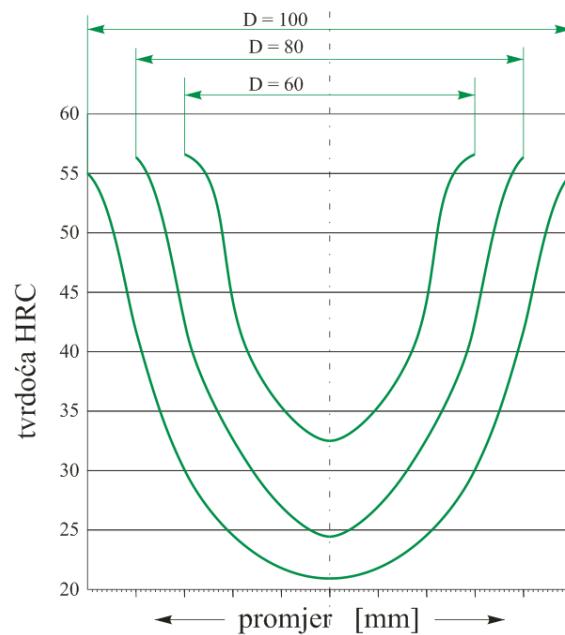
Određivanje kritičnog promjera D_k i D_i uz poznati intenzitet rashladnog sredstva H

Ukoliko je poznat intenzitet rashladnog sredstva, onda je dovoljno kaliti samo jednu epruvetu čiji promjer mora biti dovoljno velik da nakon kaljenja ima i dio nezakaljene jezgre tj. $D > D_k$. Za prethodni slučaj može se uzeti valjak promjera 80 mm. Nakon kaljenja i crtanja „U krivulje“ za ovaj valjak odredi se promjer D_U (vidi *sliku 4*). Konačno pomoću dijagrama (*slika 4*) uz vrijednosti $D_U / D = 0,69$ i poznati $H=2$ očita se vrijednost $H \cdot D_k = 100$. Slijedi da je kritični promjer $D_k = 50$ mm. Nadalje iz dijagrama na *slici 3* na prethodno pojašnjeni način određuje se idealni kritični promjer.

Zadatak 1:

U cilju određivanja prokaljivosti po Grossmanu izvršeno je snimanje „U krivulja“ legiranog čelika s 0,42% ugljika (vidi *sliku 6*) za epruvete promjera 60, 80 i 100 mm.

- Odrediti intenzitet rashladnog sredstva u kojem je izvršeno gašenje epruveta nakon pravilne austenitizacije.
- Odrediti kritični promjer D_k .
- Odrediti idealni kritični promjer D_i .

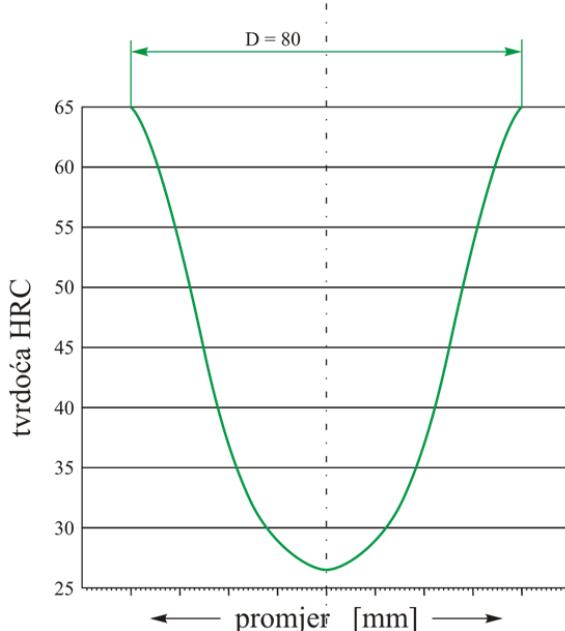


Slika 6. U krivulje legiranog čelika s 0,42%C

Zadatak 2:

Na *slici 7* prikazana je „U krivulja“ čelika s 0,6% ugljika za epruvetu promjera 80 mm. Epruveta je zakaljena u rashladnom sredstvu intenziteta $H = 2$.

- Odrediti promjer nezakaljene jezgre epruvete.
- Odrediti kritični promjer D_k .
- Odrediti idealni kritični promjer D_i .



Slika 7. U krivulja čelika s 0,6%C



Rješenje zadatka

Zadatak 1

Podaci iz „U krivulja“ na <i>slici 4</i>			Uz pomoć dijagrama na <i>slici 5</i>	
D	D_U	D_{U/D}	(H·D)	H
100	80	0,80	475	4,75
80	59	0,74	380	4,75
60	36,6	0,61	285	4,75

$H \cdot D_k = 200$. Slijedi uz poznati $H = 4,75$ da je $D_k = 42$ mm.

Iz dijagrama $D_i = 46$ mm.

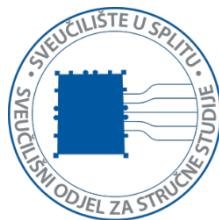
Zadatak 2

Podaci iz „U krivulja“ na <i>slici 4</i>			Uz pomoć dijagrama na <i>slici 5</i>	
D	D_U	D_{U/D}	(H·D_k)	D_k
80	57	0,7125	52	26

$H \cdot D_k = 26$. Slijedi uz poznati $H = 2$ da je $D_k = 26$ mm.

Iz dijagrama $D_i = 36$ mm.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 10. i 11.

POBOLJŠAVANJE

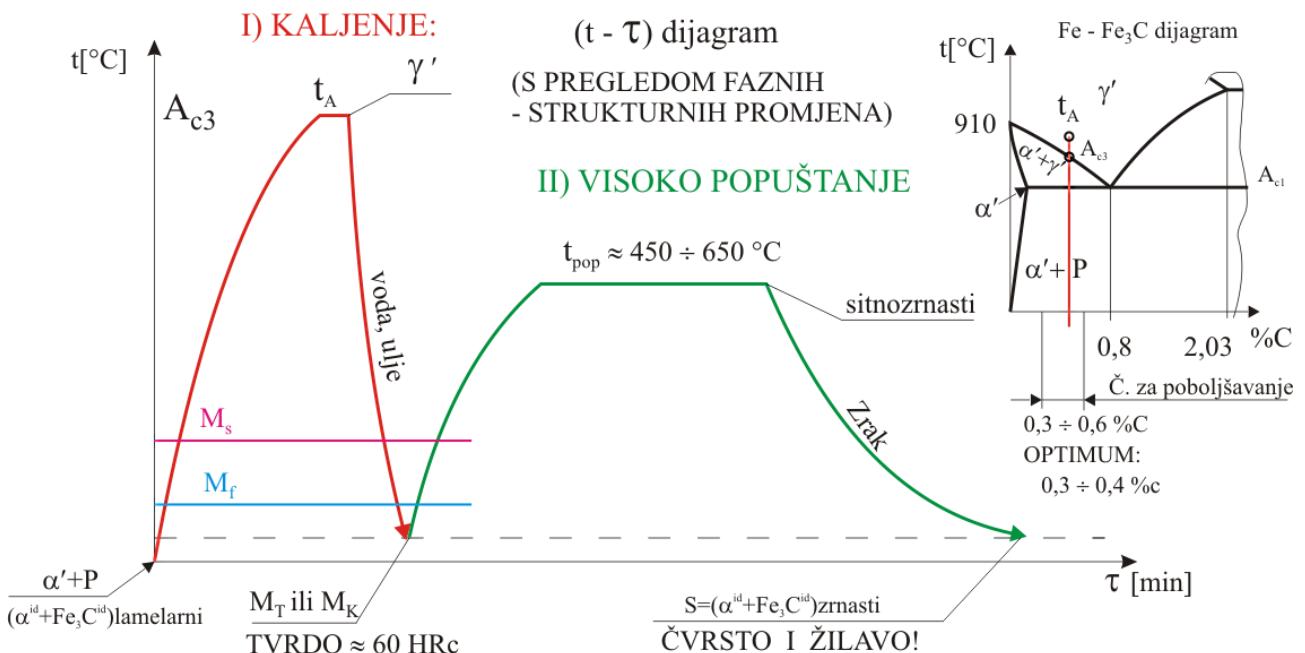
POBOLJŠAVANJE

Cilj vježbe je ispitivanje utjecaja toplinske obrade poboljšanja na mehanička svojstva tretiranog čelika za poboljšavanje. Razvijena su dva načelno različita postupka poboljšavanja:

A) OBIČNO (KLASIČNO) POBOLJŠANJE

Ovaj se postupak provodi u dvije faze, prema **slici 1**:

- I) faza: Obično kaljenje u vodi, ulju ili na zraku i
- II) faza: Visokotemperaturno popuštanje na odgovarajućoj temperaturi ispod Ac_1



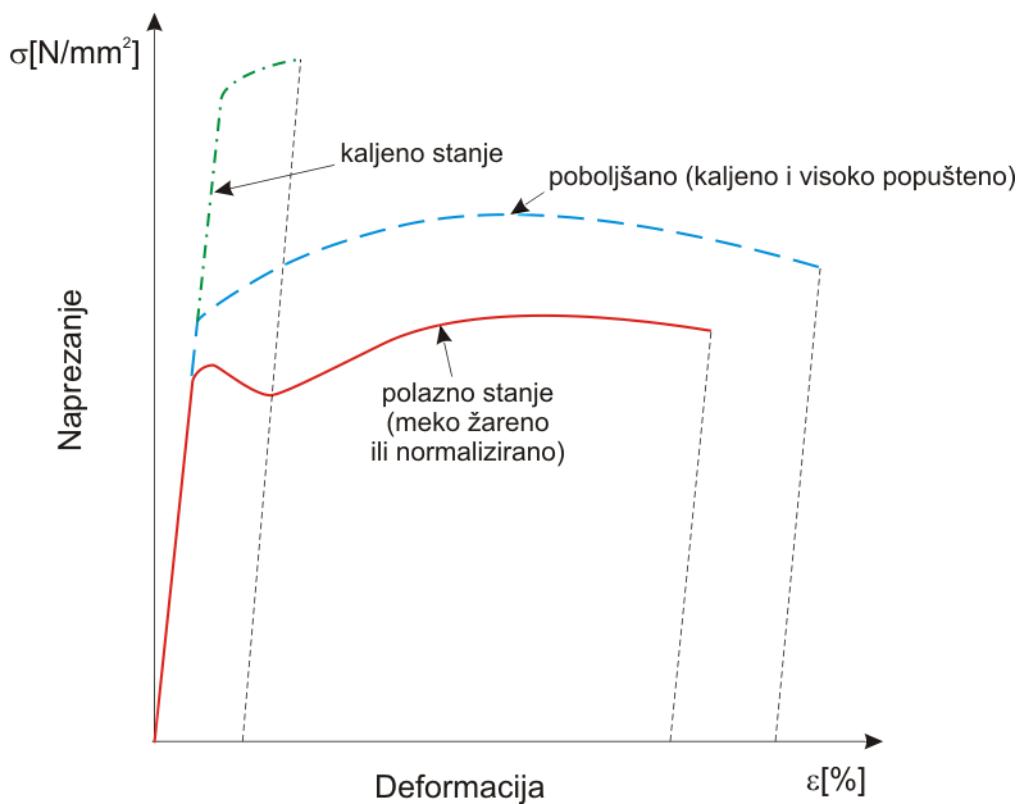
Slika 1. Dijagram postupka klasičnog poboljšanja čelika

Ovim postupkom u čeliku se dobiju tzv. tipične faze **zrnastih ortoeutektoida** ($\alpha'^{id} + Fe_3C^{id}$), ali sitnijih od perlitnih kristala. Izborom temperature i trajanja visokotemperaturnog popuštanja, već prema želji, ostvaruje se **sorbit** ili **troostit**, dakle **poboljšana struktura eutektoida** koja **nije lamelarna**.

Ovaj se postupak primjenjuje uglavnom u toplinskoj obradi konstrukcijskih i nekih alatnih čelika, a cilj je poboljšati:

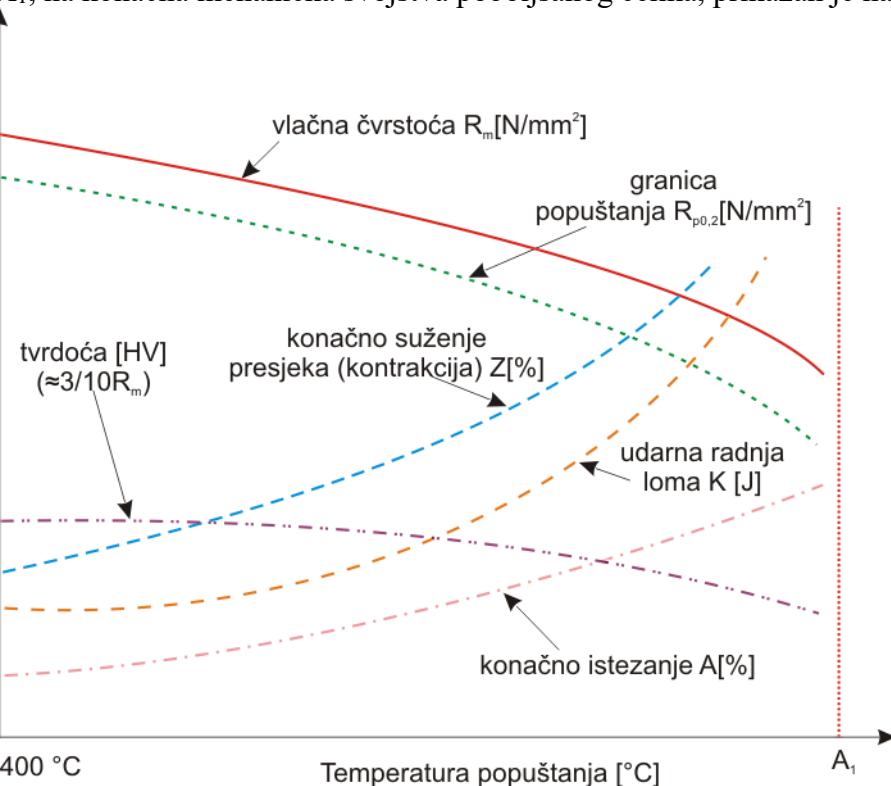
- svojstva rastezljivosti i žilavosti u odnosu na prethodno zakaljeno stanje,
- svojstvo čvrstoće u odnosu na polazno (normalizirano ili meko žareno) stanje

prema **slici 2**.



Slika 2. Kvalitativni prikaz dijagrama rastezanja epruveta jednog čelika nakon pojedine faze postupka poboljšanja

Utjecaj razine odabrane temperature visokog popuštanja, počevši od $t_p = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$ prema temperaturi A_1 , na konačna mehanička svojstva poboljšanog čelika, prikazan je na slici 3:



Slika 3. Kvalitativni prikaz utjecaja temperature t_p visokog popuštanja

Stoga, što je temperatura t_p viša, tim su **niže** vrijednosti rastezne čvrstoće, granice razvlačenja i tvrdoće, a **više** su vrijednosti udarne žilavosti, relativnog produljenja i kontrakcije presjeka!

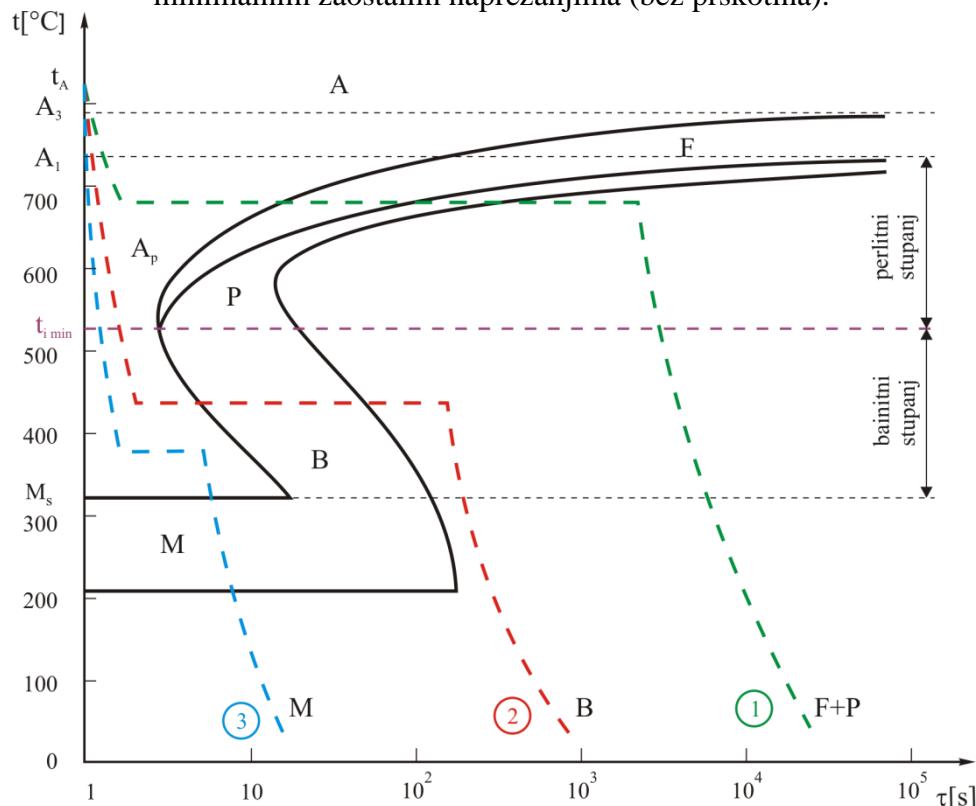
B) IZOTERMIČKO POBOLJŠANJE

Ovaj se postupak izvodi tako da se izradak s pravilne temperature austenitizacije t_A prenese neposredno u olovnu ili solnu kupku temperature iznad temperature M_s . Izradak u kupki na toj odabranoj temperaturi izoterme $M_s < t_{iz} < A_1$ treba zadržati sve dok se pretvorba pothlađenog austenita A potpuno ne završi: trajanje zadržavanja procjenjuje se iz pripadajućeg izotermičkog TTT dijagrama tretiranog čelika. Nakon vađenja iz rastaljenog olova ili soli izradak se hlađi polagano na zraku, prema **slici 4**.

krivulja 1 ... predstavlja zapravo izotermički postupak dobivanja lamelarnog perlita, sorbita ili troostita;

krivulja 2 ... predstavlja izotermičko poboljšanje, tj. dobivanje gornjeg, srednjeg ili donjeg bajnita;

krivulja 3 ... predstavlja stepeničasto izotermičko kaljenje, tj. dobivanje martenzita s minimalnim zaostalim naprezanjima (bez prskotina).



Slika 4. Kvalitativni prikaz izotermičkog TTT dijagrama podeuktoidnog ugljičnog čelika s cca. 0,5%C s ucrtanim krivuljama hlađenja prigodom izotermičke pretvorbe A

Prednost izotermičkog poboljšanja je u tome što se sprječi eventualno nastajanje pukotina na izratku, koje mogu nastati pri običnom načinu kaljenja i popuštanja (klasično poboljšanje). Tako se postiže i povećanje žilavosti! Posebno je značajno postizanje visoke žilavosti uz relativno visoku tvrdoću (i do 50 – 55 HRC).



Općenito se može reći: poboljšanje pruža mogućnost postizanja **optimalnog kompromisa** mehaničkih svojstava (prvenstveno žilavosti), a u cilju regulacije dinamičke izdržljivosti uz zadržavanje relativno visoke otpornosti na habanje.

Zadatak:

U laboratorijskoj vježbi ispitati i ocijeniti utjecaj pojedinog postupka poboljšanja na mehanička svojstva i to na slijedeći način:

Tri jednake kratke epruvete za vlačnu probu, od istog čelika za poboljšanje, npr. EN 42CrMo4 (HRN Č4732), poboljšati prema uputi u tablici. Radi međusobne usporedbe nakon toplinskog tretmana za sve epruvete: a) ispitati tvrdoću HRC; b) izvršiti vlačnu probu te odrediti vlačnu čvrstoću, granicu popuštanja, elongaciju i kontrakciju.

Ispitivanje provesti na uzorcima prema donjoj tablici, a dobivene rezultate upisati u tablicu:

Uzorak br.:	Toplinsko stanje:	Tvrdoća HRC	Rm MPa	Rp MPa	A5 %	Z %
1	Klasično poboljšati: - ishodni uzorak s pravilne $t_A=850^{\circ}\text{C}$ zakaliti u ulju - popuštanje izvršiti na $t_{pop}=500^{\circ}\text{C}$ u trajanju od 30 min					
2	Klasično poboljšati: - ishodni uzorak s pravilne $t_A=850^{\circ}\text{C}$ zakaliti u ulju - popuštanje izvršiti na $t_{pop}=650^{\circ}\text{C}$ u trajanju od 30 min					
3	Izotermički poboljšati: - ishodni uzorak s pravilne $t_A=850^{\circ}\text{C}$ uroniti u olovnu kupku $t_{iz}=400^{\circ}\text{C}$ i zadržati u kupki do završetka pretvorbe prema odgovarajućem TTT dijagramu					

Vlastita zapožanja: (usporediti međusobno rezultate ispitivanja upisane u gornju tabelu i prokomentirati ih svojim riječima!)

Izvještaj s laboratorijskih vježbi:

- Nacrtati Hookeove dijagrame „ $\sigma-\varepsilon$ “ za sve tri epruvete.
- U odgovarajući kontinuirani TTT dijagram u prilogu za izabrani čelik ucrtati krivulju hlađenja koja odgovara kaljenju prve dvije epruvete, te u odgovarajućem izotermičkom TTT dijagramu u prilogu krivulju za izotermičko poboljšavanje treće epruvete.
- Nacrtati pripadajuće dijagrame toplinske obrade poboljšavanja za sve tri epruvete.

Prilog: Pripadajući TTT - dijagrami iz ATLASA

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Upute za vježbe iz kolegija Materijali 2

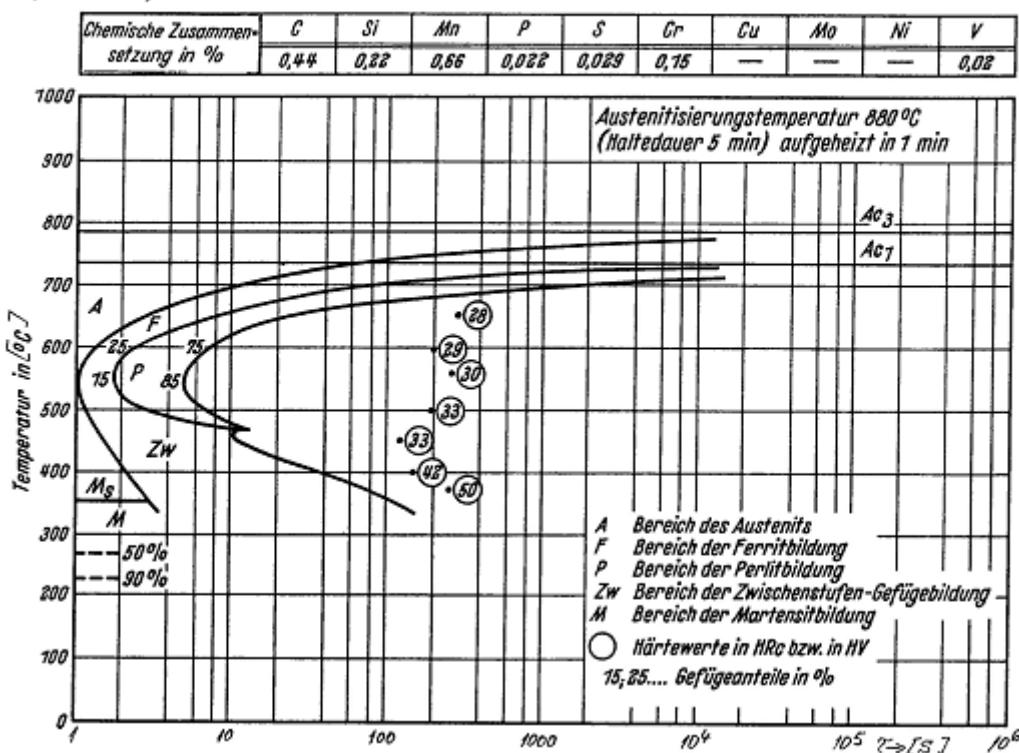


EN 2C45 - HRN Č.1531 IZOTERMIČKI TTT DIJAGRAM

Stahl Ck 45
(Schmelze 8)

Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild
(isothermisch)

II-101 D

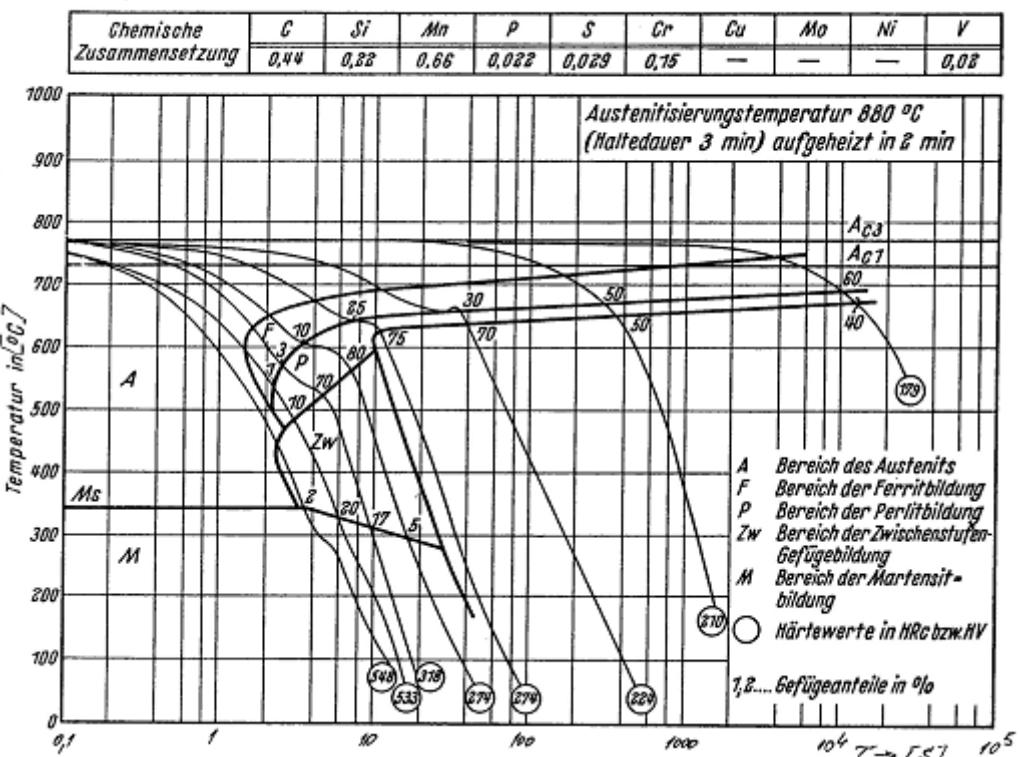


EN 2C45 - HRN Č.1531 KONTINUIRANI TTT DIJAGRAM

Stahl Ck 45
(Schmelze 8)

Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild
(kontinuierlich)

II-101 E



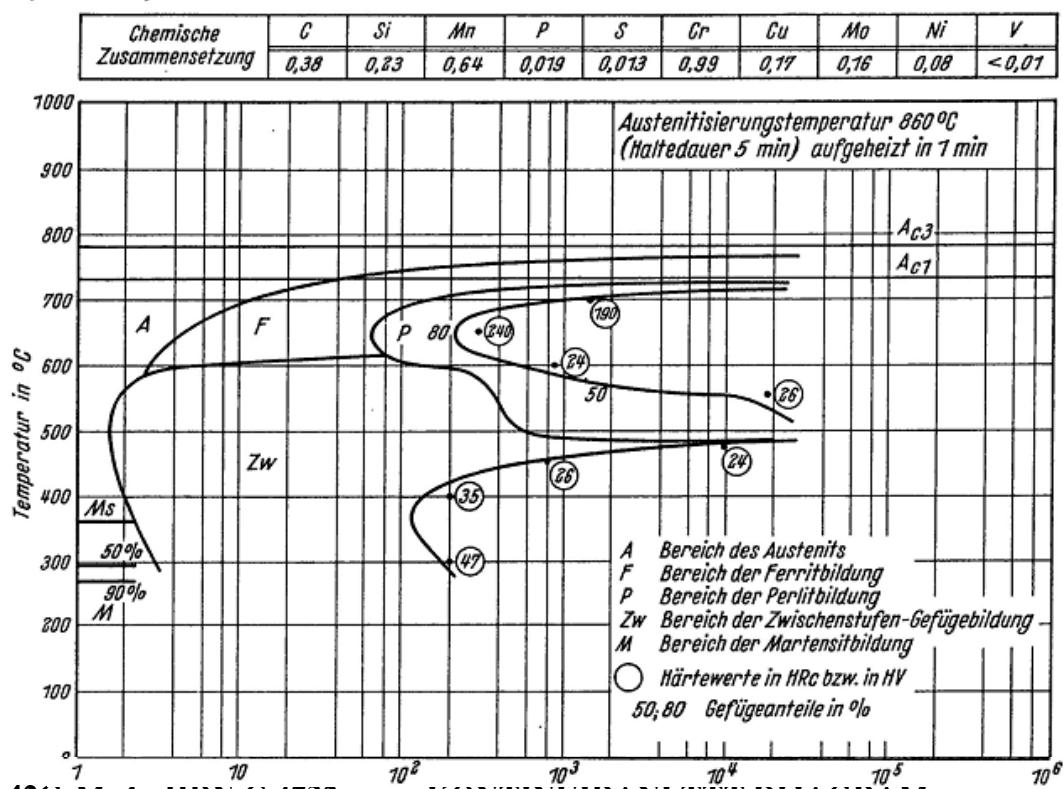
EN 42CrMo4 - HRN Č.4732

IZOTERMIČKI TTT DIJAGRAM

Stahl 42 CrMo 4
(Schmelze 5)

Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild
(isothermisch)

II-109 D



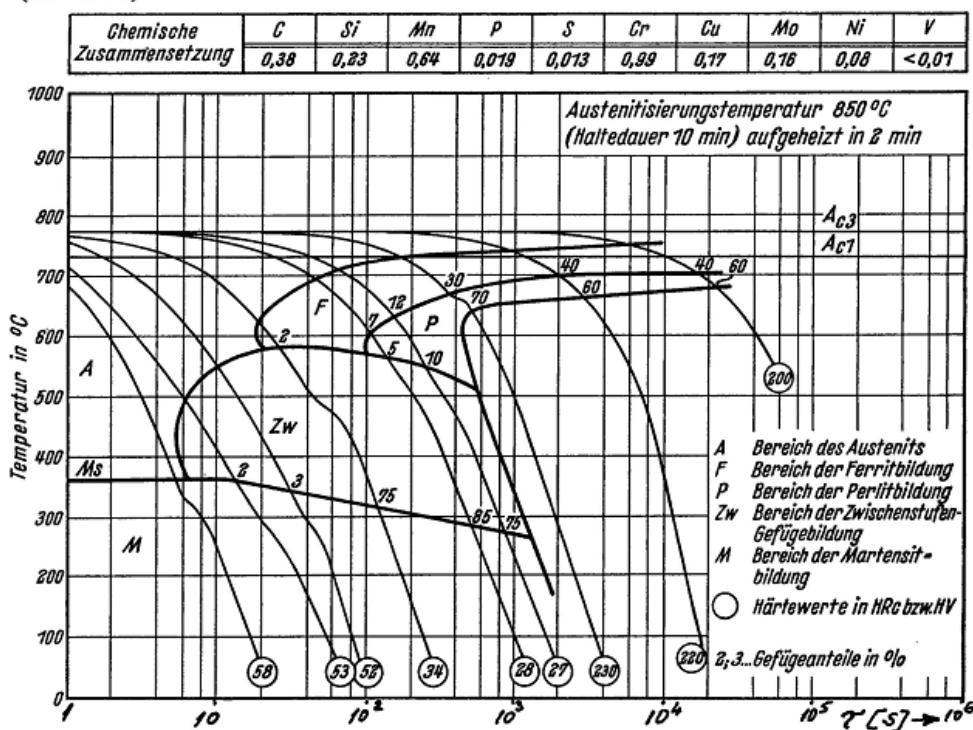
EN 42CrMo4 - HRN C.4732

KONTINUIRANI TTT DIJAGRAM

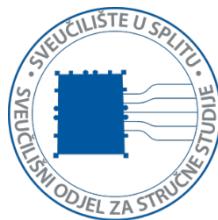
Stahl 42 CrMo 4
(Schmelze 5)

Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild
(kontinuierlich)

II-109 E



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 12

METALOGRAFIJA I METALOGRAFSKI PREGLED TOPLINSKI OBRAĐENIH ČELIKA

METALOGRAFSKO ISPITIVANJE METALA

1. UVOD

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

Osnovni zadatak metalografije je da pri određenom kemijskom sastavu iz pregleda makro i mikro strukture odredi svojstva i ponašanje materijala pri danim uvjetima opterećenja i da ukaže na najpovoljniju strukturu za određeni proces prerade ili područje primjene. Osim toga metalografija je najvažniji postupak kontrole tekuće proizvodnje.

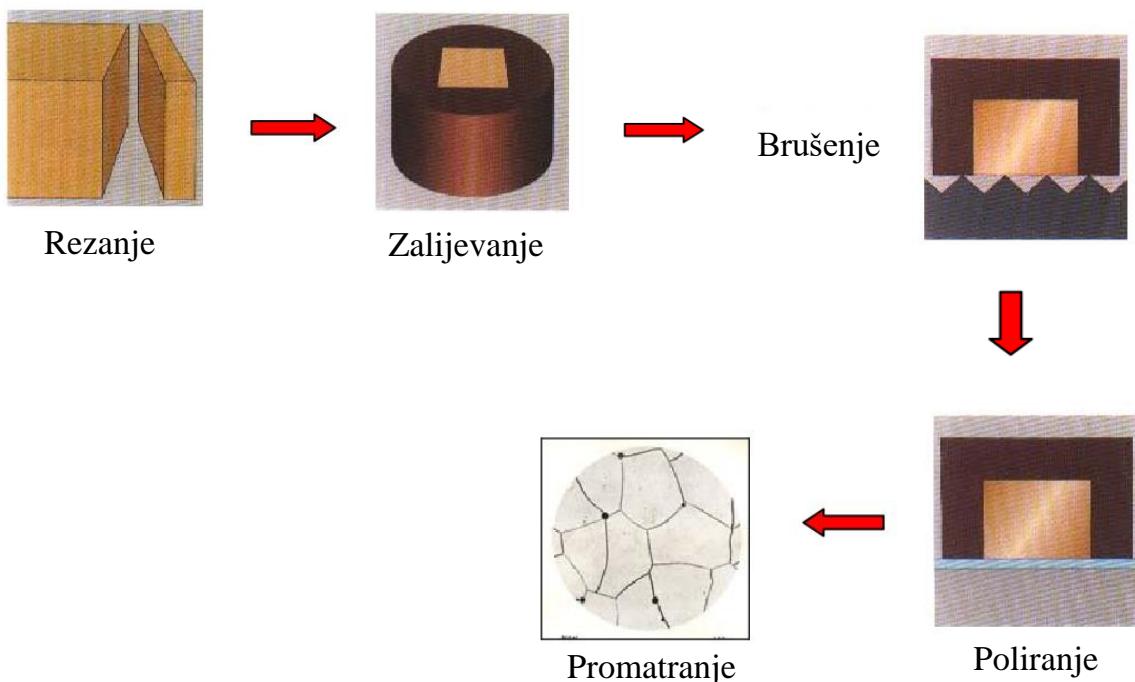
Premda metalografski postupci ispitivanja ne mogu dati odgovore na sva pitanja i probleme vezane uz materijale, bez njih se suvremeno ispitivanje metala i legura ne može ni zamisliti.

2. MIKROSTRUKTURNA ANALIZA

Analiza mikrostrukture pomoću svjetlosnog mikroskopa je jedan od najčešće primjenjivanih metalografskih postupaka ispitivanja. Cilj analize mikrostrukture je što vjernije i jasnije prikazati strukturu nekog materijala i odrediti vrstu, veličinu i količinu pojedinih mikro konstituenata (faza) te njihovu raspodjelu. Jedan od uvjeta za kvalitetnu analizu mikrostrukture jest kvalitetna priprema ispitnih uzoraka.

3. PRIPREMA METALOGRAFSKIH UZORAKA

Kvalitetan ispitni uzorak za analizu mikrostrukture pomoću svjetlosnog mikroskopa mora imati potpuno ravnu i glatku površinu. Priprema takvog uzorka može se podijeliti u nekoliko faza koje slijede jedna za drugom, što je shematski prikazano na slici 1.



Slika 1. Shematski prikaz procesa pripreme metalografskog uzorka

Ovisno o cilju ispitivanja prvo treba odrediti na kojem dijelu ispitivanog komada i u kojem položaju treba biti površina ispitnog uzorka, nakon čega slijedi rezanje uzorka. Uzorci su relativno malih dimenzija (oko 15x15x10 mm), ali ovisno o potrebama i raspoloživoj opremi za pripremu i analizu dimenzije uzorka mogu biti i veće. Rezanje treba obaviti uz intenzivno odvođenje topline kako ne bi došlo do strukturnih promjena ispitivane površine.

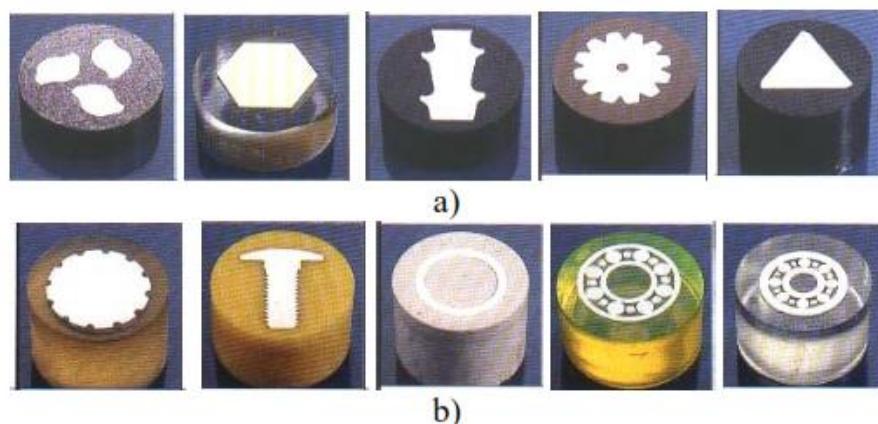


Slika 2. Uredaj za rezanje uzoraka

Nakon rezanja uzorak se zalijava u umjetnu smolu. Zbog malih dimenzija, nepravilnog oblika, ali i potrebe uvida u mikrostrukturu na rubovima uzorka najčešće se uzorci prije brušenja trebaju zaliti u posebna sredstva koja omogućuju njihov prihvati i kvalitetnu pripremu.

Zalijevanje može biti toplo, prešanjem s granulatom na povišenim temperaturama do 180 °C i tlaku do 4 bara, (npr. bakelit, termoplaste na akrilnoj bazi, epoksidna smola), ili hladno uz pomoć dvokomponentnih ili trokomponentnih sredstava (npr. acryl, polyester, epoksidne smole).

Na slici 3 nalazi se nekoliko primjera toplo (a) i hladno (b) zalivenih uzoraka.



Slika 3. Primjeri toplo (a) i hladno (b) zalivenih metalografskih uzoraka

Priprema se dalje nastavlja brušenjem i poliranjem površine ispitnog uzorka. Brušenje je najagresivniji postupak odnošenja materijala u postupku pripreme uzorka. Kod brušenja abraziv je učvršćen na podlogu, najčešće papir ili platno. Brusni papir je gradiran prema veličini

abrazivnog zrna. Oznake na brusnim papirima se odnose na broj rupica na situ u duljini 1 inča - 25,4 mm (npr. na brusnom papiru oznake P240 abrazivna zrnca su prosijana kroz sito koje na duljini 1 inča ima 240 rupica). Za pripremu uzoraka koriste se brusni papiri finoće od P120 do P2000.

Pri brušenju se u svakom sljedećem stupnju koristi brusno sredstvo sa sve finijim česticama. Brušenje se može obavljati ručno ili pomoću posebnih uređaja za pripremu uzoraka.



Slika 4. Uređaj za ručnu pripremu uzoraka



Slika 5. Uređaj za poliranje uzoraka

Poliranje je najčešće završni korak u pripremi uzoraka pri kojem se uklanjam ogrebotine i postiže visoko sjajna površina. Abraziv (najčešće u obliku paste) se slobodno giba između uzorka i fine tkanine za poliranje. Koji će se postupak primijeniti i s kojom granulacijom abraziva ovisi o materijalu uzorka. Najčešći postupci su ipak grubo i fino brušenje te završno poliranje. Ti postupci mogu biti provedeni ručno ili strojno, slika 3,4 i 5.



Slika 6. Uređaj za brušenje i poliranje uzoraka.



Često se koristi i elektrolitičko poliranje površine. U odnosu na mehaničko poliranje ovo je bolji postupak jer se površina uzorka plastično ne deformira, a skraćuje se i vrijeme pripreme. Ispitni uzorci se poslije poliranja peru u toploj ili hladnoj vodi, ispiru u alkoholu i suše u struji toplog zraka.

Razvijanje strukture

Ponekad je dovoljno promatranje površine uzorka pri manjim ili većim mikroskopskim povećanjima u poliranom stanju, ali u najvećem broju slučajeva, ipak je potrebno učiniti vidljivim pojedine konstituente i/ili faze, tj. potrebno je razviti strukturu. To se postiže primjenom različitih sredstava i postupaka za nagrizanje površine ispitnih uzoraka.

Prema načinu na koji djeluje svako nagrizanje se može svrstati u:

- **nagrizanje po granicama zrna** pri kojem se nagrizaju isključivo granice zrna metala ili legure, a pojedina zrna se ne razlikuju po obojenju, ili
- **površinsko nagrizanje zrna** poslije kojeg se kristali pojedinih faza razlikuju po izgledu.

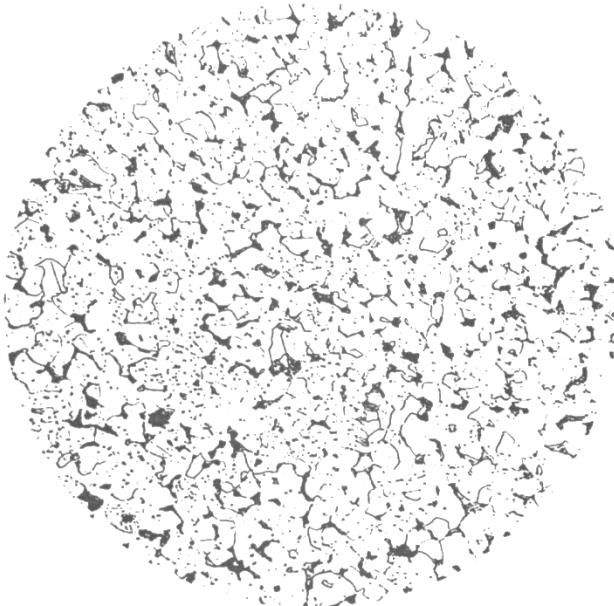
METALOGRAFSKI PREGLED TOPLINSKI OBRAĐENIH ČELIKA

U ovoj vježbi je cilj razmotriti utjecaj toplinske obrade na metalografsku sliku. U ovom pregledu razmotrit će se dva tipična primjera kod kojih je izgled metalografske slike posljedica primjenjenog toplinskog tretmana, odnosno pojedinog stadija tijekom toplinske obrade.

U primjeru a) promatrati će se jedan čelik za cementiranje u pojedinom stadiju odgovarajuće toplinske obrade.

U b) primjeru promatrati će se jedan čelik za poboljšanje također u pojedinom stadiju pripadajuće toplinske obrade.

a) RAZMATRANJE Č.1221 po HRN (2C15 po EN) s približno 0,15 %C nakon nagrizanja s 2% dušičnom kiselinom (NITAL-om)

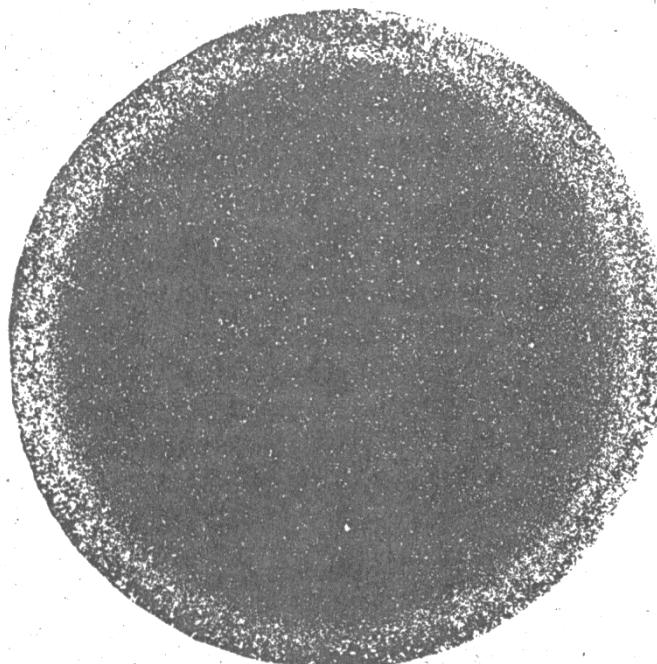


Slika 7. (povećanje 250 x)
Mikrostruktura dobavljenog materijala prije ikakvog toplinskog tretmana.

Faze i struktura:

Feritni i perlitni neusmjereni kristali sitnozrnaste strukture.

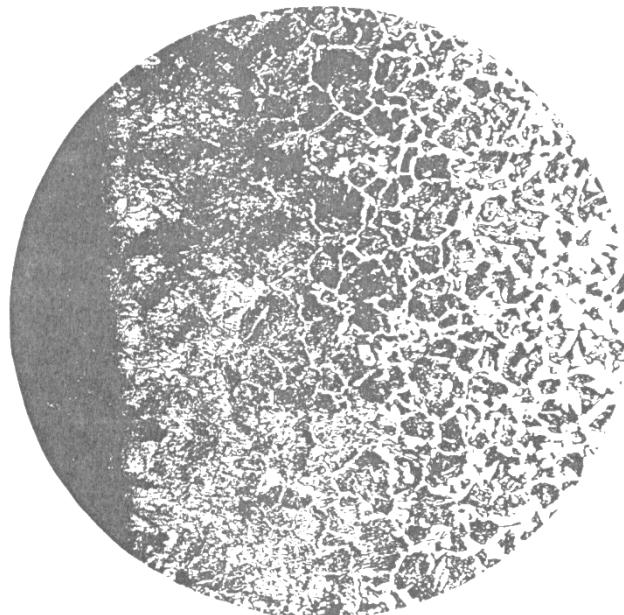
Slika pripada uzorku br. 1
u stadiju: Normalizirano ili meko žareno.



Slika 8. (povećanje 6 x)
Pregledna slika presjeka (makro snimak) dobivenu uz pomoć kosog osvjetljenja.

Faze i struktura:
Pougljičeni rub uzorka (svijetao).

Slika pripada uzorku br. 2
u stadiju: Uzorak je 5 sati bio izložen na temperaturi $t_A = 900 \text{ } ^\circ\text{C}$ u granulatu (krutom sredstvu) za pougljičavanje. Rezultat ovoga je pougljičeni rub. Nakon 5 sati uzorak je polagano ohlađen.



Slika 9. (povećanje 40 x)

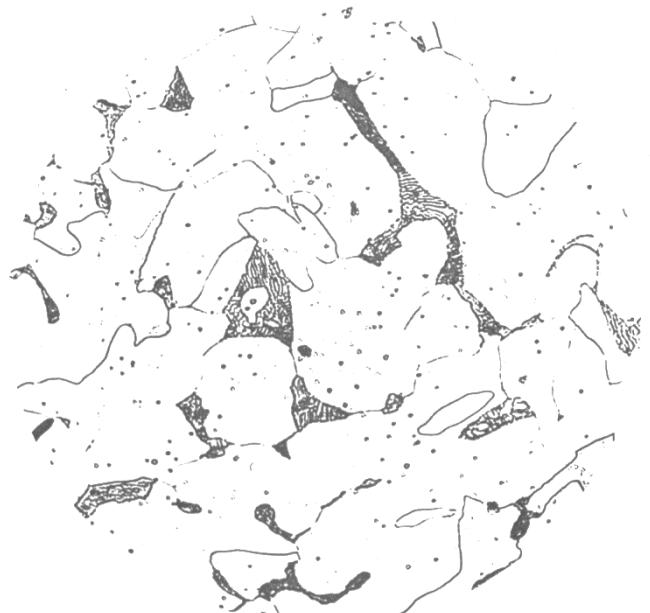
Vidimo preglednu sliku pougljičene površine uzorka i prijelaznog područja prema jezgri.

Faze i struktura:

Perlitni rub (eutektoidni) s cca 0,8 %C, a prema jezgri %C opada, tj. javlja se sve više primarnog ferita.

Slika pripada uzorku br. 2

u stadiju: Isti je kao i na slici 2.



Slika 10. (povećanje 250 x)

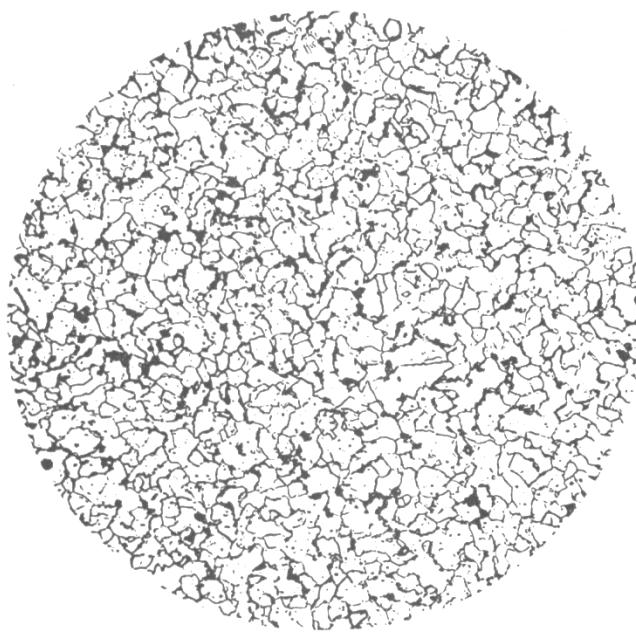
Mikrostruktura jezgre niskougljičnog čelika s cca 0,15 %C, koja je bila izložena 5 sati na temperaturi $t_A = 900^{\circ}\text{C}$.

Faze i struktura:

Grubi feritni i perliti kristali (usporedite sliku 1 u istom povećanju !).

Slika pripada uzorku br. 2

u stadiju: Isti je kao i na sl. 2.



Slika 11. (povećanje 250 x)

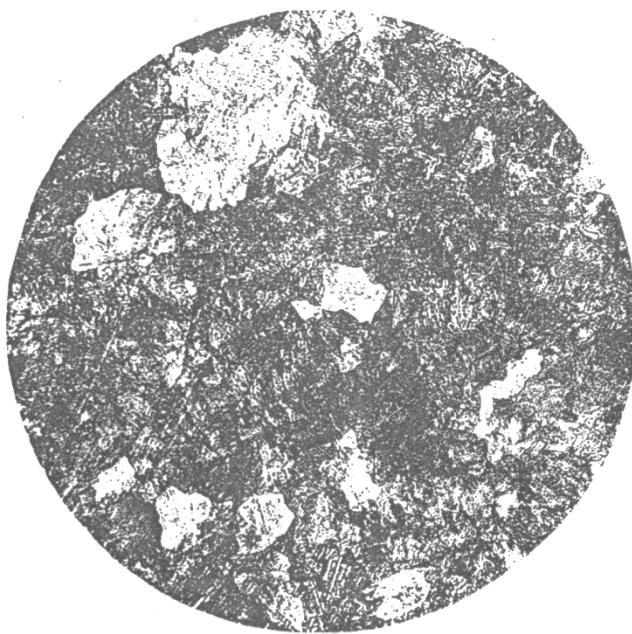
Mikrostruktura jezgre
niskougljičnog čelika s cca 0,15 %C.

Faze i struktura:

Usitnjeni feritni i perlitni kristali
(usporedite sliku 1 i sliku 4 u istom
povećanju !).

Slika pripada uzorku br. 3

u stadiju: Uzorak je 5 sati bio
izložen na temperaturi $t_A = 900 ^\circ\text{C}$ u
granulatu (krutom sredstvu) za
pougljičavanje. Nakon 5 sati uzorak
je polagano ohlađen, a zatim
normaliziran (nakon kratkotrajnog
austenitiziranja je s temperature $t_A =$
 $900 ^\circ\text{C}$ polagano ohlađen na zraku).



Slika 12. (povećanje 250 x)

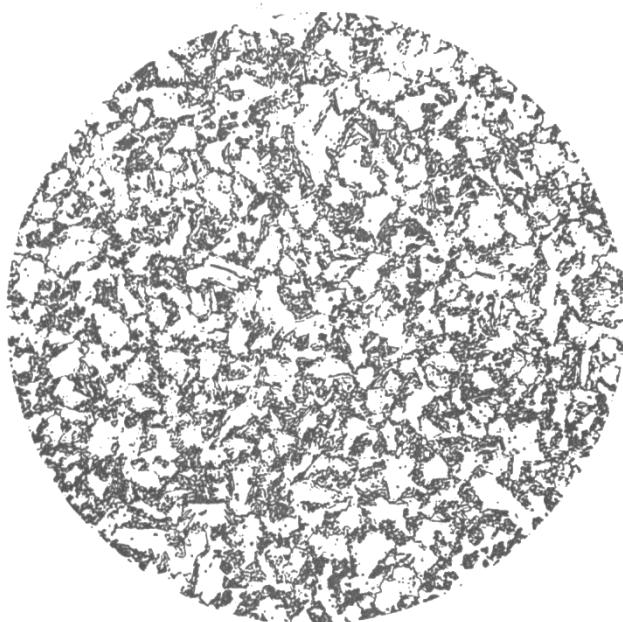
Mikrostruktura površine
eutektoidnog čelika s cca 0,8 %C
nakon normalizacije.

Faze i struktura:

Normalizacija koja je izazvala
usitnjene zrna u jezgri s izvornih
cca 0,15 %C, na površini je
izazvala ipak ukrupnjenje perlitnog
zrna ($A_3 = A_1 = 723 ^\circ\text{C}$ za 0,8% C
koliko sadrži površina nakon
pougljičenja, kako je premašena s
temperaturom $t_A = 900 ^\circ\text{C}$)

Slika pripada uzorku br. 3

u stadiju: Isti je kao i na sl. 5.



Slika 13. (povećanje 250 x)

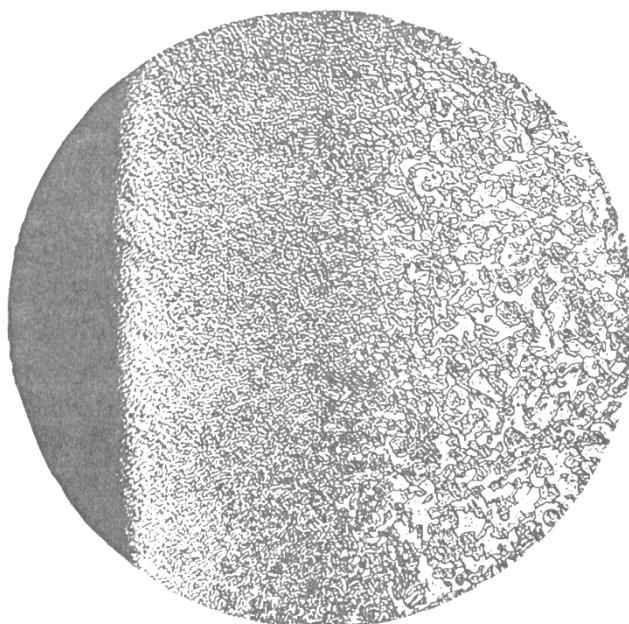
Mikrostruktura jezgre niskougljičnog čelika s cca 0,15 %C.

Faze i struktura:

Primarni ferit izlučen je u temperaturnom intervalu između 900 °C i 780 °C te je ostao, a austenit je prešao u martenzit. Sitnozrnasta struktura.

Slika pripada uzorku br. 4

u stadiju: Nakon pougljičavanja i polaganog hlađenja uzorak je ponovno kratkotrajno austenitiziran na $t_A = 900$ °C. Zatim je ohlađen na zraku do cca 780 °C (pravilna t_A za površinu s cca 0,8 %C), a onda kaljen u vodi.



Slika 14. (povećanje 250 x)

Mikrostruktura površine eutektoidnog čelika s cca 0,8 %C.

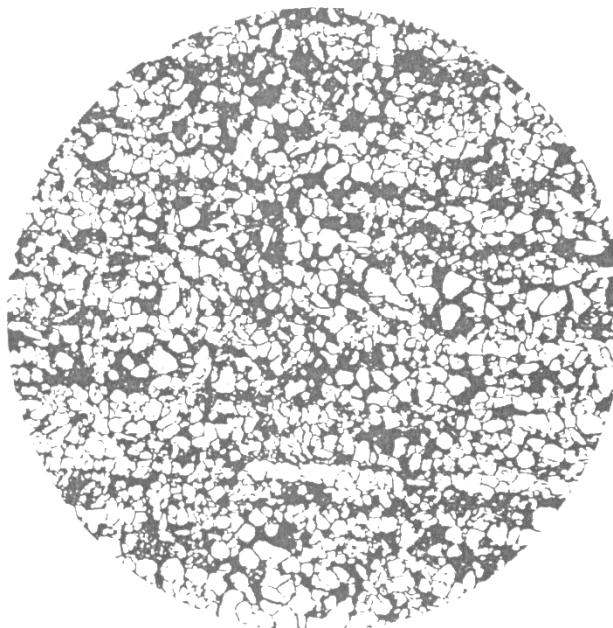
Faze i struktura:

Fini (sitnozrnasti) martenzit, uzorak kaljen s pravilne temp. austenitizacije površine $t_A = 780$ °C.

Slika pripada uzorku br. 4

u stadiju: Isti je kao i na sl. 7.

b) RAZMATRANJE Č.1430 po HRN (1C35 po EN) s približno 0,37 %C nakon nagrizanja s 2% dušičnom kiselinom (NITAL-om)



Slika 15. (povećanje 250 x)

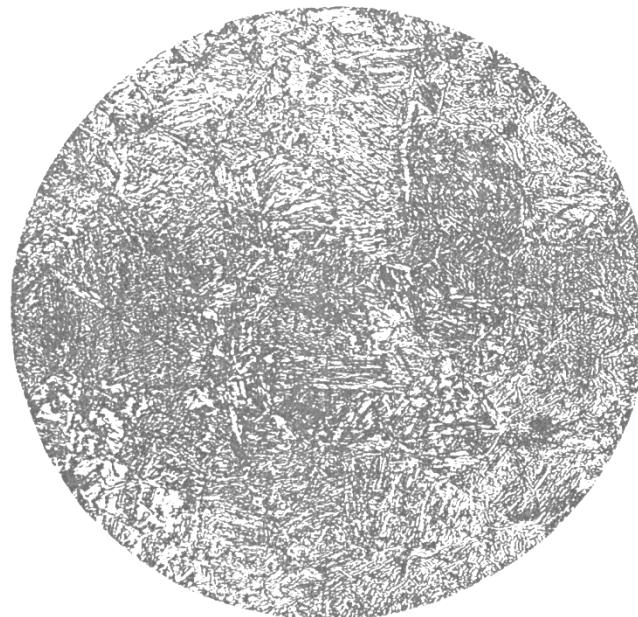
Mikrostruktura uzdužnog presjeka dobavljenog materijala prije ikakvog toplinskog tretmana.

Faze i struktura:

Feritni i perlitni kristali nakon vrućeg valjanja blago uzdužno orijentirani (u smjeru valjanja).

Slika pripada uzorku br. 1

u stadiju: Normalizirano ili meko žareno nakon vrućeg valjanja.



Slika 16. (povećanje 250 x)

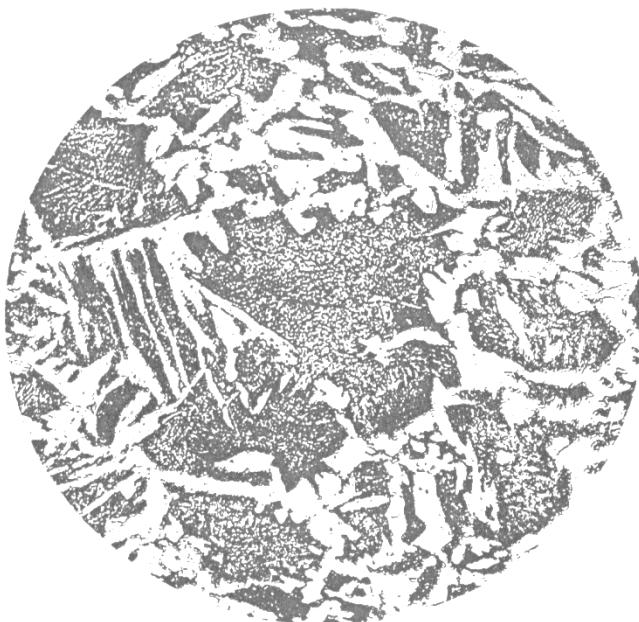
Mikrostruktura uzorka nakon kaljenja u vodi s temp. $t_A = 860^{\circ}\text{C}$.

Faze i struktura:

Izrazito martenzitna faza s tragovima preostalog nerastvorenog ferita kao i nešto bajnita.

Slika pripada uzorku br. 2

u stadiju: Nakon kaljenja u vodi.



Slika 17. (povećanje 250 x)

Mikrostruktura uzorka nakon visokotemperaturnog žarenja pri temp. $t_A = 1250 \text{ } ^\circ\text{C}$ (namjerno pregrijan), i polaganog hlađenja na zraku.

Faze i struktura:

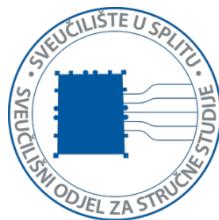
Izrazito krupni feritni i perlitni kristali (Widmannstättenova struktura).

Slika pripada uzorku br. 3

u stadiju:

Nakon visokotemperaturnog žarenja.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 13.

NORMALIZACIJA

NORMALIZACIJA

S obzirom na željeni cilj, toplinske obrade (T.O.) se mogu podijeliti u tri osnovne skupine :

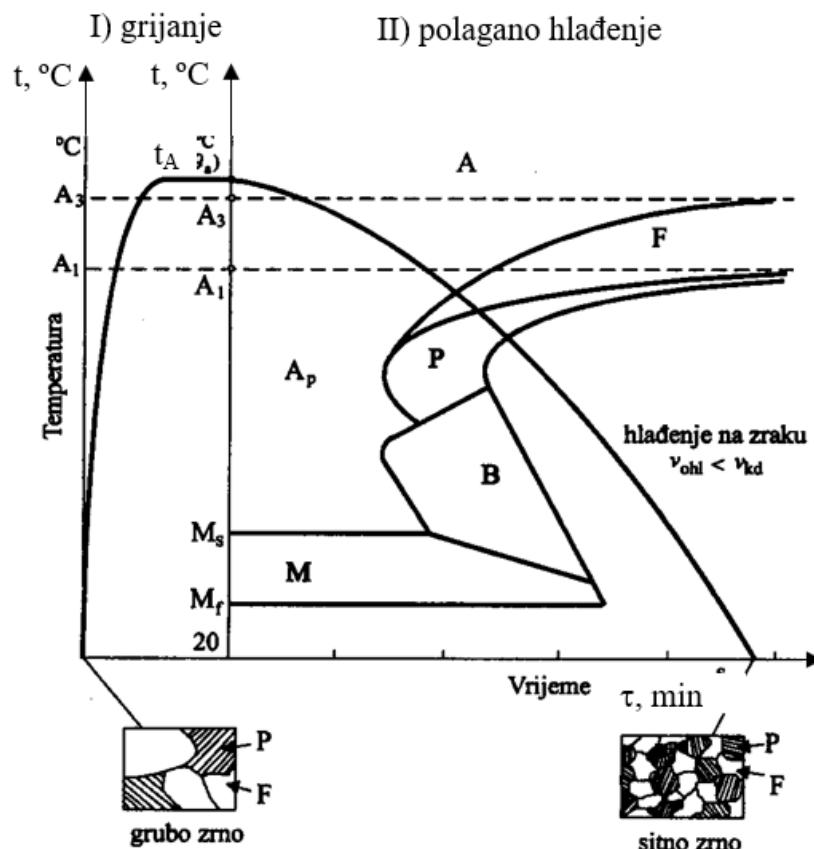
- 1) Normaliziranje i žarenje u cilju postizanja normalnog ravnotežnog stanja, koje je bilo kovanjem, kaljenjem ili nekom drugom mehaničkom obradom poremećeno.
- 2) Kaljenje s ciljem postizanja povišene tvrdoće i ostalih mehaničkih svojstava.
- 3) Popuštanje s ciljem postizanja optimalnih mehaničkih svojstava zakaljenog izratka.

Normaliziranje i žarenje predstavljaju zagrijavanje na određenu temperaturu s polaganim hlađenjem u svrhu prekristalizacije ili rekristalizacije te postizanja što bolje fazne i strukturne ravnoteže. Ovim postupcima se omogućava lakša obradivost bilo rezanjem (npr. tokarenjem, glodanjem, bušenjem ...) ili deformacijom (npr. hladnim gnjećenjem – valjanjem, provlačenjem kroz matricu ...).

Normalizacija je jedan način žarenja koji se sastoji od kratkotrajne potpune austenitizacije (da zrno austenita previše ne naraste) s naknadnim nešto bržim hlađenjem na mirnom zraku do 600 °C, a dalje polagano u ugašenoj peći kako bi se zaostala naprezanja svela na minimalnu mjeru. Ukoliko se radi o izratku komplikiranog oblika, izratku se nakon presijecanja linije završetka pretvorbe (do oko 600 °C) hlađenje mora usporiti (npr. vraćanjem izratka u ugašenu peć).

Prekristalizacijom krupnih metastabilnih kristala u sitnozrnasti austenit, nakon ohlađivanja se ponovo ostvare normalne metastabilne faze, ali sitnije i bolje strukture (tj. oblika i veličine zrna).

Ako se želi npr. usitniti zrno jednog podeutektoidnog čelika, to se postiže kratkotrajnim zagrijavanjem izratka na temperaturu t_A cca. 50 °C iznad temperature Ac_3 i naknadnim hlađenjem na mirnom zraku, prema **slici 1**.



Slika 1. Prikaz normalizacije podeutektoidnog čelika s ucrtanom krivuljom polaganog ohlađivanja u pripadajućem TTT – dijagramu

Kod nadeutektoidnih čelika se prigodom grijanja ide do temperature potpune austenitizacije cca. 20 °C iznad temperature A_{cm}. Da se izbjegne ponovni porast zrna i izlučivanje Fe₃C" u obliku ovojnica austenitnog zrna, hlađenje ovih čelika preporuča se do cca. 600 °C nešto brže na zraku, a nakon toga se izradak vrati u peć za popuštanje (zagrijanu na cca. 600 °C) s kojom se zajedno sporo hlađi do sobne temperature (minimalna zaostala naprezanja).

Veličina postignutog zrna uglavnom najviše ovisi o:

- pravilno odabranoj temperaturi normalizacije t_A;
- vremenu držanja na temperaturi t_A;
- pravilnom načinu i brzini hlađenja.

Za podeutektoidne čelike pravilni način hlađenja odgovara približno brzini hlađenja na mirnom zraku, ukoliko izradak nije velikog presjeka. Jezgra većeg presjeka se sporije hlađi i u njoj može ponovno nastati krupnije zrno. Zbog toga se predmeti većeg presjeka često višekratno zagrijavaju iznad temperature A₃ (2 do 3 puta) i hlađe. Usitnjavanjem zrna povećava se žilavost.

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Upute za vježbe iz kolegija Materijali 2



Zadatak:

U laboratorijskoj vježbi ispitati i ocijeniti utjecaj različitih toplinskih stanja u odnosu na normalizirano stanje i to na sljedeći način:

- Šest jednakih uzoraka žice promjera $\phi 4\text{mm}$ duljine $100\div 120 \text{ [mm]}$ od raspoloživog čelika za opruge (npr. EN-71Si7 tj. HRN Č2135) previjati do loma u napravi za ispitivanje žica izmjeničnim pregibanjem. Radi međusobne usporedbe, za svaki uzorak zabilježiti broj pregiba do loma.
- Nakon previjanja izmjeriti tvrdoće po Vickersu.

Ispitivanje epruveta provesti prema uputi u tablici:

Uzorak br.:	Toplinsko stanje:	Tvrdoća HV	Broj pregiba
1	Ishodno stanje žice/uzorka - hladno gnječena i poboljšana (patentirana žica – optimalno žilava i čvrsta)		
2	Ishodnu žicu/uzorak normalizirati, tj. zagrijati u peći na pravilnu $t_A=850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i ohladiti na mirujućem zraku (očekuje se pravilna normalizirana struktura)		
3	Ishodnu žicu/uzorak zagrijati u peći na pravilnu $t_A=850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i zakaliti u vodi (očekuje se izrazita krhkost)		
4	Ishodnu žicu/uzorak zakaliti u vodi, a zatim ponovo vratiti u peć na pravilnu $t_A=850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i ohladiti na zraku – normalizirati (poništen efekt kaljenja)		
5	Ishodnu žicu/uzorak visoko žariti, $t_A=1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ i ohladiti na zraku (očekuje se izrazita krupnozrnatost) (zbog sprječavanja razugljiličenja žarenje obaviti u posudi sa grafitnim prahom ili ugljenom)		
6	Ishodnu žicu/uzorak visoko žaren, $t_A=1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zbog sprječavanja razugljiličenja žarenje obaviti u posudi sa grafitnim prahom ili ugljenom) i ohlađen na zraku, a zatim normaliziran grijanjem u peći na pravilnu $t_A=850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i hlađenjem na zraku (očekuje se ponovo sitnozrnatost)		

Zadatak:

- Opisati tijek izvođenja vježbe.*
- Nacrtati dijagrame toplinske obrade za sve uzorce iz tablice.*
- Za svaki uzorak primjenom TTT dijagrama procijeniti fazni sastav te u izvještaju priložiti odgovarajuću metalografsku sliku.*
- Iznijeti zaključke i vlastita zapožanja.*

Izvadak iz atlasa čelika za čelik HRN-EN71Si7 (Č. 2135)

Stahl 71 Si 7

(Bezeichnung nach DIN 17006)

Alte Bezeichnung nach DIN: —

Stoffnummer nach DIN 17007: 5029

Stahl für kaltgewalzte Federbänder nach Vornorm DIN 17222

Chemische Zusammensetzung in %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
mindestens	0,68	1,5	0,80						
höchstens	0,75	1,8	0,80	0,035	0,035				

II-132 A/C

Temperaturen für die Wärmebehandlung

Normalglühen	Weichglühen	Martensit	Is	Anlassen
—	630 bis 670 °C	810 bis 840 °C	O1	280 bis 340 °C

Angaben über die den Umwandlungsschaubildern zugrunde liegende Schmelze

Chemische Zusammensetzung (in Prozent)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0,73	1,62	0,73	0,010	0,012	0,10	0,19	0,12	0,01

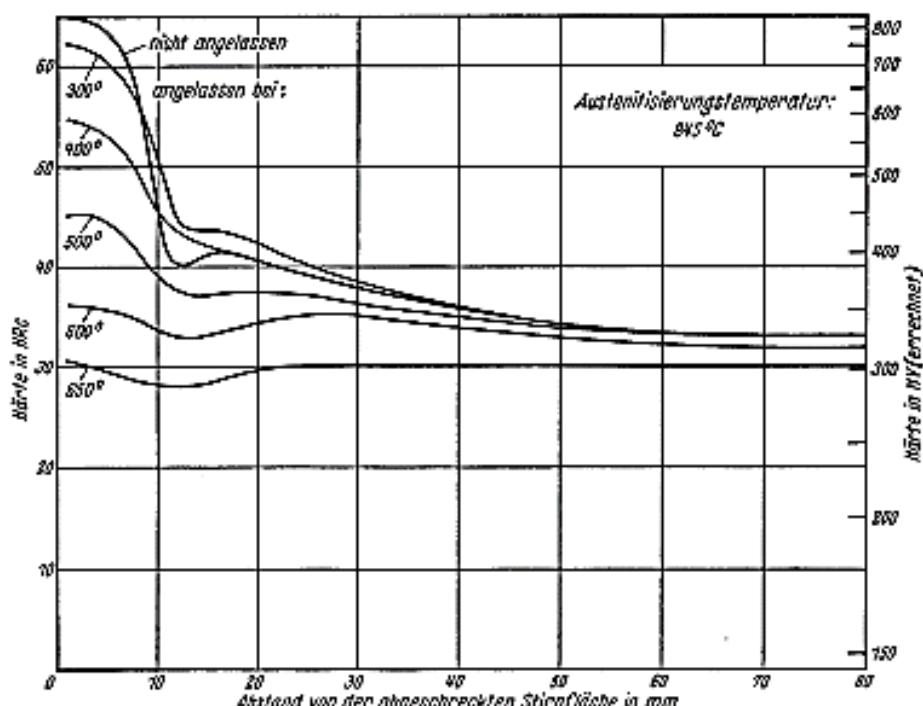
Beheizungsart	Vorwärmung	Verteitung	Austenit-Kugengröße nach 10 min 845 °C
basis. Elektro-Ofen	gewalzt auf 30 mm ø	keine nach dem Walzen	7 u. 8, vereinz. 3—9

A₃-Temperatur 775 °C } gemessen beim Erwärmen mit 3 °C/minA₁-Temperatur 750 °C }M_v-Temperatur nach einer Austenitisierung 10 min 845 °C: 215 °C

Kritische Abkühlungsgeschwindigkeiten von
Austenitisierungs temperatur 845 bis 500 °C,
entnommen aus dem ZTU-Schaubild (kontinuierlich)

$K_m = 0,6s$ (gerade noch vollständige Martensitbildung, entspricht oberer kritischer Abkühlungsgeschwindigkeit) $K_{m0} = 28s$ (50% Martensit) $K_r = 10s$ (Beginn der Umwandlung in der Perlitetaufe) $K_p = 36s$ (gerade vollständige Umwandlung in der Perlitetaufe, entspricht im allgemeinen unterer kritischer Abkühlungsgeschwindigkeit)

Härtkurven der Stirnabschreckprobe*)



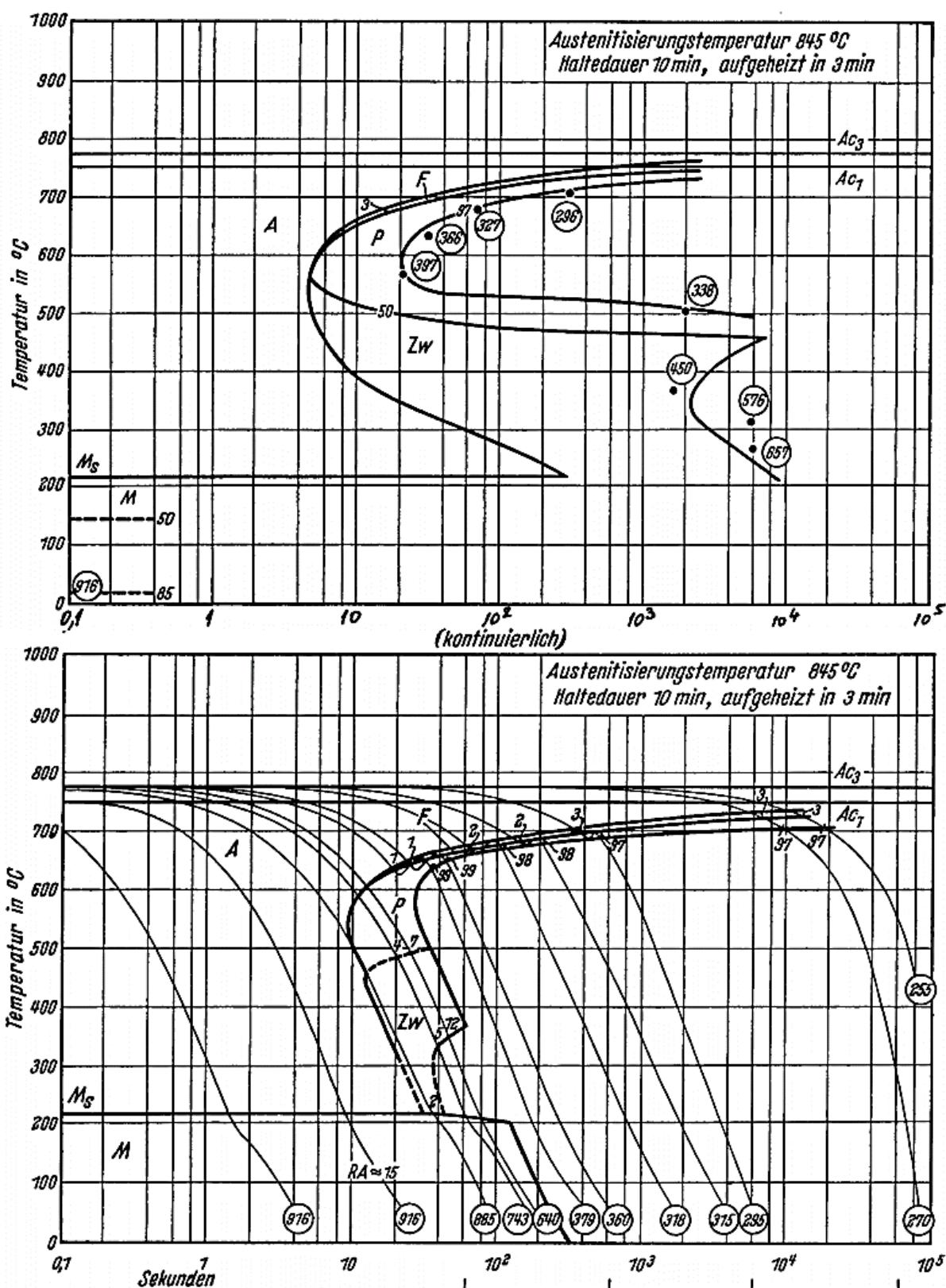
*) Stirnabschreckversuch nach Stahl-Eisen-Prüfblatt 1860-60. Haltezeit auf Anlaßtemperatur 2 Stunden.

Bearbeiter: A. Rose u. L. Rodersacher

ATLAS ZUR WÄRMEBEHANDLUNG DER STÄHLE

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Upute za vježbe iz kolegija Materijali 2



Prilog C2 – Metalografske slike čelika EN 71Si7 (Č.2135)

Za izotermičko (diskontinuirano) hlađenje sa $t_A=845\text{ }^\circ\text{C}$



Umwandlungstemperatur $630\text{ }^\circ\text{C}$
3% Ferrit, 97% Perlit
Härte 366 HV



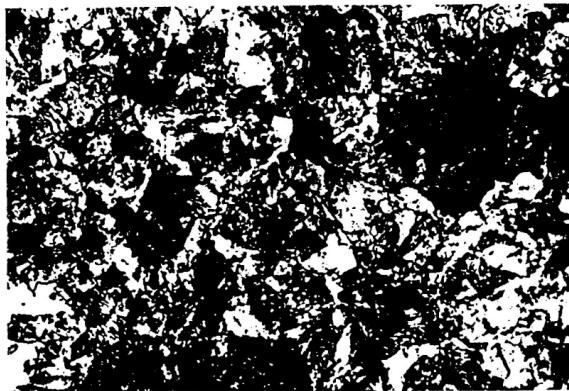
Umwandlungstemperatur $310\text{ }^\circ\text{C}$
Zwischenstufengefüge
Härte 576 HV

Za anizotermičko (kontinuirano) hlađenje sa $t_A=845\text{ }^\circ\text{C}$

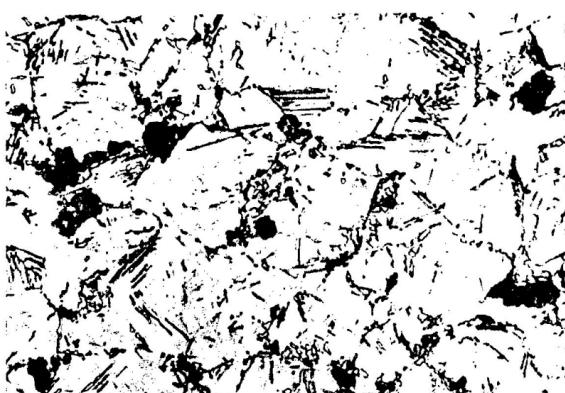
kontinuierlich



3% Ferrit, 97% Perlit
Härte 255 HV



1% Ferrit, 99% Perlit
Härte 379 HV

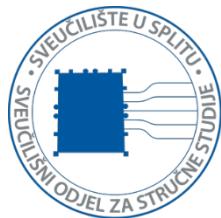


7% Perlit, 12% Zwischenstufengefüge,
81% Martensit
Härte 640 HV



Martensit und Restaustenit
Härte 916 HV

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Studij konstrukcijskog strojarstva



MATERIJALI II

VJEŽBA br. 14.

NERAZORNA ISPITIVANJA METALA



NERAZORNA ISPITIVANJA METALA

Ovim ispitivanjima se obično vrši permanentna kontrola kvalitete materijala gotovih strojnih elemenata kao i čitavih konstrukcija prije, za vrijeme i nakon izrade konstrukcije kao i tijekom eksploatacije.

Neka su prethodna ispitivanja također po svojoj prirodi nerazorna (npr. spektralna analiza kemijskog sastava, mjerjenje tvrdoće po Shoreu i ultrazvukom). Međutim pod nerazornim ispitivanjima podrazumijevaju se metode određivanja homogenosti materijala u smislu otkrivanja diskontinuiteta (npr. pukotine, uključci troske, plinski mjeđuri itd.). Jednostavna podjela nerazornih ispitivanja je na površinske i dubinske metode.

A) VIZUALNI PREGLED

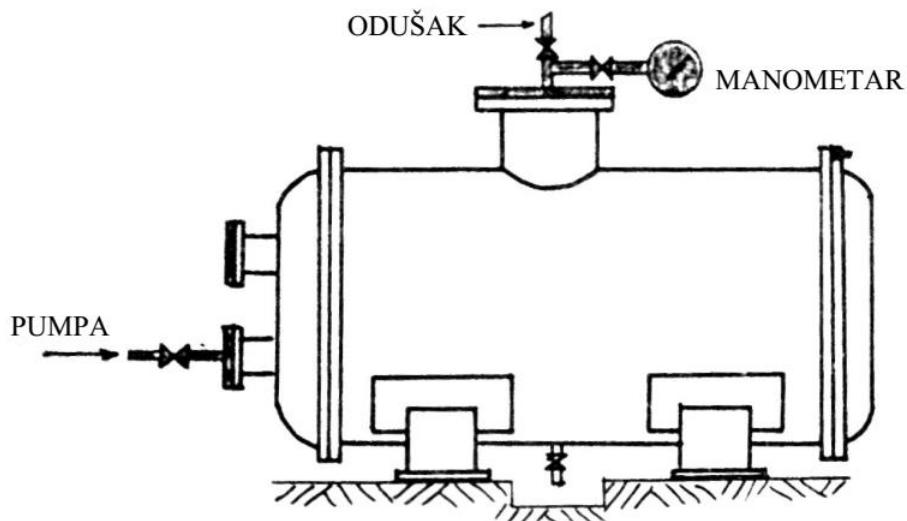
Ljudsko oko je daleko savršenije od mnogih instrumenata što nije za podcjenjivanje. Najjednostavnija i uvijek dobro došla površinska metoda je VIZUALNI PREGLED, jer je ljudsko oko jako sposobno uočiti diskontinuitete na površinama, koji se javljaju kao: tamnija mjesta, mjesta promjene boje, udubljenja i sl. Prethodnim vizualnim pregledom mogu se brzo i dosta pouzdano pregledati velike površine i uočiti u mnogim slučajevima kritične pukotine. Pomoć kod vizualnog ispitivanja mogu pružiti i priručna povećala (do povećanja 10x) ili prenosivi mali mikroskopi (do povećanja 50x), ali nakon što je prostim okom uočeno mjesto s vjerojatnom greškom. Nepristupačna mjesta mogu se vizualno pregledati pomoću zrcala, periskopa ili fiberskopa s direktnim ili permanentnim televizijskim promatranjem (npr. unutrašnjost plašta rotacijske peći cementa).

B) AKUSTIČKO ISPITIVANJE

Jednostavan način ispitivanja homogenosti je kuckanjem po površini i osluškivanjem odjeka. Napukli komadi i šupljine ispod površina daju karakteristični odjek, pa se na ovaj način mogu naslutiti i dubinske greške, koje se ne mogu vidjeti okom. Ovo jest primitivni akustički način određivanja grešaka u materijalu ali još se koristi npr. za provjeru homogenosti vagonskih kotača laganim udaranjem čekićem. Međutim, najčešće ove metode ispitivanja koriste instrumente ili razne tvari za pojačanje nalaza, tj. da se površinske i dubinske greške učine vidljivima.

C) TLAČNA PROBA

Nepropusnost posuda ili cjevovoda provjerava se punjenjem vodom i podizanjem tlaka iznad razine u eksploataciji, prema **slici 1**. Ukoliko tlak pada, znači da posuda ili cjevovod curi. Obično se na suhoj posudi ili cijevi s vanjske strane opazi mjesto koje vlaži, pa se povećalom može utvrditi postojanje prolaza. Može se umjesto vode tlačiti s malim pretlakom zraka i s druge strane premazati spojeve sapunicom. Mjeđuri od sapunice ukazuju na prolaz zraka. Primjena zraka s višim tlakom se ne preporuča zbog opasnosti od eksplozije posude!



Slika 1. Ispitivanje nepropusnosti tlačenjem vode

D) ISPITIVANJE PENETRIRAJUĆIM OBOJENIM TEKUĆINAMA

a) Cilj vježbe je:

Upoznavanje s mogućnostima i ograničenjima ove metode.

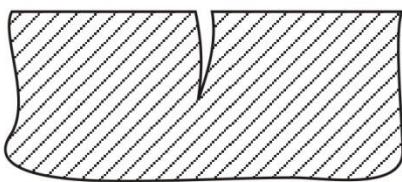
b) Oprema i materijal:

Komplet za ispitivanje penetrirajućim bojama i karakteristični uzorci iz eksploracije. U nedostatku originalnih penetrantnih moguće je koristiti petrolej obojen hipermanganom, a kao razvijač talk (puder) razmućen u alkoholu.

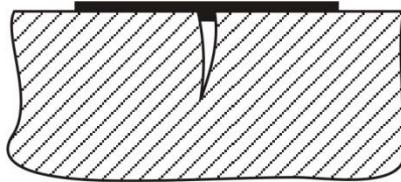
Ovim ispitivanjem otkrivaju se otvorene površinske greške kao što su npr.: pukotine uslijed kaljenja, zavarivanja ili lijevanja, porozitet, zamorne pukotine... Ispitivanje se zasniva na kapilarnom efektu tekućina vrlo male površinske napetosti, koje su u stanju prodrijeti (penetrirati) i u vrlo uske pukotine. Naknadnim nanošenjem razvijača, tj. sredstva s dobrim učinkom upijanja na ispitivanu površinu, izvlači se iz pukotina penetrirajuća boja koja locira i ocrtava pukotinu. Radi što lakšeg uočavanja greške, penetranti su obično crvene, a razvijači bijele boje. Često se penetrirajućim bojama u cilju olakšavanja detekcije greške dodaje fluorescentni pigment. Ispitivanje se tada obavlja pod ultraljubičastom rasvjetom.

c) Izvođenje vježbe:

Ispitivana površina se najprije odmasti i očisti posebnim sredstvom. Na očišćenu površinu nanese se penetrant i ostavi da djeluje određeno vrijeme ($2 \div 30$ minuta). Potom se s površine odstrani višak penetrirajuće boje i nanese razvijač koji iz površinskih grešaka izvlači penetrant i ocrtava oblik greške. Prema veličini indikacije dade se naslutiti o volumenu ili dubini pukotine. Princip ispitivanja prikazan je na **slici 2**.



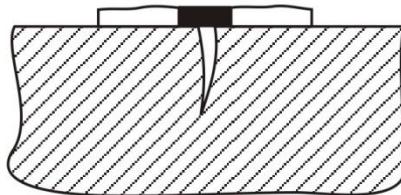
I) ODMAŠĆENA I
OČIŠĆENA POVRŠINA



II) NANEŠENI PENETRANT I
PRODIRANJE U PUKOTINU



III) ODSTRANJEN VIŠAK
PENETRANTA S POVRŠINE



IV) RAZVIJANJE -UPIJANJE
PENETRANTA IZ PUKOTINE

Slika 2. Faze ispitivanja penetrirajućim bojama

Nakon što alkohol iz razvijača na površini ishlapi, talk upija penetrant iz pukotine i ocrtava grešku.

E) ISPITIVANJE MAGNETSKIM ČESTICAMA

a) Cilj vježbe je:

Upoznavanje s prednostima i nedostacima ove metode ispitivanja i s njenom praktičnom primjenom

b) Oprema i materijal:

Različiti uređaji za magnetsko ispitivanje, feromagnetski / fluorescentni praškovi, suspenzije za ispitivanje, ultraljubičasta lampa, uzorci s greškama.

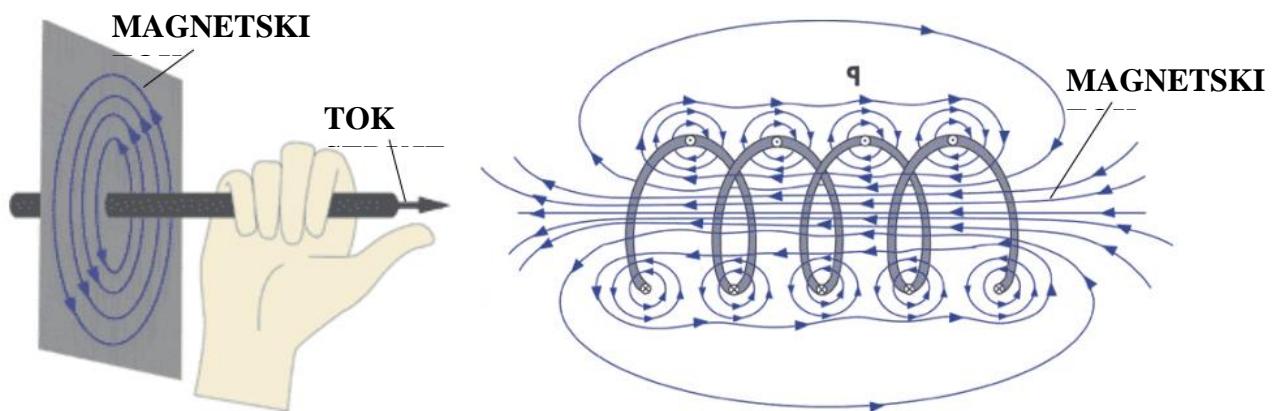
Magnetsko ispitivanje spada u skupinu površinskih metoda ispitivanja bez razaranja. Primjenjuje se samo kod ispitivanja magnetičnih materijala (velika većina čelika, ljevova, slitine na bazi nikla i kobalta) u cilju otkrivanja pod površinske pukotine vrlo blizu površine ili na samoj površini.

Princip ispitivanja temelji se na rasipanju magnetskog toka na mjestu postojanja nehomogenosti ili greške u materijalu. Tijekom ispitivanja uzorak se magnetizira jednom od metoda magnetizacije:

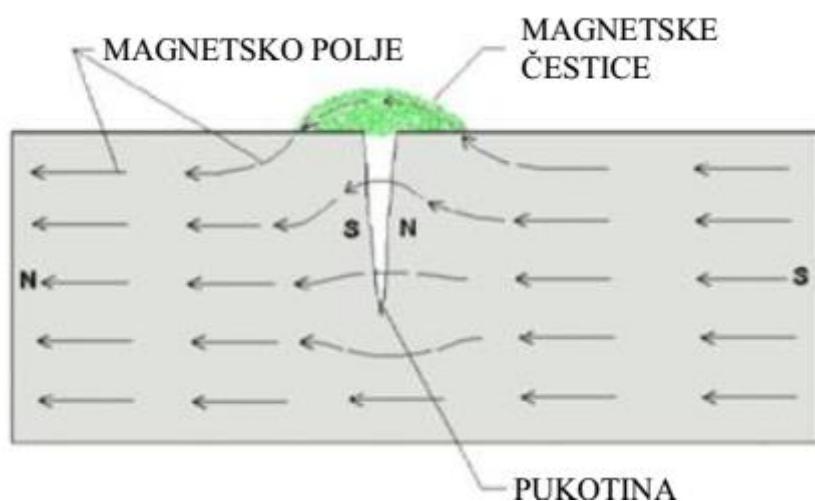
- trajnim (permanentnim) magnetom;
- protokom struje (istosmjernom ili izmjeničnom strujom);
- elektromagnetom;
- ulaganjem u zavojnicu.

Prolaskom istosmjerne ili izmjenične struje kroz vodič, odnosno zavojnicu, stvara se magnetsko polje po pravilu desne ruke, prema slici 3.

Ako u ispitivanom predmetu nema grešaka ili nehomogenosti magnetski tok je jednoliko raspoređen unutar predmeta, dok u protivnom dolazi do koncentracije silnica magnetskog toka iznad greške, slika 4. Za vrijeme ili nakon magnetizacije (ovisno o metodi magnetizacije) ispitivani predmet se posipa suhim feritnim prahom ili prahom u suspenziji petroleja. Ove sitne čestice se u slučaju postojanja greške grupiraju na mjestu rasipanja toka i tvore indikaciju. Na temelju oblika i količine nakupljenog praha moguće je ocijeniti veličinu i ocrt greške. Ovom metodom najbolje se otkrívaju površinske greške okomite na smjer magnetskog polja. U cilju otkrivanja različito orijentiranih grešaka (uzdužne i poprečne) ispitivani predmet se magnetizira u dva međusobno okomita smjera.



Slika 3. Stvaranje magnetskog polja oko vodiča i oko zavojnice



Slika 4. Rasipanja magnetskog polja na mjestu greške i nastajanje nakupine - indikacije

Prah koji se koristi za ispitivanje obično je sive ili crvene boje, a može biti obojen i fluorescentnom bojom. Ispitivanje se tada obavlja pod ultraljubičastim svjetлом.

Ako se predmet magnetizira istosmјernom strujom, silnice se jednoliko rasporede po presjeku pa se mogu odrediti i pukotine nešto dublje ispod površine.

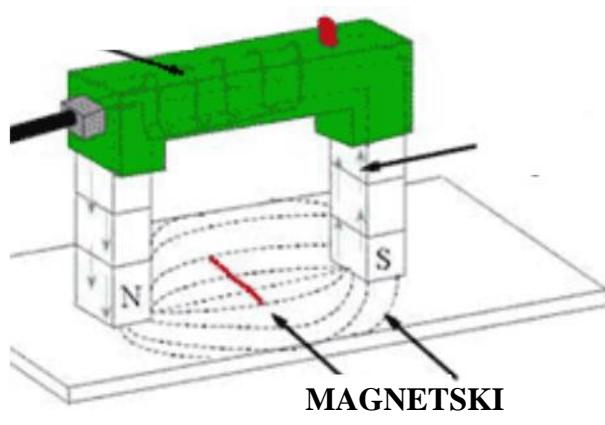
Korištenjem izmjenične struje postiže se veća koncentracija magnetskog polja uz površinu, pa je ova vrsta struje pogodnija za ispitivanje čisto površinskih pukotina.

Postoje prijenosni i stacionarni uređaji za ispitivanje magnetskim česticama.

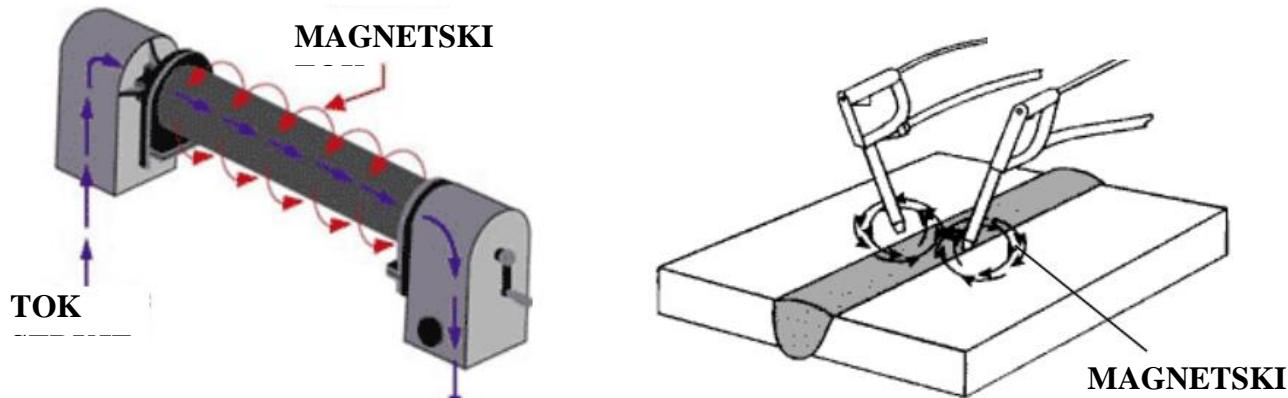
Vrlo važni čimbenici za uspješnost ispitivanja su: magnetska permeabilnost, dimenzije i stanje površine ispitivanog materijala. Ovim načinom ispitivanja moguće je otkriti vrlo sitne površinske pukotine (red veličine nekoliko stotinki mm), ali i podpovršinske greške do nekoliko mm ispod površine.

Prema načinu nanašanja feromagnetskih čestica na površinu ispitivanog materijala razlikuje se: suha (čestice u vidu praha) i mokra metoda (čestice u mješavini s petrolejom ili vodom).

Nakon svakog ispitivanja predmet ostane magnetičan, pa je neke strojne elemente (npr. radilice motora) nužno demagnetizirati na posebnom uređaju.



Slika 5. Indukcija magnetskog toka elektromagnetskom potkovom



Slika 6. Indukcija magnetskog toka električnom strujom

c) Izvođenje vježbe:

Na odabranim uzorcima pomoću različitih načina magnetizacije, te suhom i mokrom metodom ustanoviti eventualno postojanje uzdužnih i poprečnih grešaka. Po mogućnosti izvršiti i ispitivanje fluorescentnim magnetskim prahom.

F) ISPITIVANJE ULTRAZVUKOM (UZV-om)

a) Cilj vježbe je:

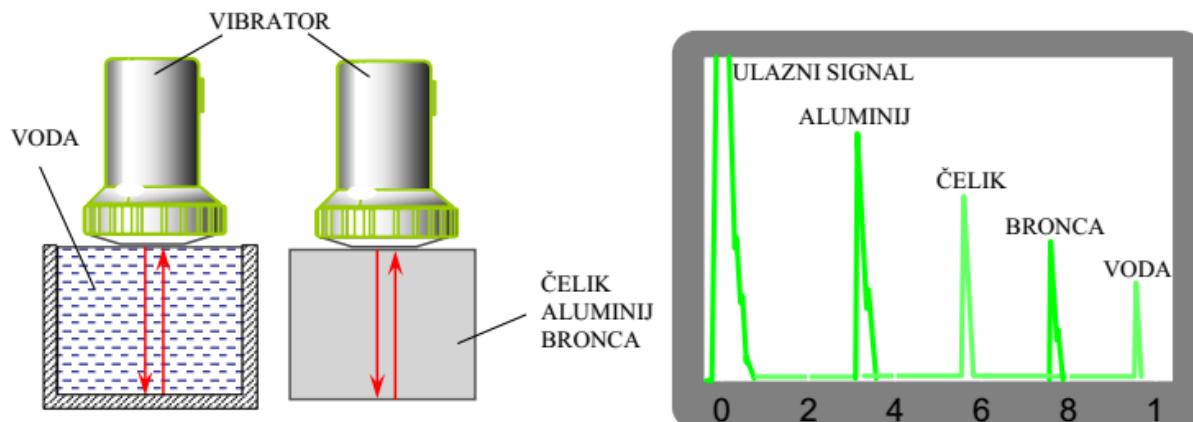
Upoznavanje s prednostima i nedostacima ove metode ispitivanja bez razaranja, te s njenom praktičnom primjenom.

b) Oprema i materijal:

Ultrazvučni aparat s pripadajućim priborom i ispitni uzorci.

Mehanički titraji određenog sredstva s frekvencijom iznad 16000 Hz (ljudsko uho ih ne može registrirati) nazivaju se ultrazvukom. Piezoelektrički efekt kristala kvarca (također i litijevog sulfata, barijevog titanata...) temelj je za ovo ispitivanje. Kvarc pokazuje svojstvo da se spojen na izvor visokofrekventne struje steže ili rasteže u ritmu promjene polariteta izvora (u ritmu narinute frekvencije). Kristal može postići i obrnuti efekt jer je sposoban mehaničke vibracije (njegovo stezanje ili rastezanje) transformirati u električne impulse (proizvesti izmjenični električni napon). Zbog svega ispred rečenog, u ovom ispitivanju kvarc se koristi kao generator i kao prijemnik UZV valova. Frekvencije koje se primjenjuju kod ispitivanja materijala kreću se od 0,5 do 20 MHz.

Ovisno o vrsti i temperaturi medija u kojem se UZV rasprostire varira i njegova brzina prostiranja: od 330 m/s u zraku, preko 1500 m/s u vodi, do oko 6000 m/s u čeliku ili oko 6300 m/s u aluminiju, prema slici 7.



Slika 7. Brzina ultrazvuka u različitim metalima

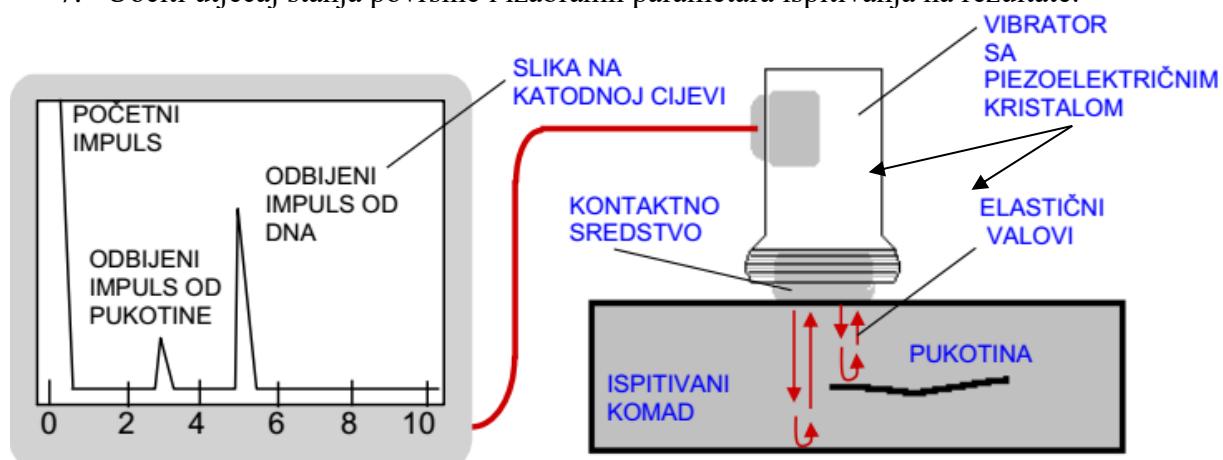
UZV metoda primjenjuje se pretežno za mjerjenje debljina i pronalaženje grešaka u materijalu (naročito u zavarenim spojevima). Ovom metodom ispitivanja moguće je otkriti uglavnom dubinske podpovršinske greške u materijalu. Razlikuju se metode ispitivanja kod kojih je UZV vibrator ujedno prijemnik i predajnik (impulsna echo metoda) ili ona metoda kod koje su prijemnik i predajnik odvojeni elementi (prozvučavanje). Postoji i rezonantna metoda koja se često primjenjuje kod mjerača debljine. Moguće je i ispitivanje tehnikom uronjavanja.

Iako se ultrazvukom najčešće ispituju metali, moguća su i ispitivanja plastike, porculana, keramika...

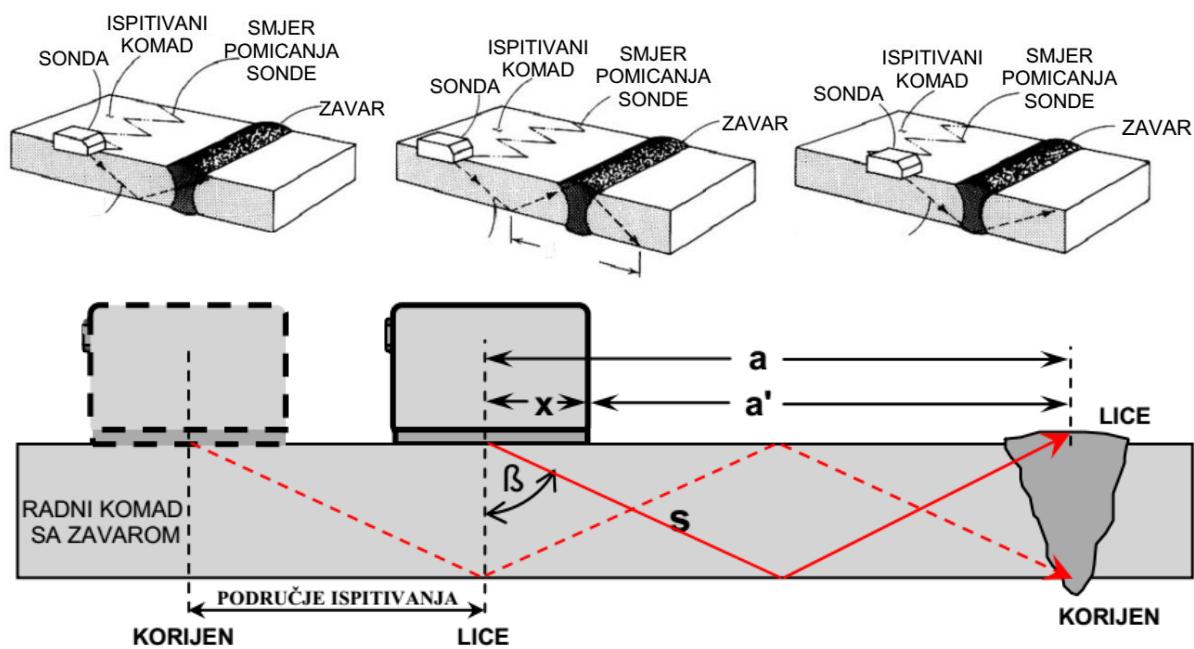
c) Izvođenje vježbe:

Pomoću UZV aparata, etalona i ispitnih uzoraka te na temelju ranije navedenog obaviti:

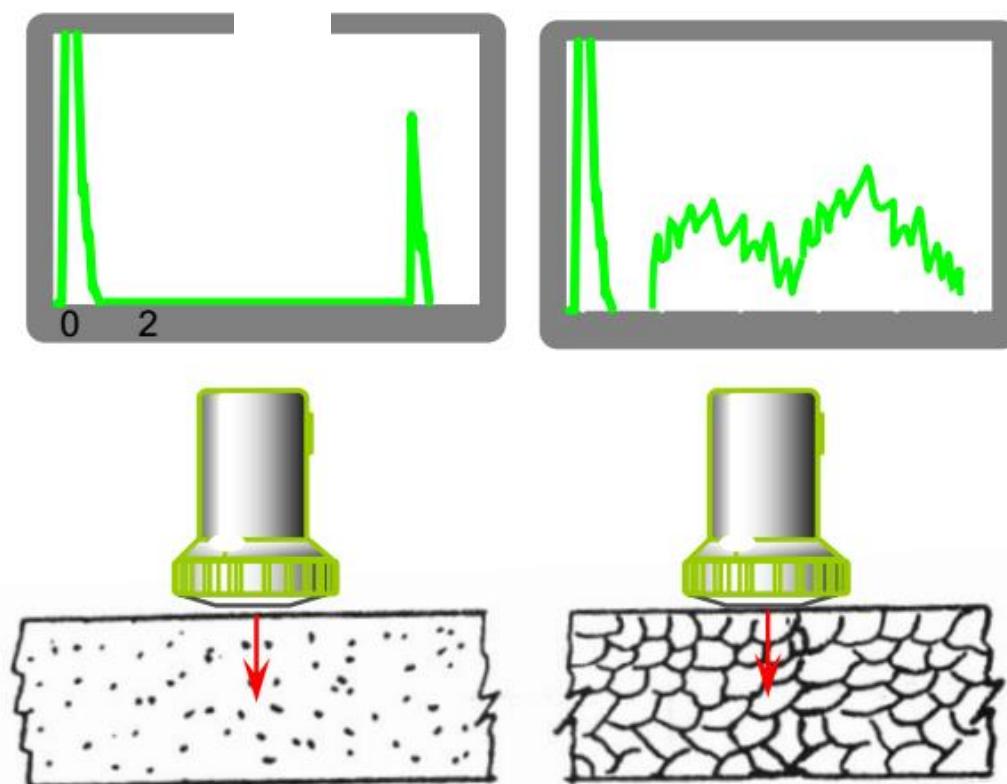
1. Ostvarivanje ultrazvučnog kontakta (utvrditi važnost kontaktnog sredstva);
2. Baždarenje aparata:
 - postavljanje vremenske baze,
 - postavljanje pojačanja (objasniti efekt prigušenja UZV-a);
3. Demonstrirati brzine ultrazvuka u različitim metalima;
4. Ispitivanje ravnim vibratorom:
 - mjerjenje debljine, prema slici 8. ,
 - pronalaženje grešaka u metalu;
5. Ispitivanje zavara kosim vibratorom, prema slici 9. ;
6. Prikaz utjecaja strukture materijala na rezultate ispitivanja, prema slici 10. ;
7. Uočiti utjecaj stanja površine i izabralih parametara ispitivanja na rezultate.



Slika 8. Princip mjerena debljina stjenke – ispitivanja ultrazvukom odbijanjem (echo metoda)



Slika 9. Ispitivanje sučeonog zavarenog spoja UZV-om



Slika 10. Utjecaj strukture materijala na rezultate ispitivanja



G) RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE

a) Cilj vježbe je:

Upoznavanje s prednostima i nedostacima ove metode ispitivanja s njenom praktičnom primjenom.

b) Oprema i materijal:

Rendgenski aparat, filmovi, penetrmetri, iluminator, uzorci, zbirke referentnih radiograma.

Rendgensko i gama zračenje predstavlja vid energije koji se rasprostire putem elektromagnetskih valova. Međusobno se razlikuju po valnoj dužini koja kod gama zraka iznosi 10^{-12} m, a kod rendgenskih 10^{-10} m. Izvor rendgenskih zraka je rendgenska cijev, a izvor gama zraka izotopi radioaktivnih elemenata (npr. Co 60, Ir 192).

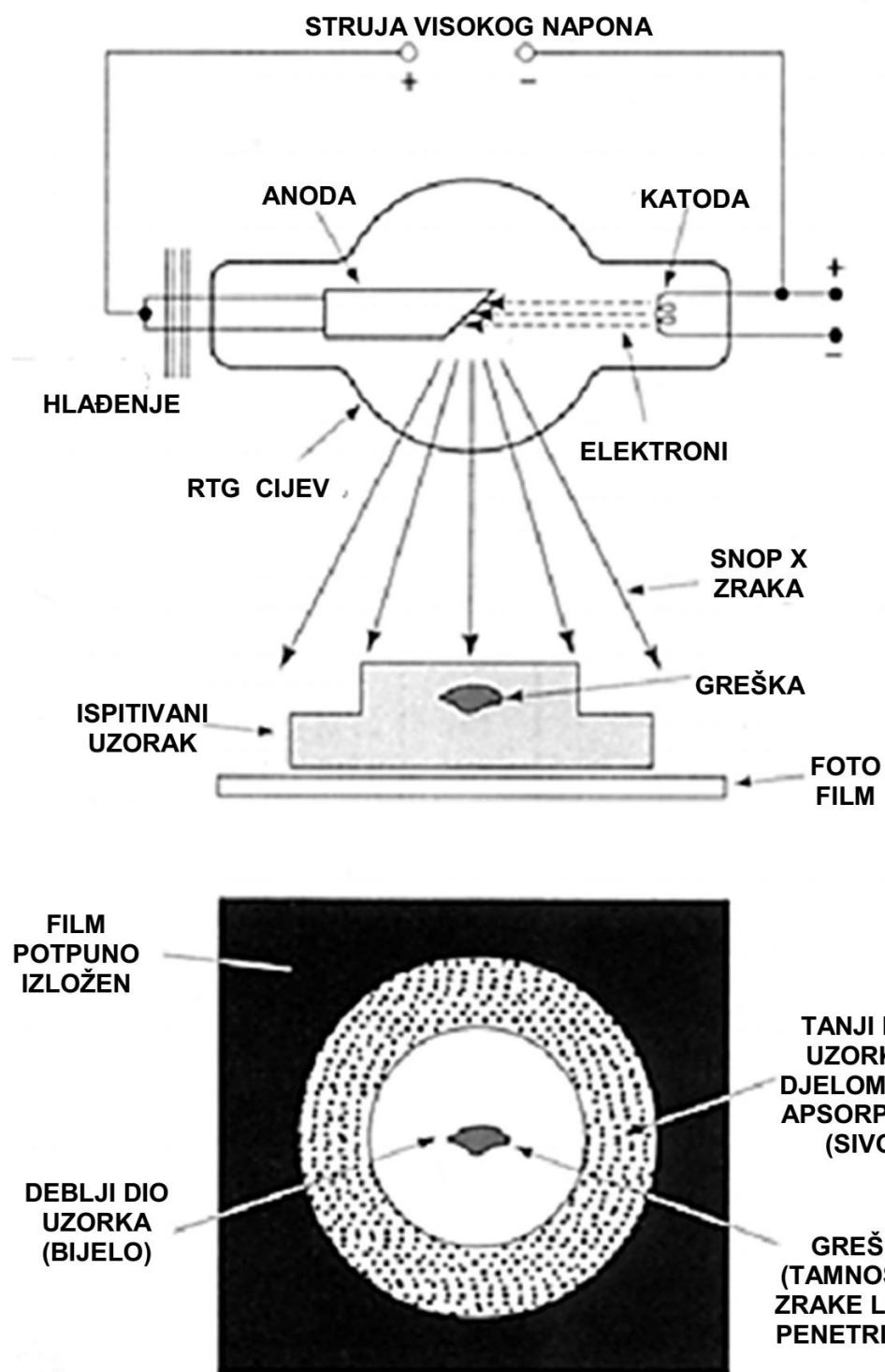
Slika 11. prikazuje rendgensku cijev i principijelni nastanak zračenja. U cijevi vlada visoki vakuum. Na katodi zbog zagrijavanja žarne niti dolazi do termoemisije elektrona. Zbog visokog napona koji vlada između anode i katode elektroni se ubrzavaju i dostižu vrlo veliku brzinu (skoro brzinu svjetlosti). Udaranjem u anodu pretvara se kinetička energija elektrona u elektromagnetsko zračenje karakteristično za rendgenske (x) zrake.

Gama (γ) zračenjem je moguće ispitati veće debljine materijala jer je ono prodornije od rendgenskog. Osim ove prednosti, gama zračenje je neovisno o nekom drugom izvoru energije, pa je uređaj lako prijenosan te se može koristiti i na mjestima gdje ne postoji priključak za struju. Glavni nedostatak ovog zračenja je: stalnost zračenja (ne može se «ugasiti») i potreba posebnih mjera zaštićivanja.

Princip ispitivanja se temelji na prozračivanju ispitivanog materijala i prigušenju, tj. slabljenju energije prolaskom kroz materijal. Zbog prigušenja zračenja prolaskom kroz ispitivani uzorak, intenzitet izlaznog zračenja je manji od njegove ulazne vrijednosti. Pad intenziteta zračenja ovisi o vrsti materijala (različiti materijali imaju različiti koeficijent prigušenja) i o debljini materijala. U cilju trajnog zapisa defekata i njihove naknadne procjene, koristi se zapis na fotografском filmu iako se slika može dobiti i na TV – ekranu. Snaga prijenosnih industrijskih rendgenskih aparata kreće se od $20 \div 300$ kV, a moguće debljine prozračivanja kreću se do oko 50 mm Fe. Postoje i stacionarne izvedbe ovih aparata s većim snagama (do oko 500 kV) i mogućnostima prozračivanja. Ako se koristi izvor γ – zračenja onda je moguće prozračiti debljine i preko 100 mm Fe.

Rendgensko i gama zračenje štetno djeluju na ljudski organizam, pa je potrebna odgovaraajuća zaštita u vidu pregrađivanja (beton, olovo) radi prigušenja zračenja ili se udaljiti od izvora zračenja na sigurnu udaljenost.

Rendgenskim i gama zrakama moguće je otkriti nehomogenosti i greške u unutrašnjosti materijala (šupljine, trosku, pukotine...).



Slika 11. Postavljanje rendgenske cijevi i filma spram uzorku

c) Izvođenje vježbe:

Na vježbi se nastoji studente upoznati s glavnim dijelovima rendgenskog aparata i s izvorom γ – zračenja. Zatim na već snimljenim filmovima tražiti i klasificirati greške na temelju usporedbe s referentnim snimcima (iz **I I W** – kataloga, International Institute of Welding).



Literatura

1. Deželić, R.: Metali u strojogradnji, FESB, Split, 1985.
2. Malešević, N.: Metali I, II, III, IV, FSB, Zagreb, 1968.
3. Gabrić, I; Šitić, S.: Materijali 2, skripta, Odjel za stručne studije, Split, 2015.
4. Španiček, Đ.; Ćurković L.: MATERIJALI I, FSB, Zagreb, 2005.
5. Kolumbić Z.; Tomac N.: MATERIJALI, Filozofski fakultet, Rijeka, 2005.
6. Callister, W: Materials Science and Engineering, 8th Edition, Wiley & Sons, New York, 2011.
7. Božidar, L.; Tensi, H. M.; Canale , L. C. F.; Totten, G. E.: Quenching Theory and Technology, International Federation of Heat Treatment and Surface Engineering, 1993.
8. Stupnišek, M; Cajner, F.: Osnove toplinske obradbe metala, Zagreb, 1998.