

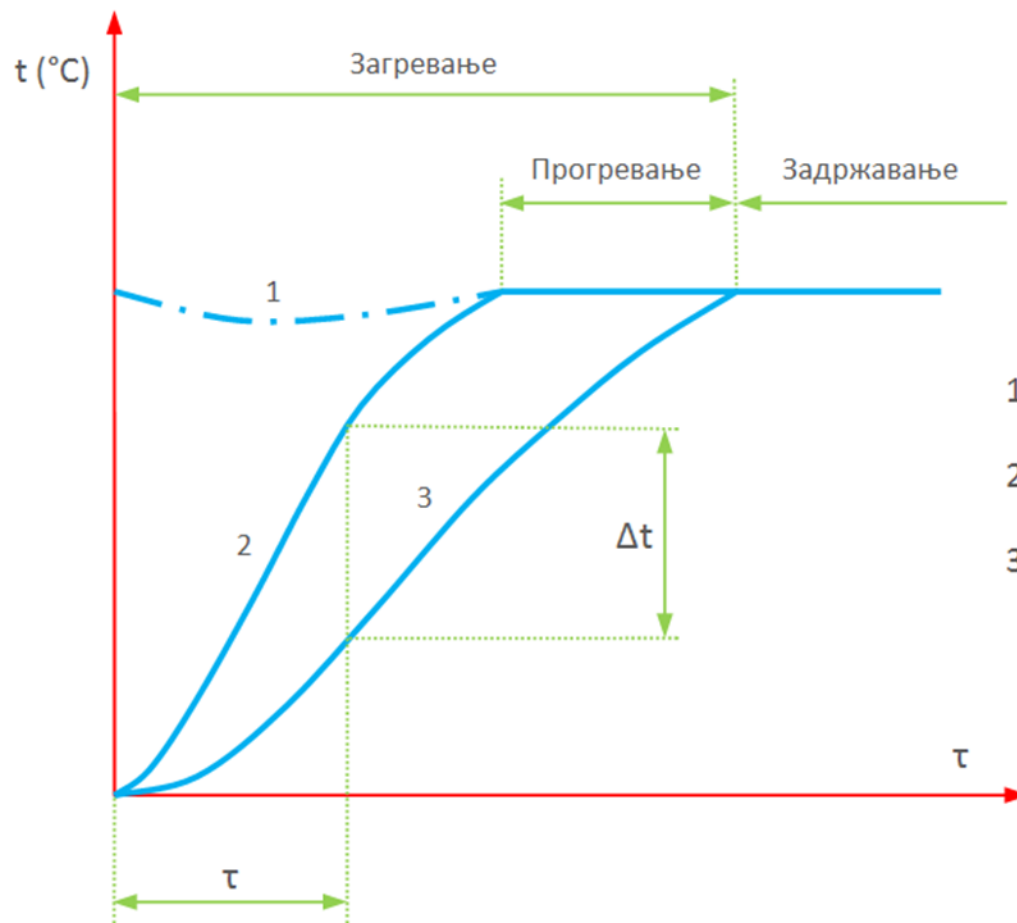
TERMIČKA OBRADA

Prof. Dr Branko Škorić

ZAGREVANJE I HLAĐENJE

- zagrevanje do temperature termičke obrade,
- zadržavanje na temperaturi termičke obrade
- Hlađenje

Dijagram promene temperature sa vremenom



1 - linija promene temperature peći

2 - linija promene temperature na površini komada

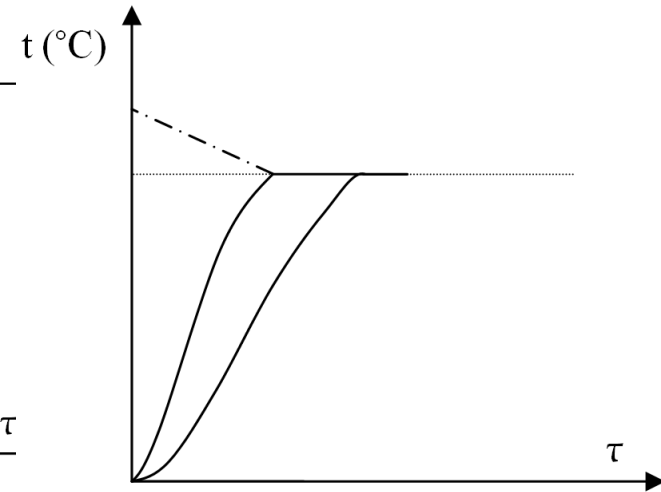
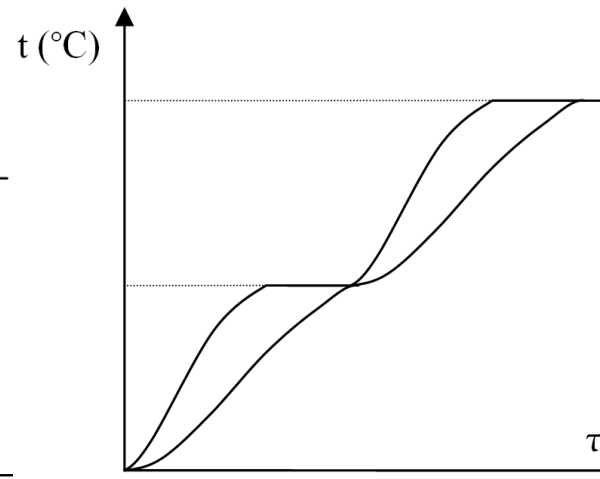
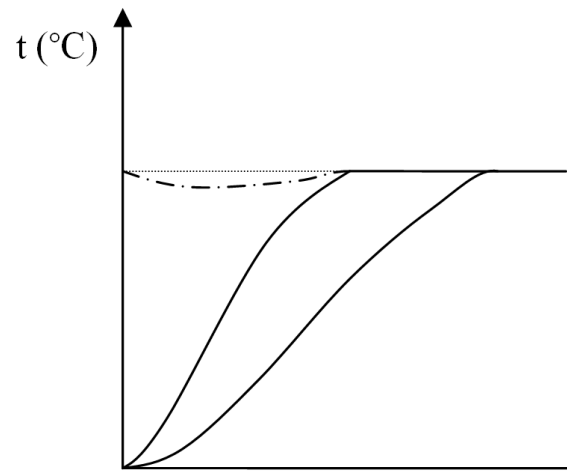
3 - linija promene temperature u jezgru komada

Mogući načini zagrevanja

normalno zagrevanje

stepenasto zagrevanje

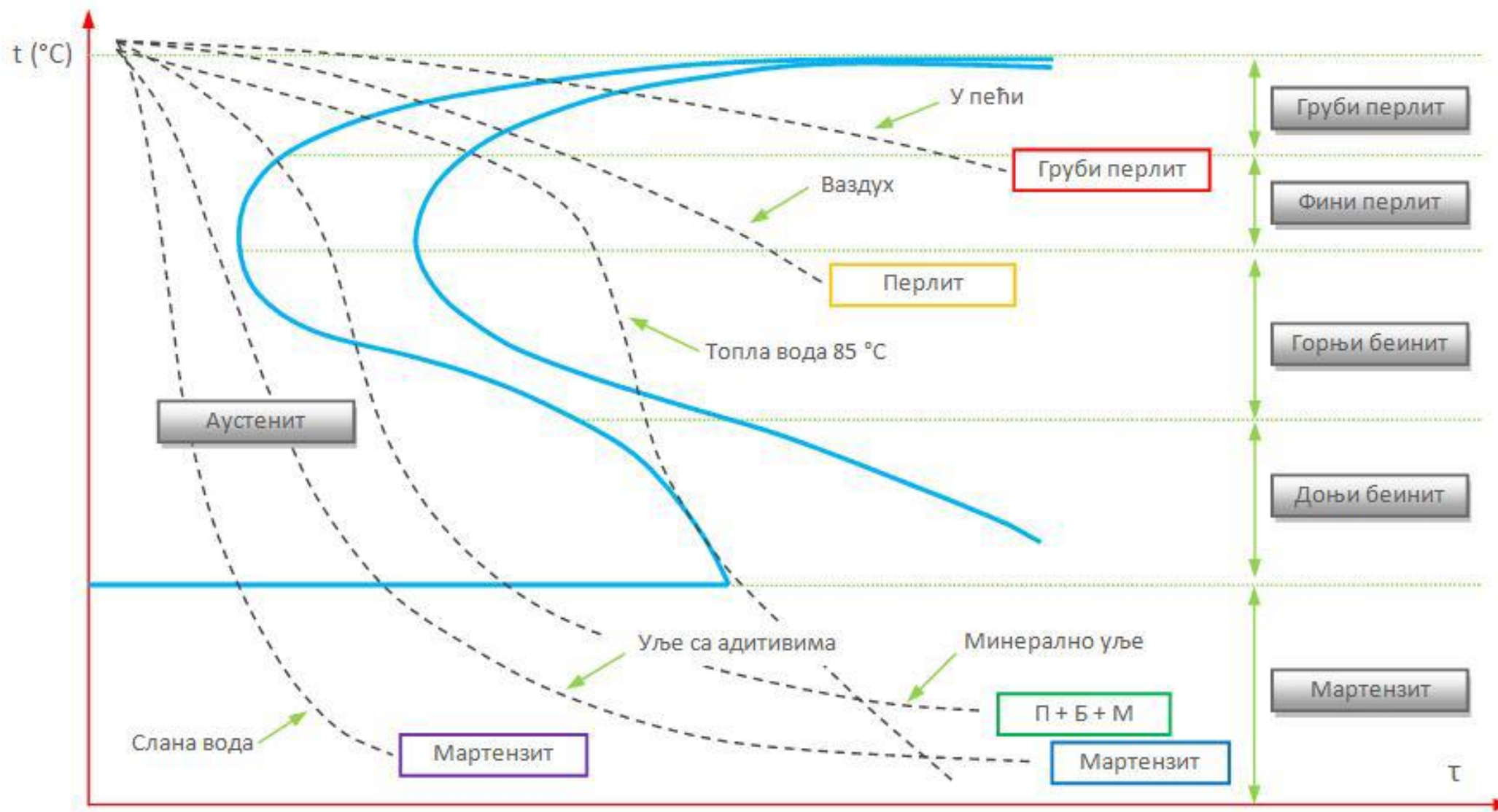
ubrzano zagrevanje



Hlađenje

- **sporo** - najčešće se odvija u zatvorenoj peći;
- **normalno** - hlađenje na mirnom vazduhu;
- **brzo** - najznačajnije hlađenje – kod kaljenja treba da omogući brzinu hlađenja veću od kritične brzine hlađenja ($v > v_{kr.}$) kako bi se obavila transformacija austenita u martenzit.

Uticaј načina hlađenja na fazni sastav ugljeničnog čelika - šematski prikaz



Sredstva za hlađenje

- voda i vodeni rastvori - za ugljenične i niskolegirane čelike
- ulje - za srednje legirane čelike
- topla kupatila sa solima ili metalima - za stepenasto kaljenje i izotermno poboljšavanje
- gasovi (vazduh ili zaštitni gasovi) - za brzorezne čelike
- hladne metalne ploče - deluju dodirom

PROCESI ŽARENJA

Prema Guljajevu:

1. Žarenja prvog reda: temperaturni uslovi koji ne dovode do polimorfne transformacije (stabilizaciono, homogenizaciono, visoko, rekristalizaciono)
2. Žarenja drugog reda: kod kojih polimorfne transformacije uslovljavaju obavljanje procesa (normalizacija, meko, izotermalno, potpuno, nepotpuno)

Stabilizaciono žarenje

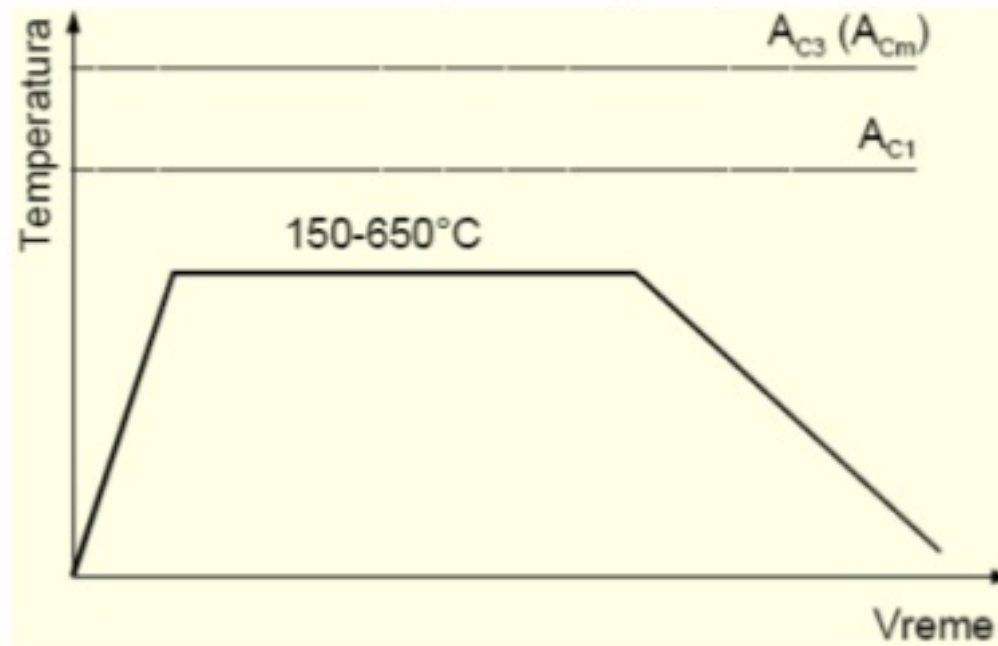
Žarenje radi smanjenja unutrašnjih napona

Otpuštanje napona ostvaruje se laganim zagrevanjem dela do temperature ispod tačke A1 ($A_{1,3}$), zadržavanjem pri toj temperaturi i zatim još sporijim hladjenjem nego pri zagrevanju.

Čelične odlivke i odlivke od livenog gvoždja treba žariti radi otpuštanja napona pri temperaturi 500-600°C.

Čelični delovi, obradjeni plastičnom deformacijom na hladno žare se radi smanjenja napona na znatno nižim temperaturama (250-300°C ispod temperature rekristalizacije).

Ponekad se žarenjem pri temperaturi od 150°C izvodi tzv. stabilizaciono otpuštanje, uglavnom kod mernih i kontrolnih alata, da bi se postigla neophodna dimenziona stabilnost.



Obrazovanje zaostalih napona

- Usled zapreminskih razlika pojedinih oblastim u komadu (toplotni naponi)
- Usled razlika u stepenu deformisanja pojedinih zrna polikristalne strukture (plastično deformisanje)
- Usled defekata unutar kristalne rešetke (tačkaste, dislokacije)

ZAOSTALI NAPONI

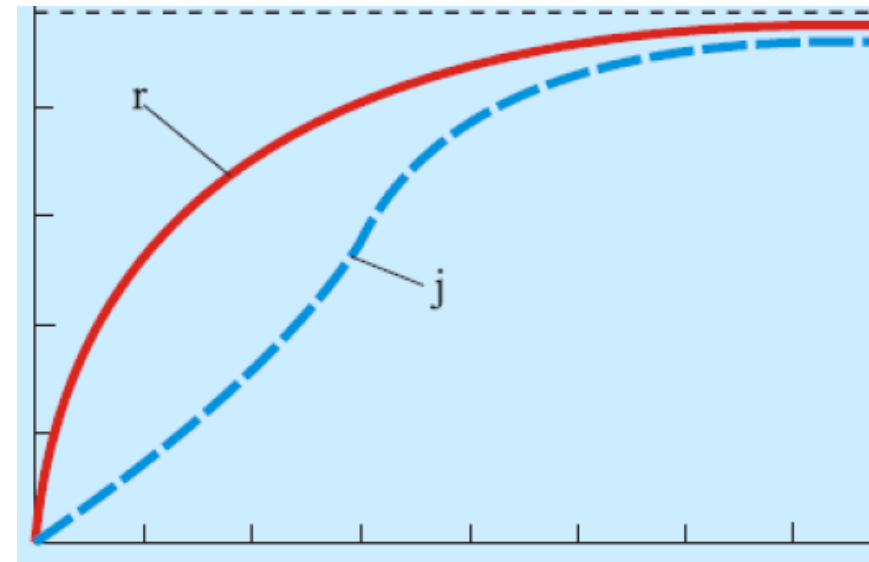
- Prve vrste
- Druge vrste
- Treće vrste

Odlivak od sivog liva

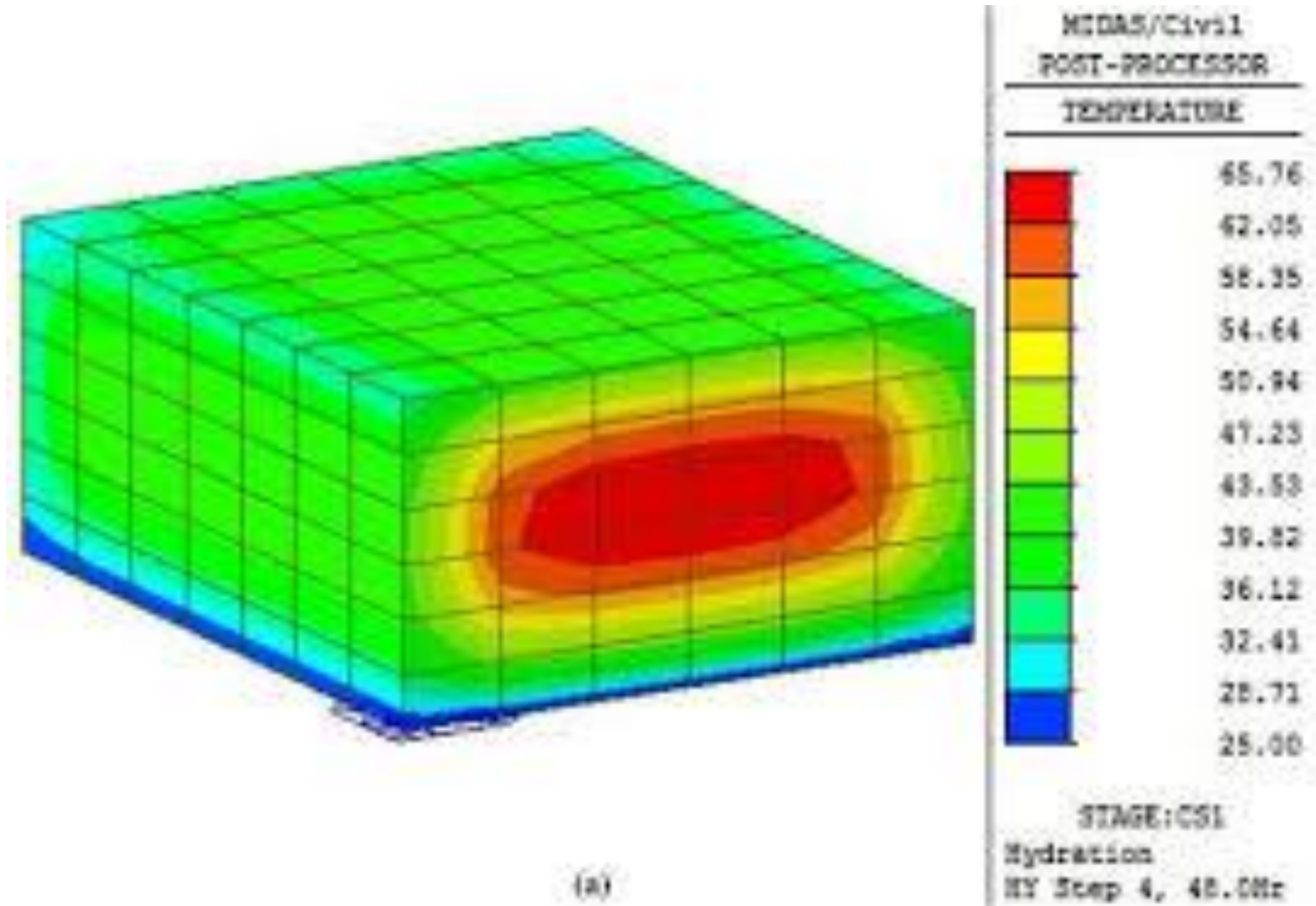
- Pri očvršćavanju i daljem hlađenju odlivaka u kalupu, najbrže se odvodi toplota sa površine odlivka, u zavisnosti od oblika i neravnomernosti debljine zida.
- Nastaje temperaturna razlika u odlivku, koja može biti nekoliko stotina stepeni.
- Zaostali toplotni naponi, mogu biti veći od granice razvlačenja, tako da nastaje „pukotina na toplo“.

Toplotni napon: $\sigma_{topl} = \beta \cdot E \cdot \Delta T$ (Pa)

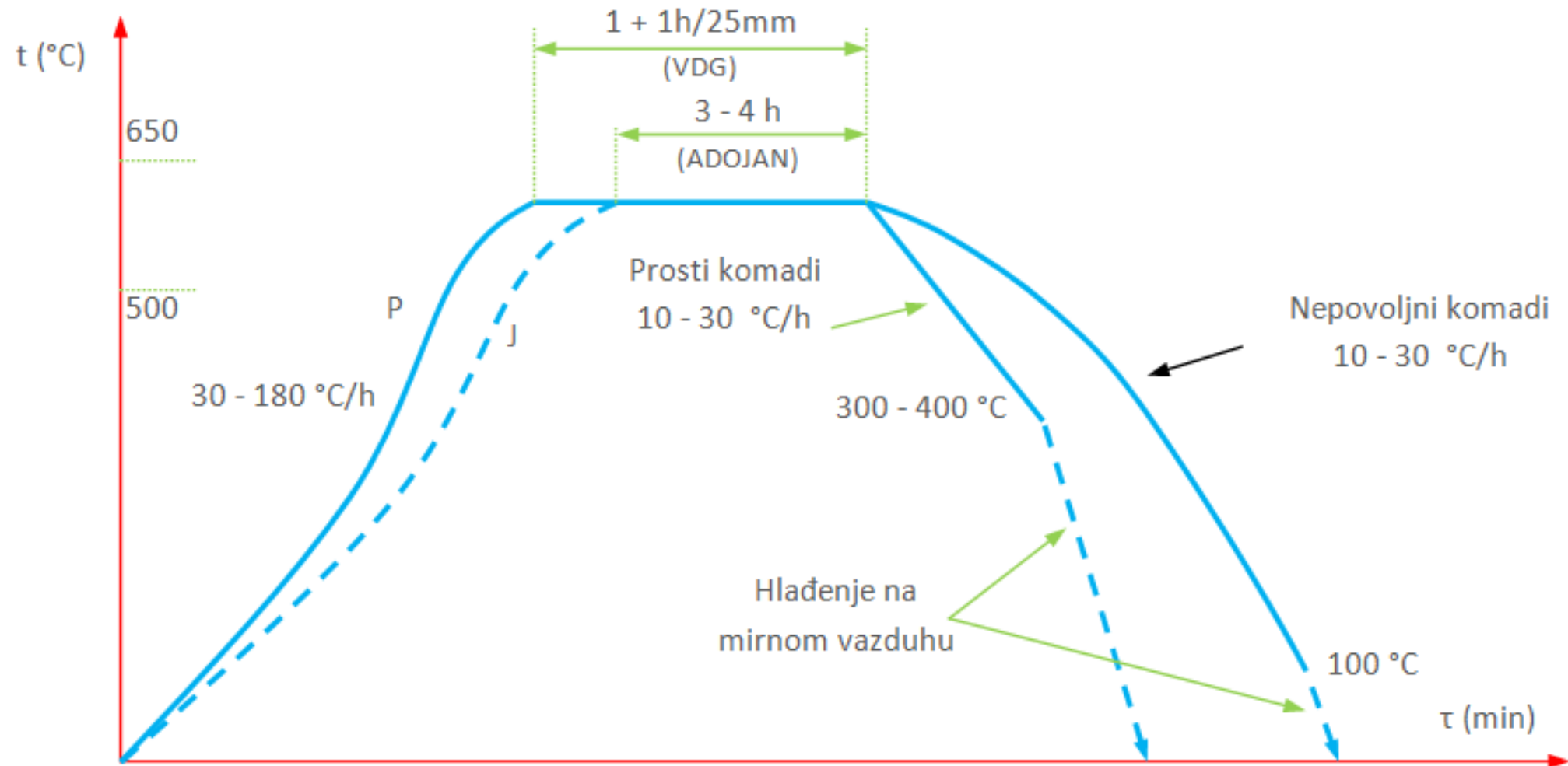
- vrsta materijala, (λ , E)
- debljina obratka
- brzina grejanja i hlađenja
- koef. prelaza toplote, α
- koef. topl. dilatacije (širenja), β



Odlivak pre obrade rezanjem (naponsko polje)

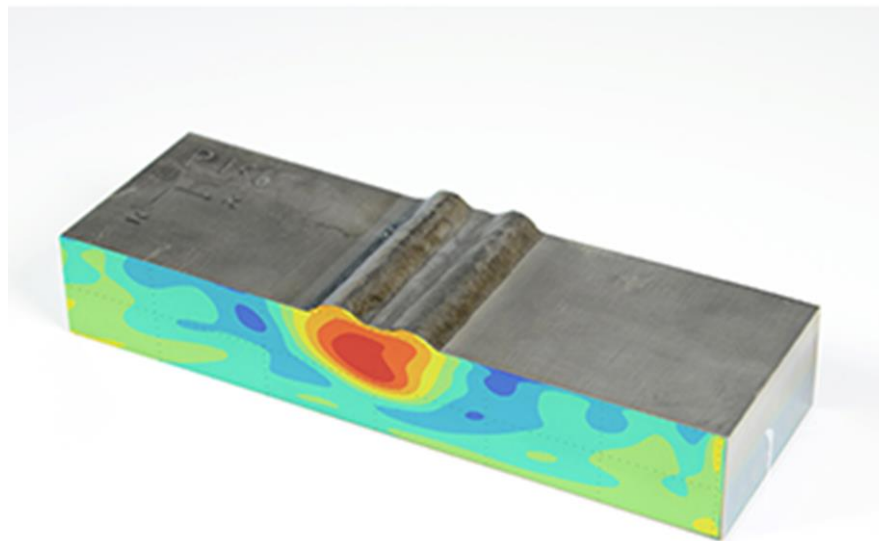


Dijagram stabilizacionog žarenja odlivaka od sivog liva



Zavarene konstrukcije

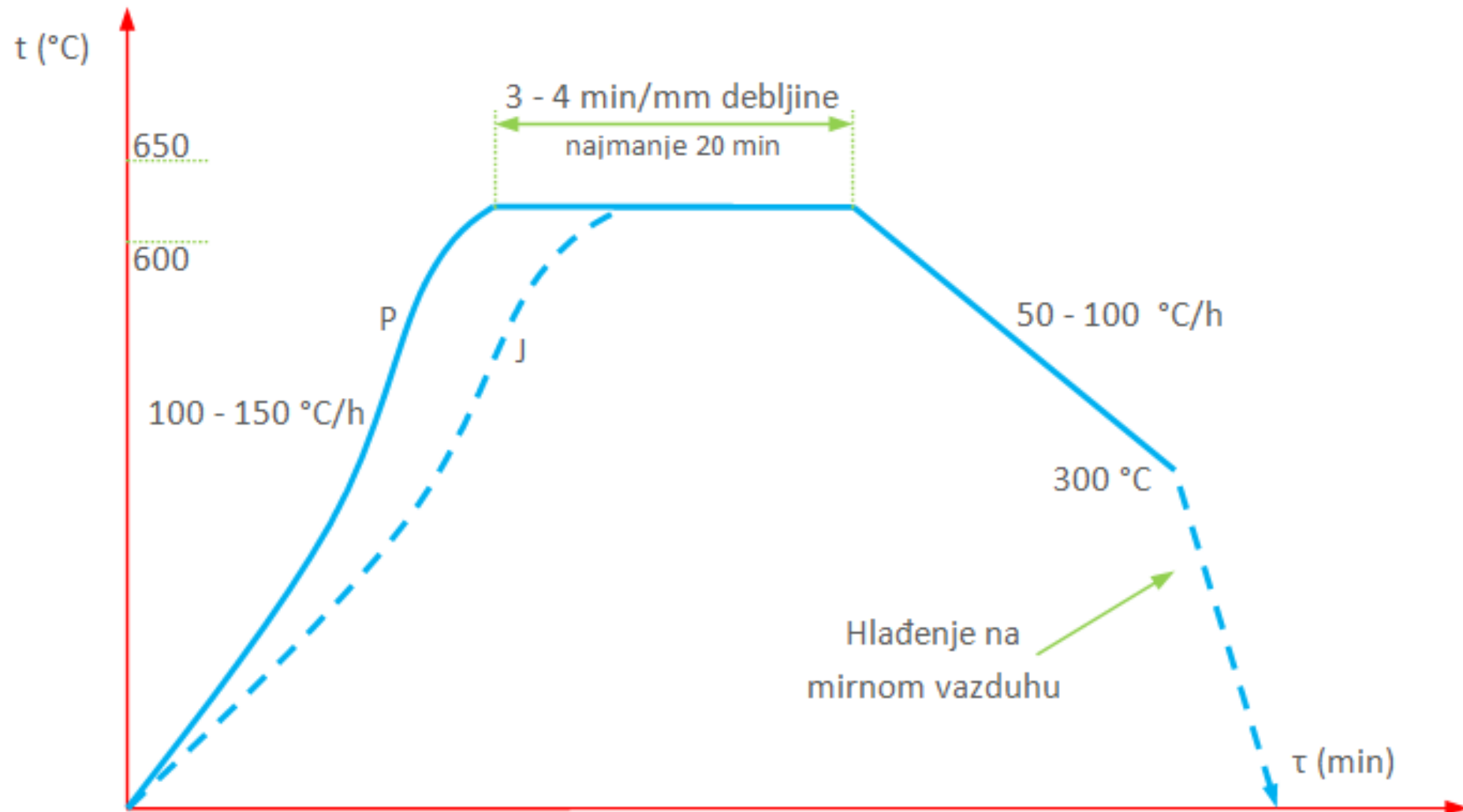
- Pri zavarivanju, istopljeni metal daje vezu izmedju dva dela. Pri ovome nastaju, izmedju ostalih, i toplotni naponi.



- Reakcioni naponi
- Prinudni naponi

- Ne sme se primeniti stabilizaciono žarenje kod zavarenih konstrukcija, ako je %C mali i ako se primenjuje plastična deformacija, zbog moguće rekristalizacije.

Dijagram stabilizacionog žarenja zavarenih čeličnih delova



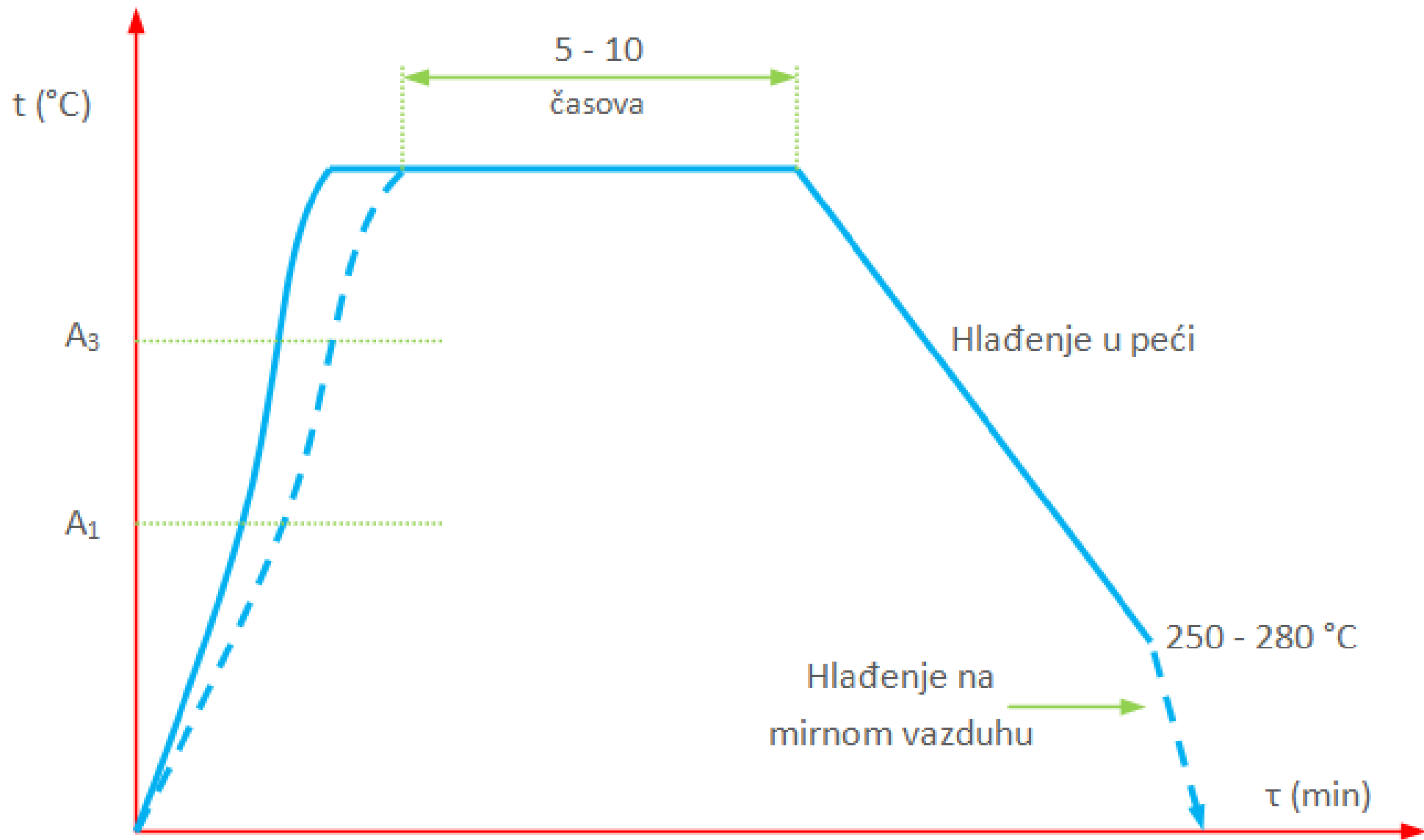
Homogenizaciono žarenje

Ima za cilj uklanjanje lokalnih razlika u udelu hemijskih elemenata. Primenjuje se kod masivnih odlivaka od svih kvaliteta livenih čelika ako se pretenduje na dobre mehaničke osobine. Primena homogenizacionog žarenja u slučaju legiranih čeličnih odlivaka obavezna je kod odlivaka svih veličina. Kod ostalih čeličnih livova radi se za dimenzije odlivka veće od 100 mm.

Kod čeličnih odlivaka homogenizacija se radi na temperaturama od 950 do 1150°C u trajanju od 5 - 10h, a zavisno od veličine komada i vrste čelika.

Hlađenje treba da se obavi u zatvorenoj peći.

Dijagram homogenizacionog žarenja



Visoko žarenje

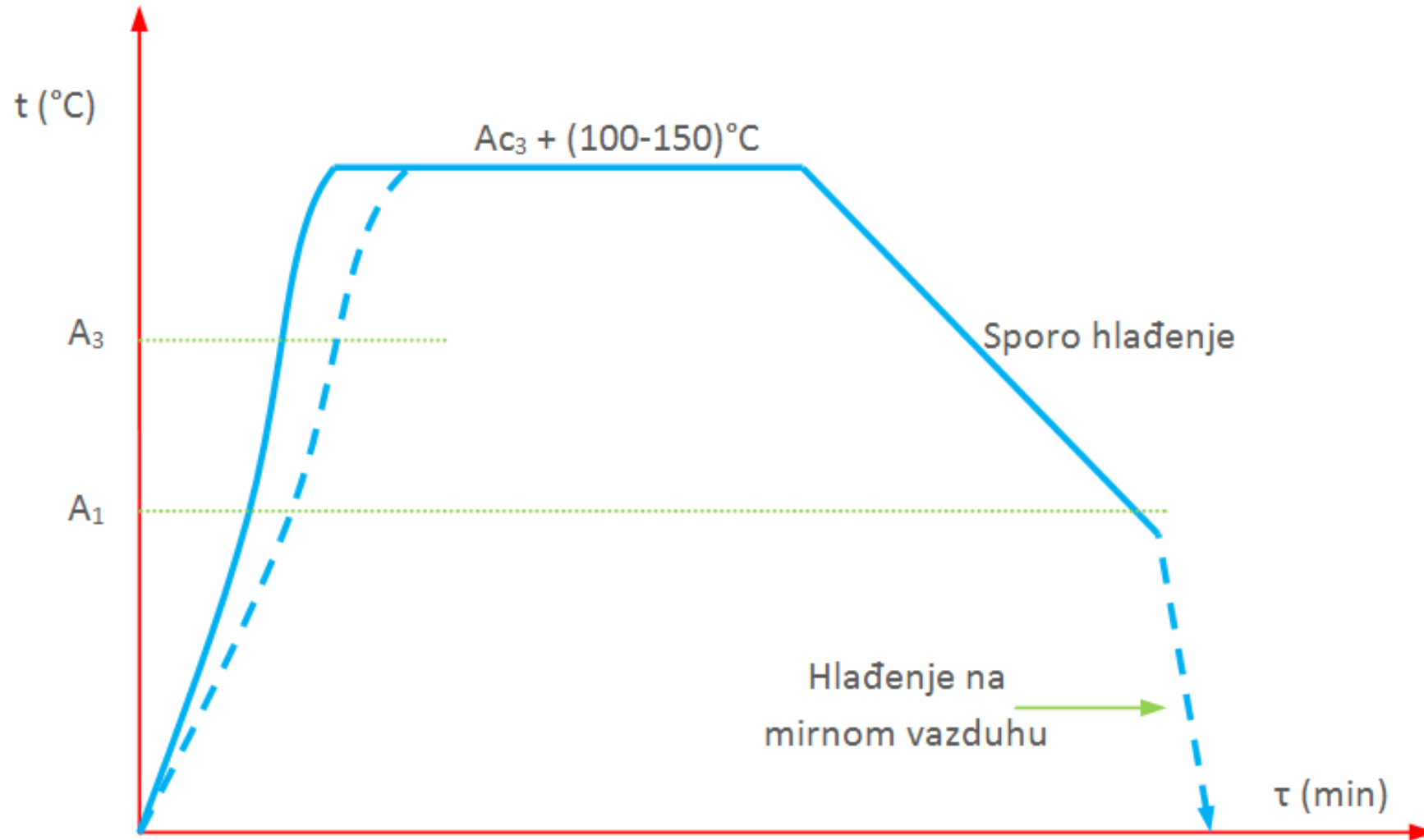
Ima za cilj povečanje obradivosti rezanjem kod niskougleničnih čelika (do 0.3 %C) i povečanjem prokaljivosti kod konstrukcionih čelika.

Obavlja se na visokim temperaturama u austenitnoj oblasti uz dovoljno dugo zadržavanje, što uz sporo hlađenje rezultuje formiranjem krupnozrne strukture. Krupnozrna struktura odlikuje se nepovoljnim mehaničkim osobinama, naročito malom žilavošću. Stoga se visoko-žareni delovi ne smeju koristiti za dinamički opterećene konstrukcije. Kod opterećenih (dinamički) delova, visoko žarenje se primenjuje samo ako se vrši naknadno neki drugi vid termičke obrade.

Na porast krupnoće zrna utiču:

- temperatura
- vreme

Dijagram visokog žarenja

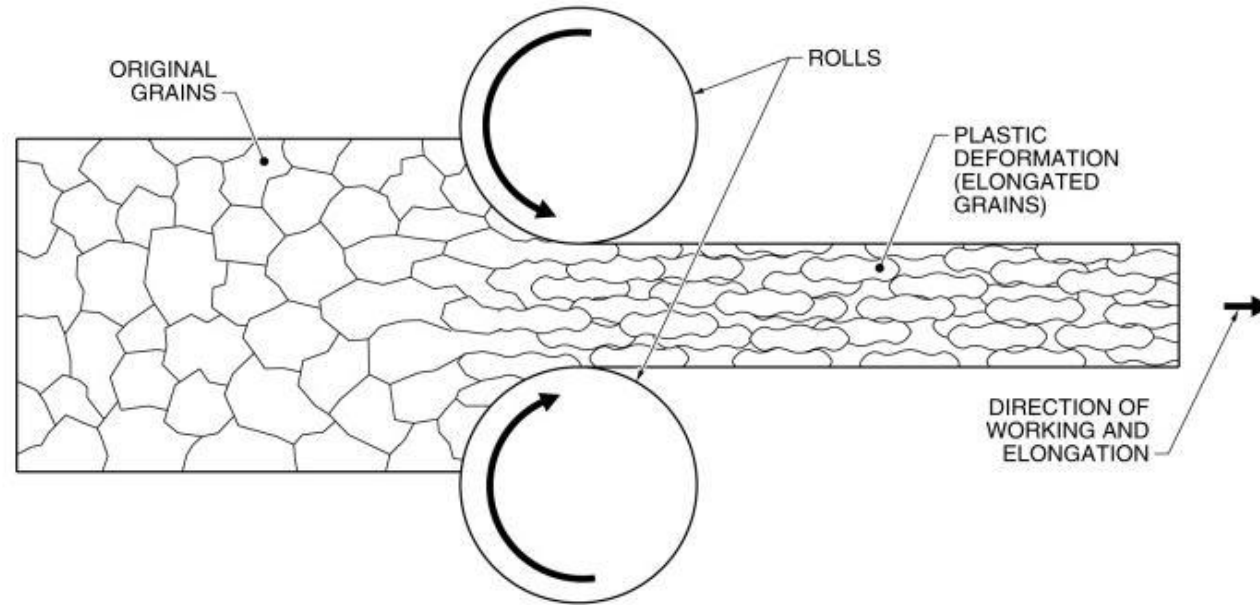


Rekristalizaciono žarenje

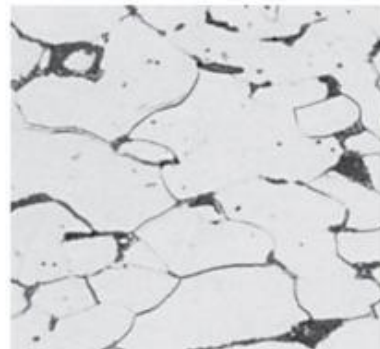
Ima za cilj omekšavanje čelika koji je prethodno ojačan tokom procesa hladne deformacije. Time se omogućuje nastavak dalje obrade plastičnim deformisanjem na hladno.

Postupkom rekristalizacionog žarenja deformisana struktura se transformiše u novu, nedeformisanu strukturu. Obavlja se na temperaturi iznad praga rekristalizacije ($0.4 \times T_{\text{topljenja}}$), što za čelike iznosi od 550 do 720 °C. Neophodna temperatura žarenja i veličina zrna novonastale strukture smanjuju se sa stepenom prethodne deformacije na hladno (veći stepen deformacije, finija zrna).

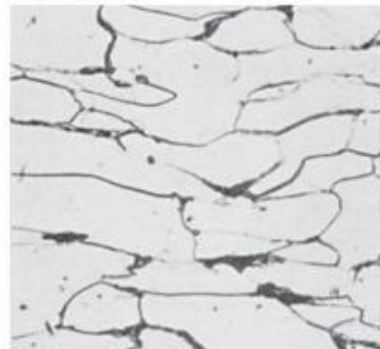
Šematski prikaz izduženja zrna pri plastičnoj deformaciji na hladno



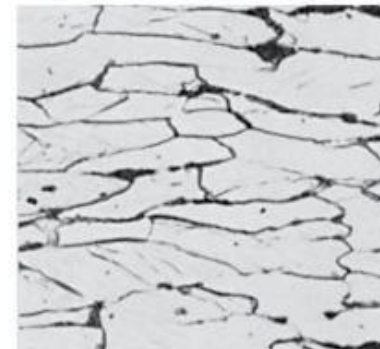
COLD WORKING
(ROLLING) OF METAL



20% REDUCTION

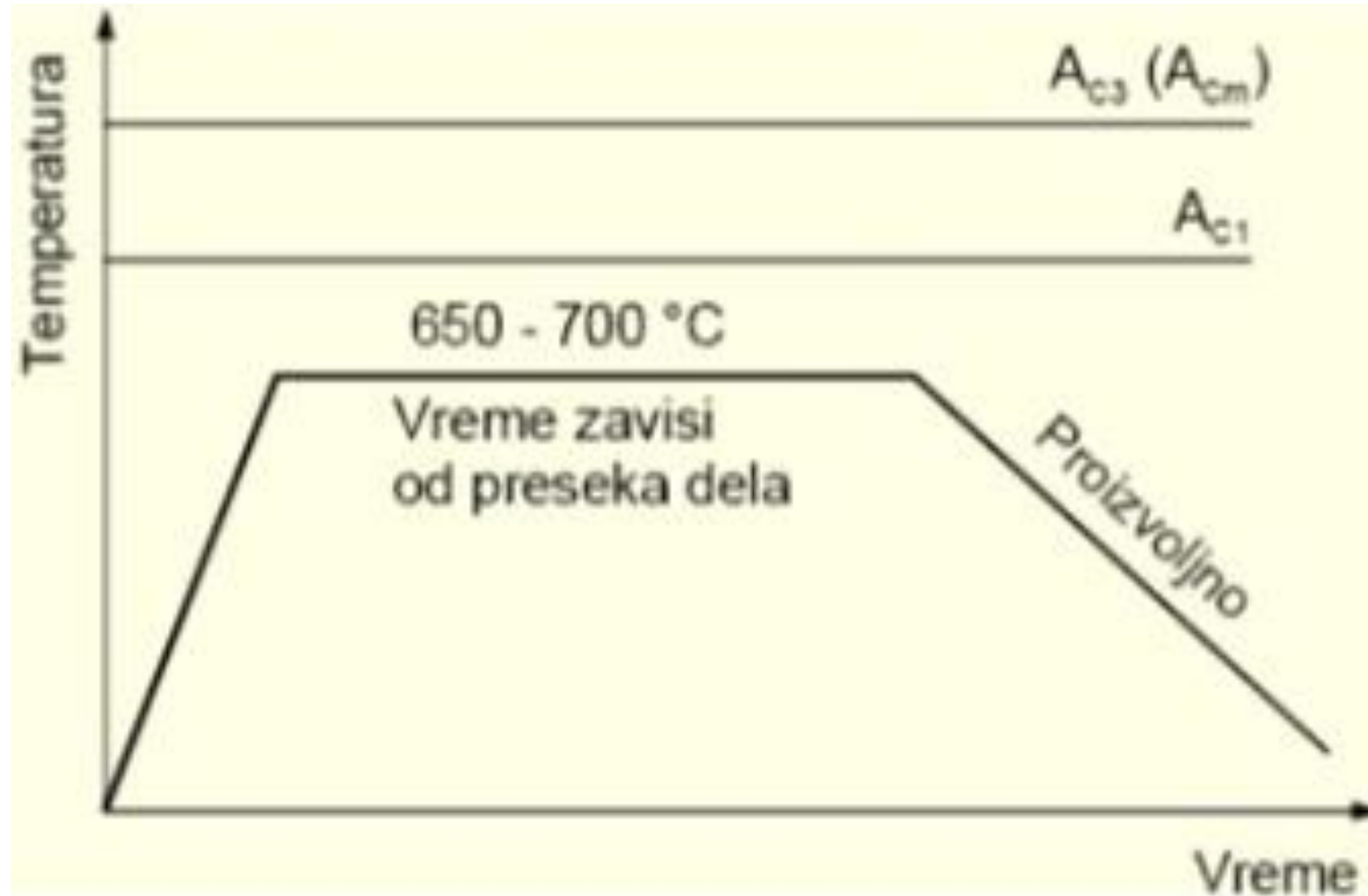


40% REDUCTION



50% REDUCTION

Dijagram rekristalizacionog žarenja

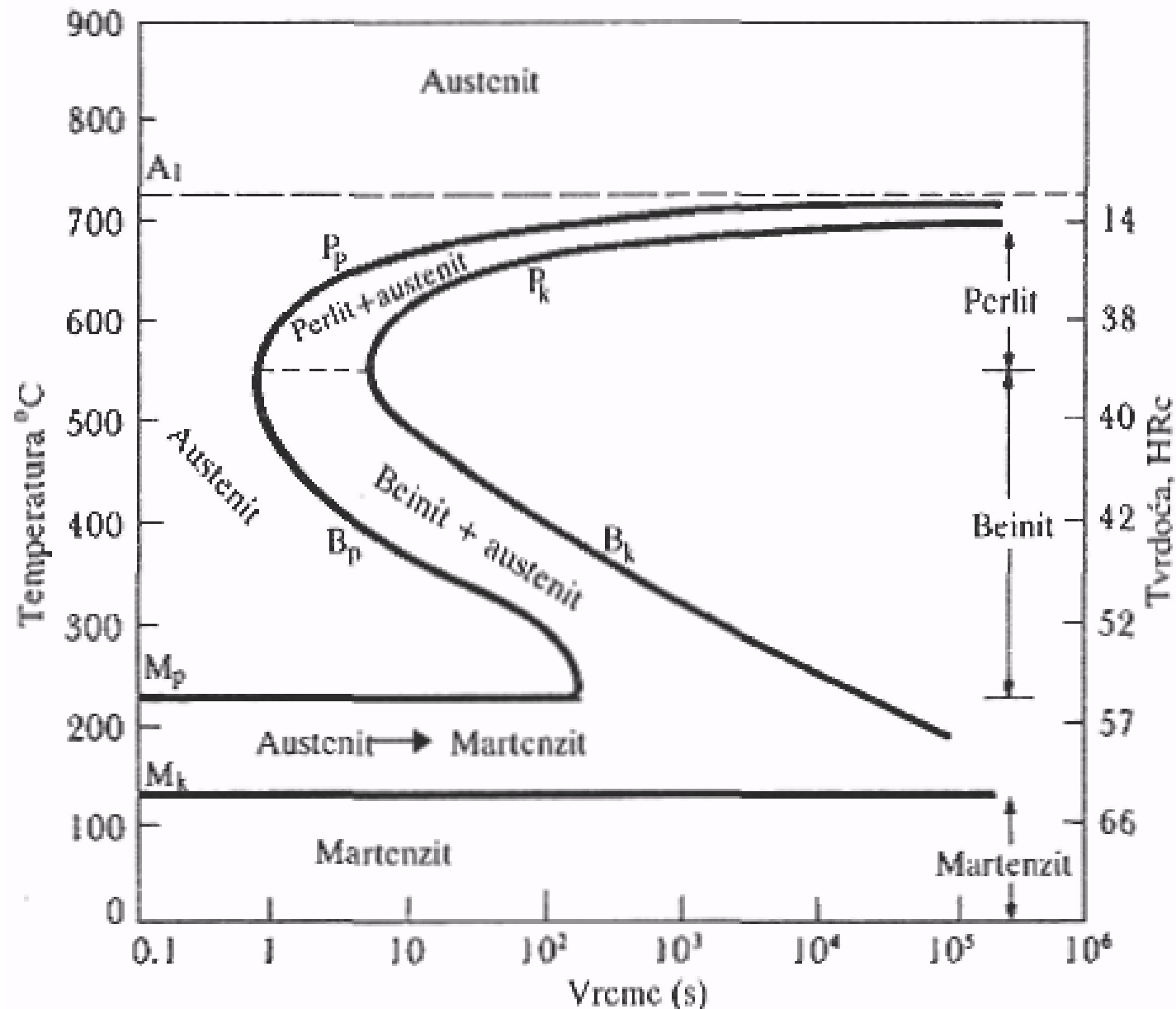


Normalizacija

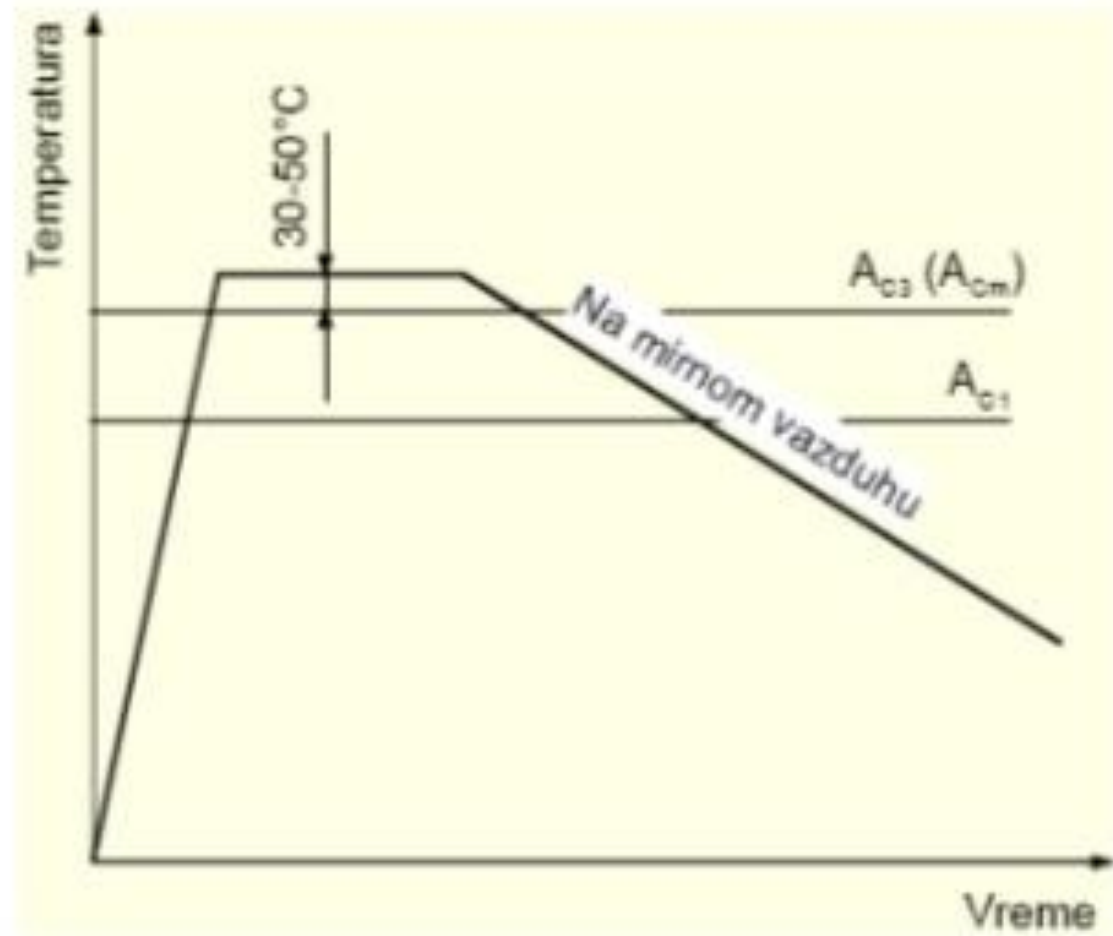
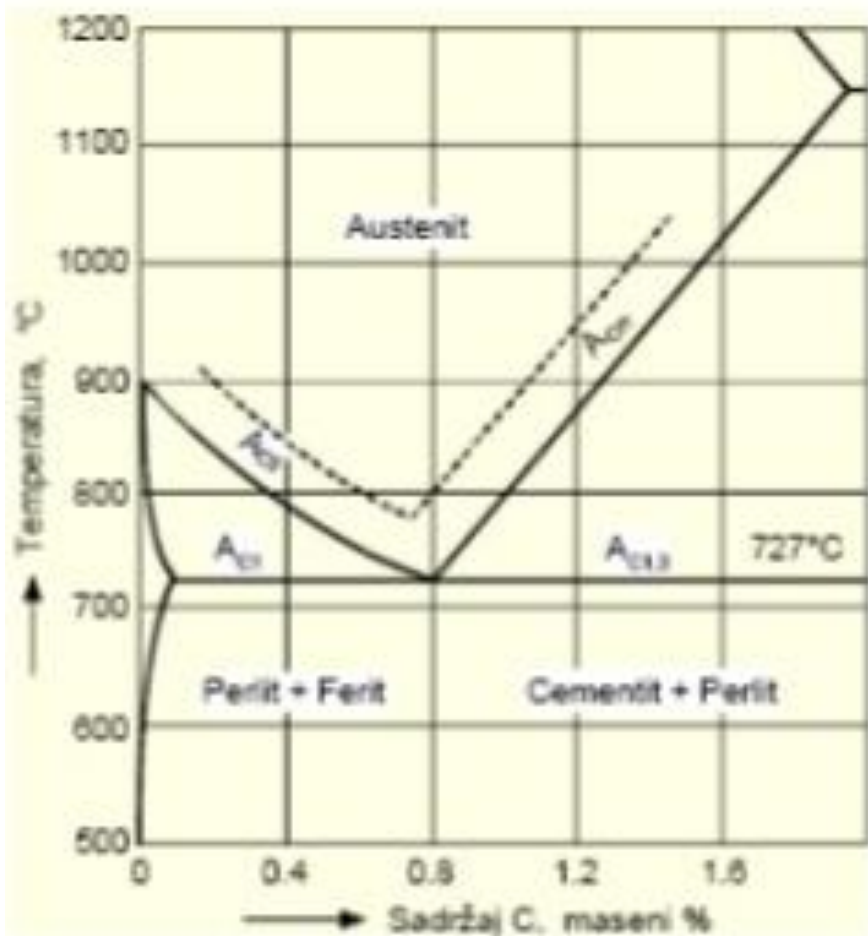
Ima za cilj popravljavanje strukture, tj. dobijanje strukture prugastog perlita. Vrši se zagrevanje u austenitnu oblast (za podeutektoidne čelike) ili u prelaznu oblast (za nadeutektoidne čelike), dovoljno dugo zadržavanje na odgovarajućoj temperaturi i hlađenje dovoljno sporo da nastane perlitna struktura.

Temperature početka i kraja transformacije zavise od vrste čelika, jer prisutni elementi utiču na stabilnost austenita.

Uticaj veličine pothlađenja



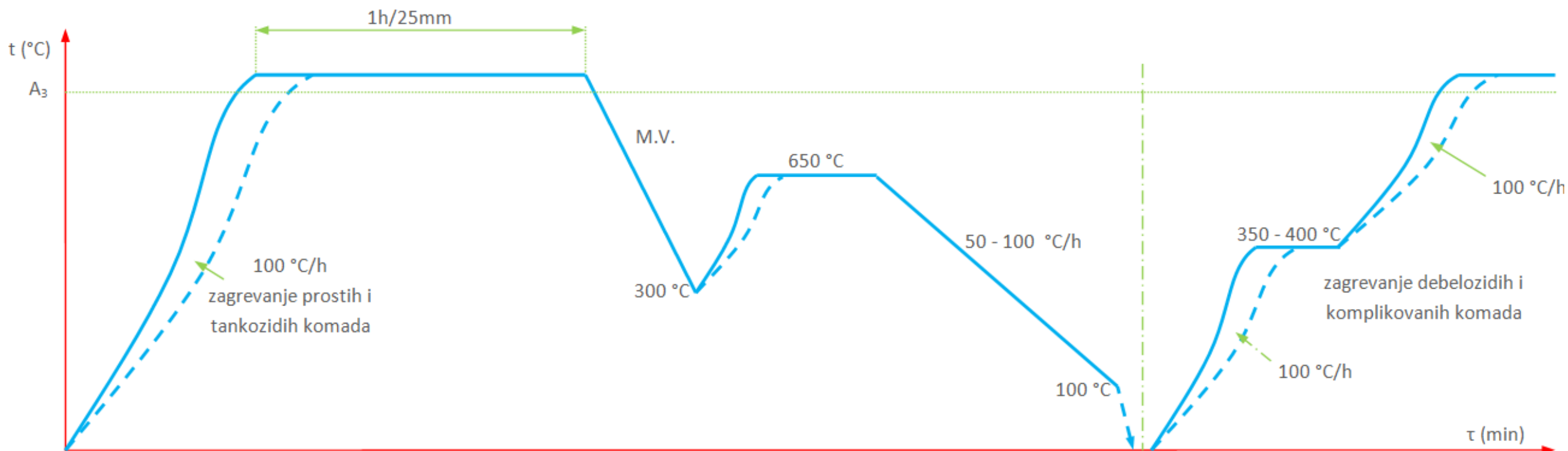
Normalizacija



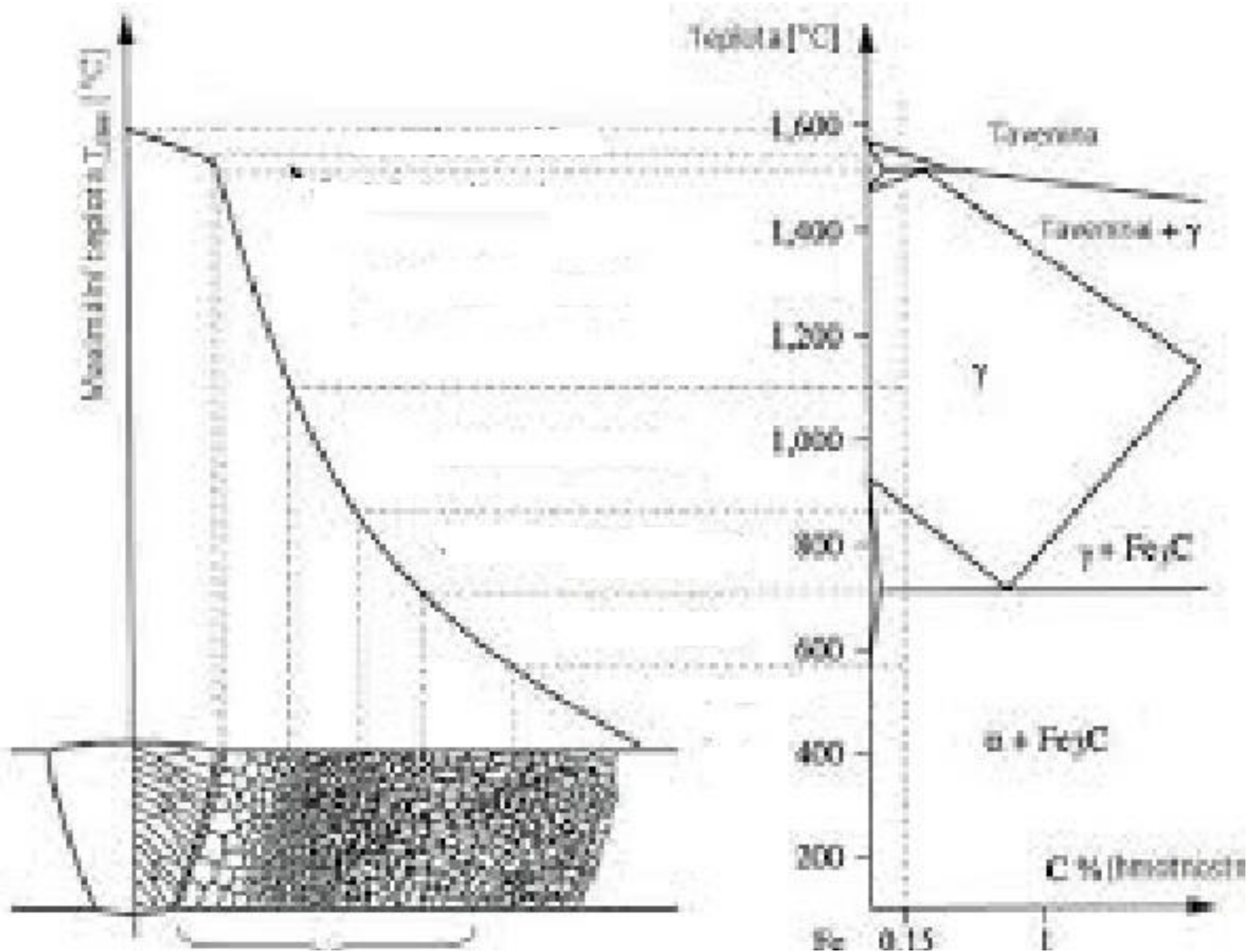
Livenje čeličnih odlivaka - pri livenju čelika u kalupe od peska nastaje tzv. Vidmanštetenova struktura (loše mehaničke osobine i posebno mala žilavost) pa su ovakvi sirovi odlivci neupotrebljivi.

U okviru procesa normalizacije hlađenje se odvija na vazduhu što kod složenih odlivaka izaziva toplotne napone. Da bi se ti naponi uklonili kombinuje se proces normalizacije i stabilizacionog žarenja.

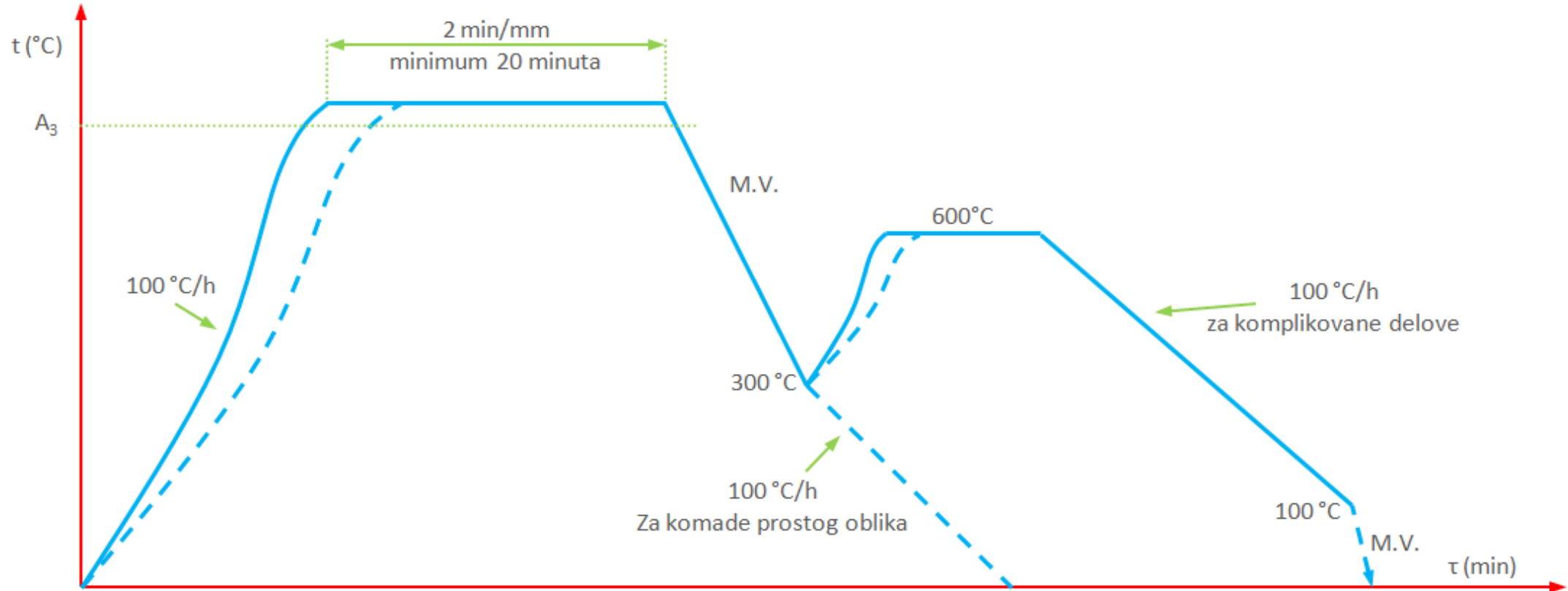
Dijagrami normalizacije čeličnih odlivaka



Toplotno dejstvo kod zavarivanja



Dijagrami normalizacije zavarenih elemenata



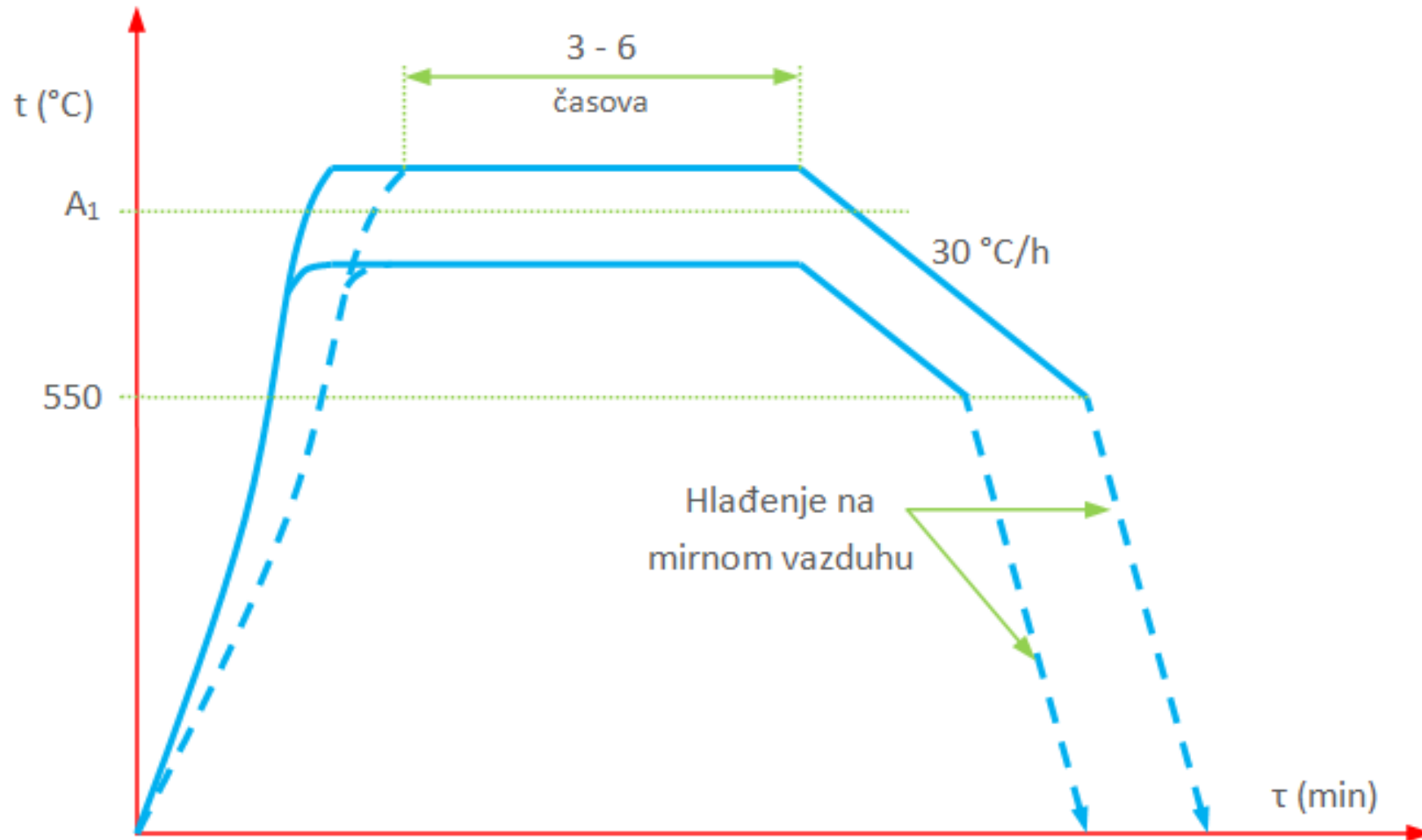
Meko žarenje

- Ima za cilj povećanje obradivosti rezanjem i plastičnim deformisanjem kod čelika sa udelom ugljenika većim od 0.6 %C. Ovim vidom žarenja, struktura prugastog perlita prevodi se u strukturu zrnatog perlita. (koagulacija cementita)
- Temperatura mekog žarenja zavisi od vrste čelika.

Temperatura mekog žarenja za različite čelike

Čelik	Temperatura °C
Konstruktivni čelik	malo ispod A1
Čelik sa 0.9 %C	730
Čelik sa 1.1 %C	740
Čelik sa 1.2 %C	750
Alatni i legirani čelik	750 do 800

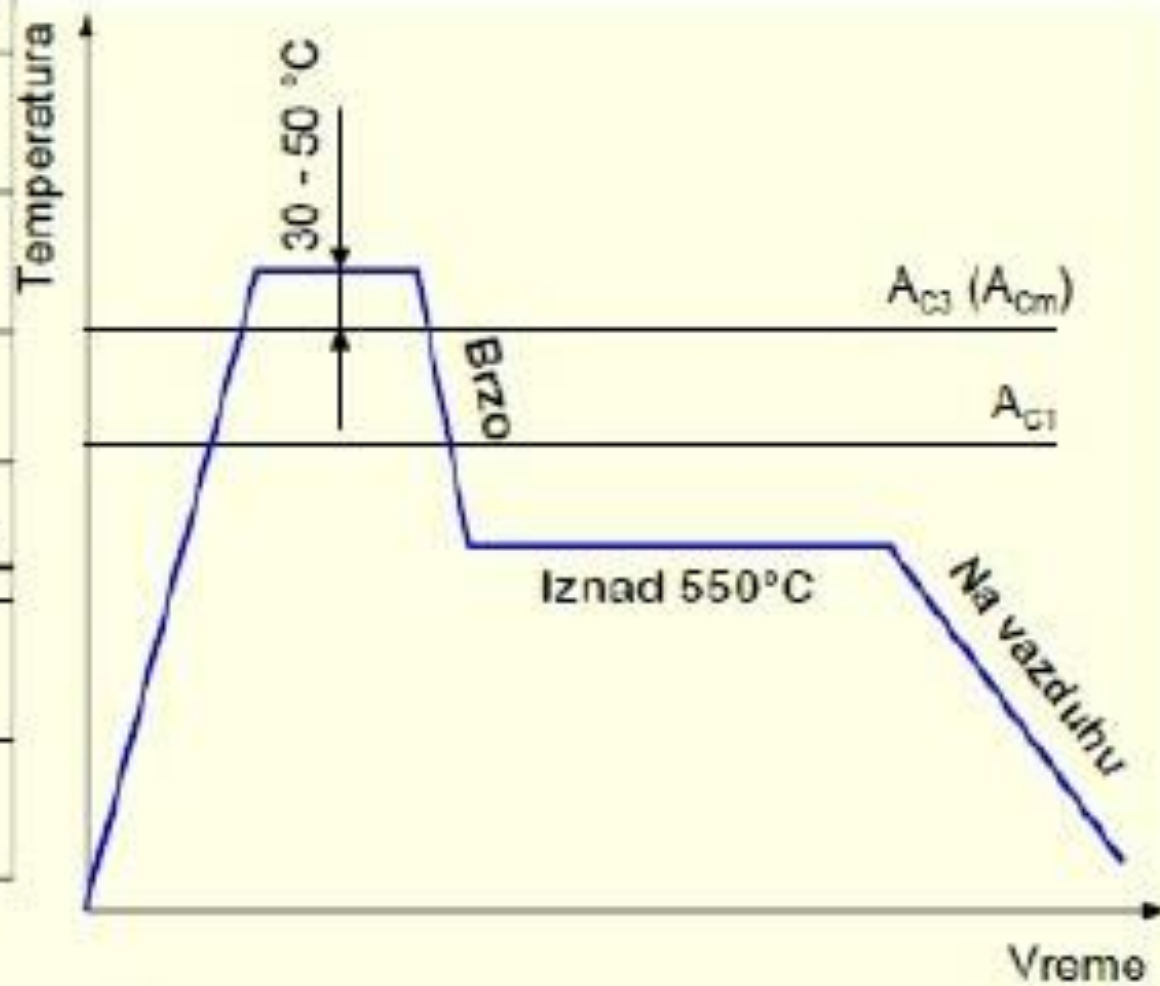
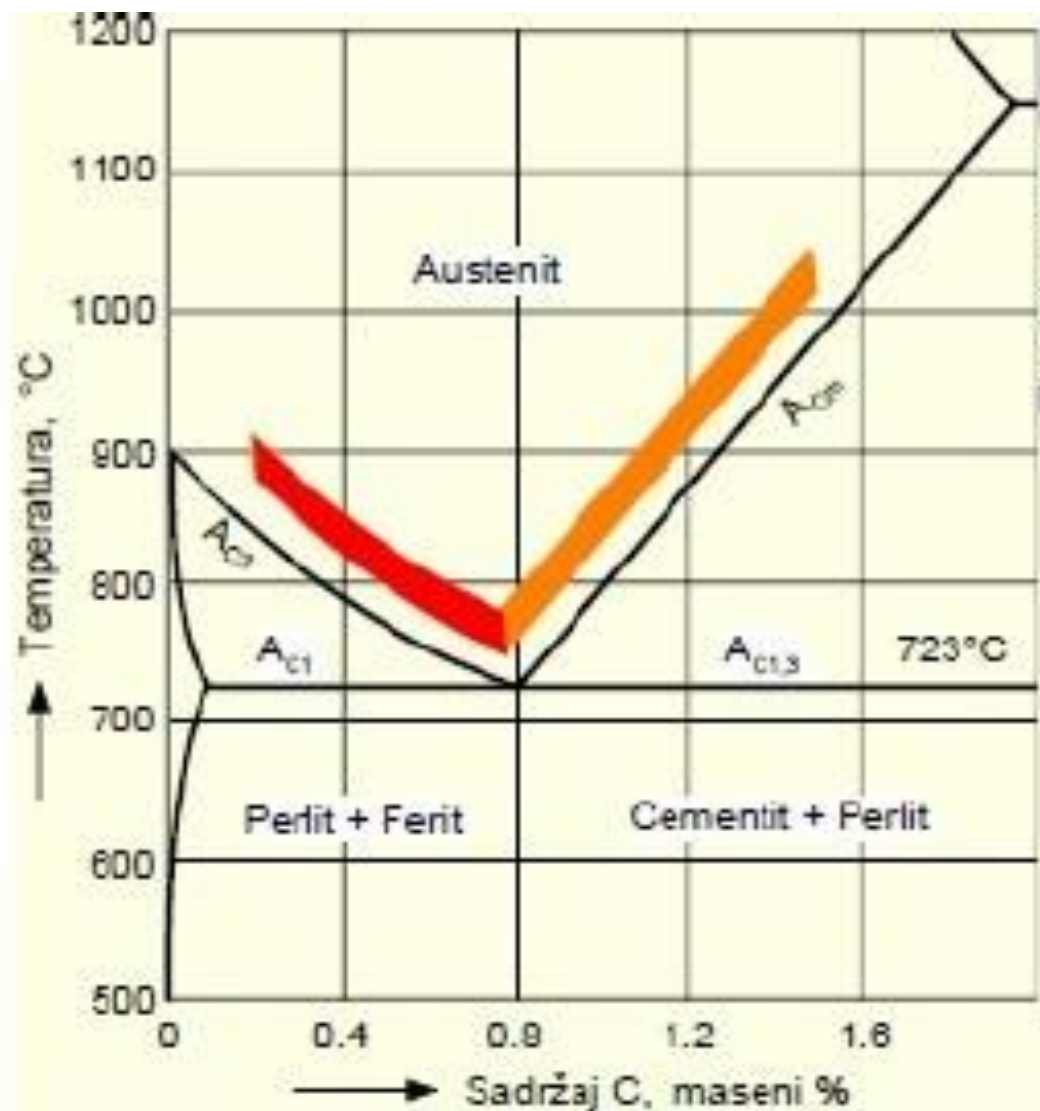
Dijagram mekog žarenja



NORMALIZACIJA IZOTERMALNA

- Potpuno fina i homogena struktura po celom preseku. (Patentiranje žice).
- Deo se zagreva 30-50°C iznad gornje kritične temperature AC3 , zatim brzo hladi do temperature nešto iznad 550°C, zadržava pri toj temperaturi do završetka perlitne promene i najzad hladi na vazduhu.
- Izotermalno žarenje ima prednost u odnosu na potpuno žarenje jer obezbeđuje skraćeno vreme procesa i dobijanje jednorodnije strukture.

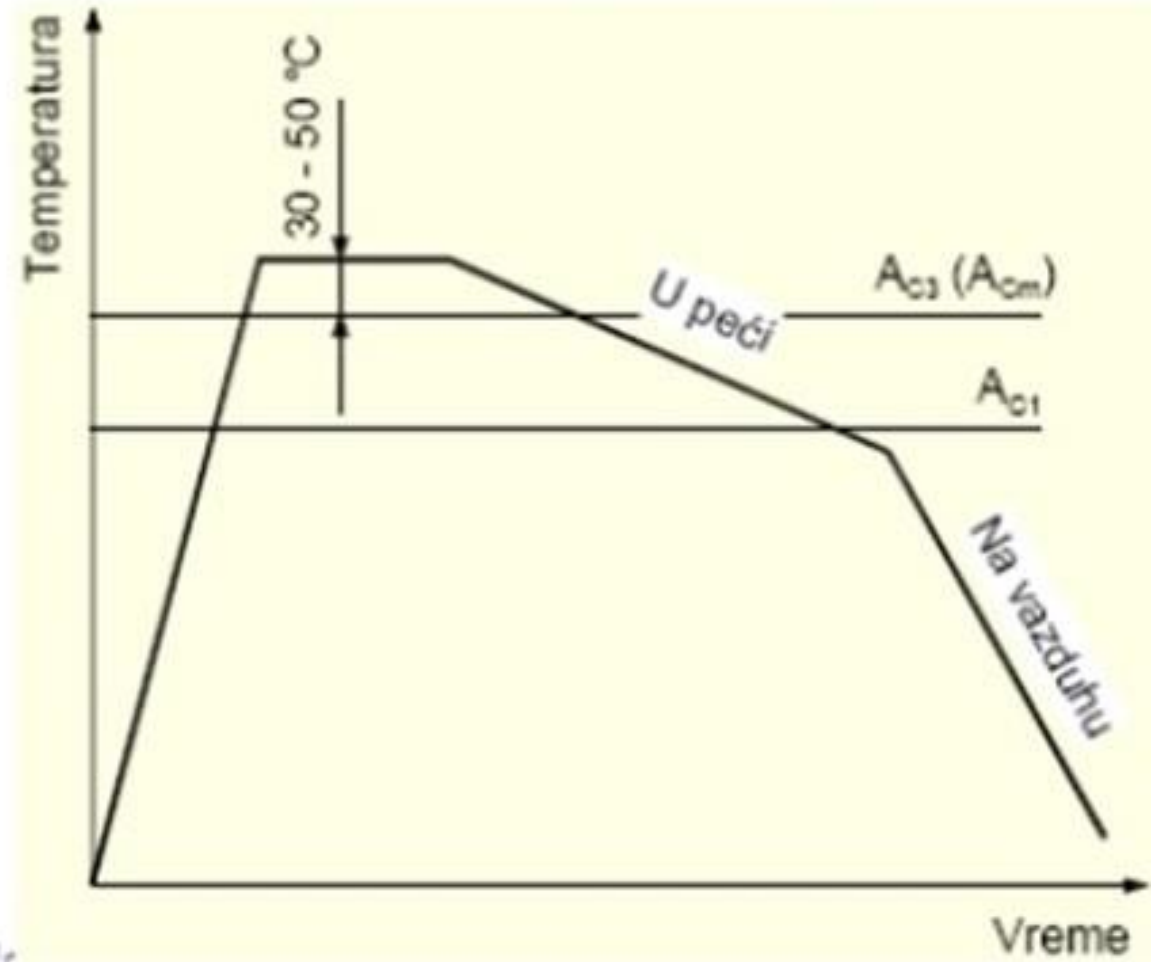
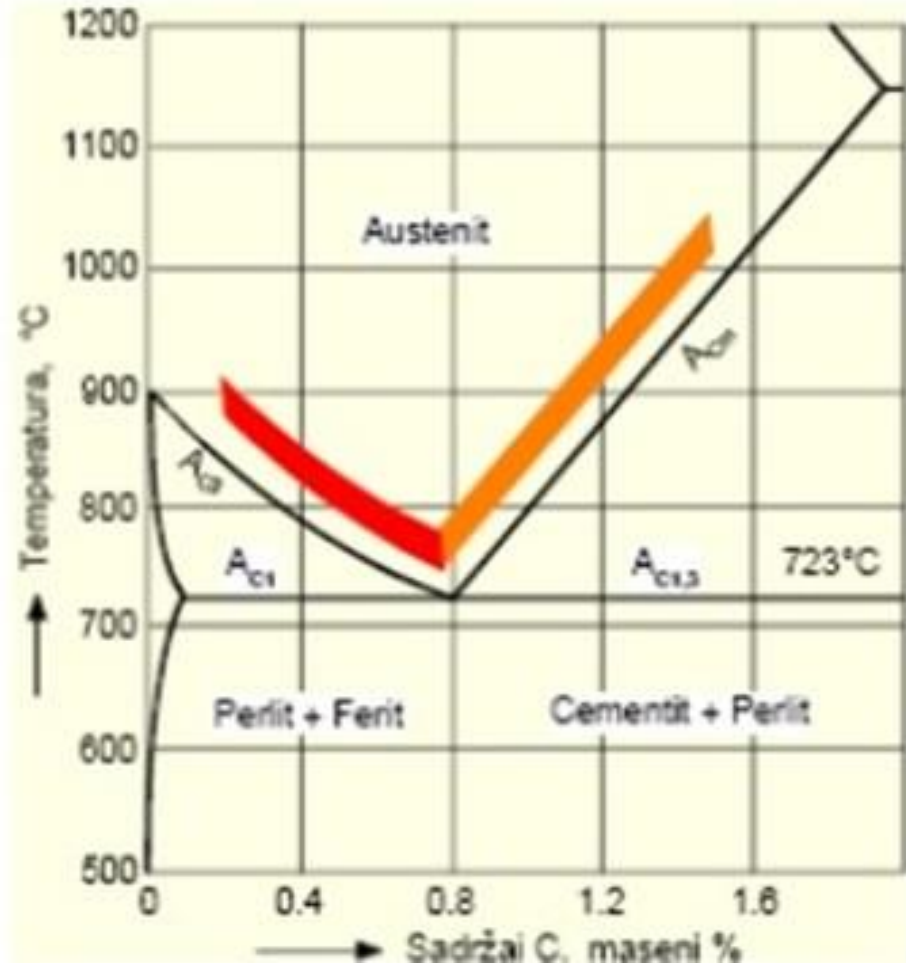
NORMALIZACIJA IZOTERMALNA



Potpuno žarenje

- Zasniva se na zagrevanju čelika do austenitnog područja (30-50°C iznad tačke AC3-ACm), zatim zadržavanju na odabranoj temperaturi i veoma sporom hladjenju u peći u intervalu faznih promena (A3, ACm,- A1). Dalje hladjenje od A1 do sobne temperature može biti na vazduhu.
- Svrha potpunog žarenja jeste usitnjavanje zrna, otklanjanje nepovoljne Vidmanšeteneve strukture, ujednačavanje strukture, kao i otklanjanje sopstvenih napona, tako da čelik postane mekši.
- Primjenjuje se kod niskougleničnih čelika kao priprema za duboko izvlačenje i za poboljšanje mašinske obradljivosti kod visokougleničnih čelika.
- NEPOTPUNA ŽARENJA: temperatura zagrevanja između A1 i A3.

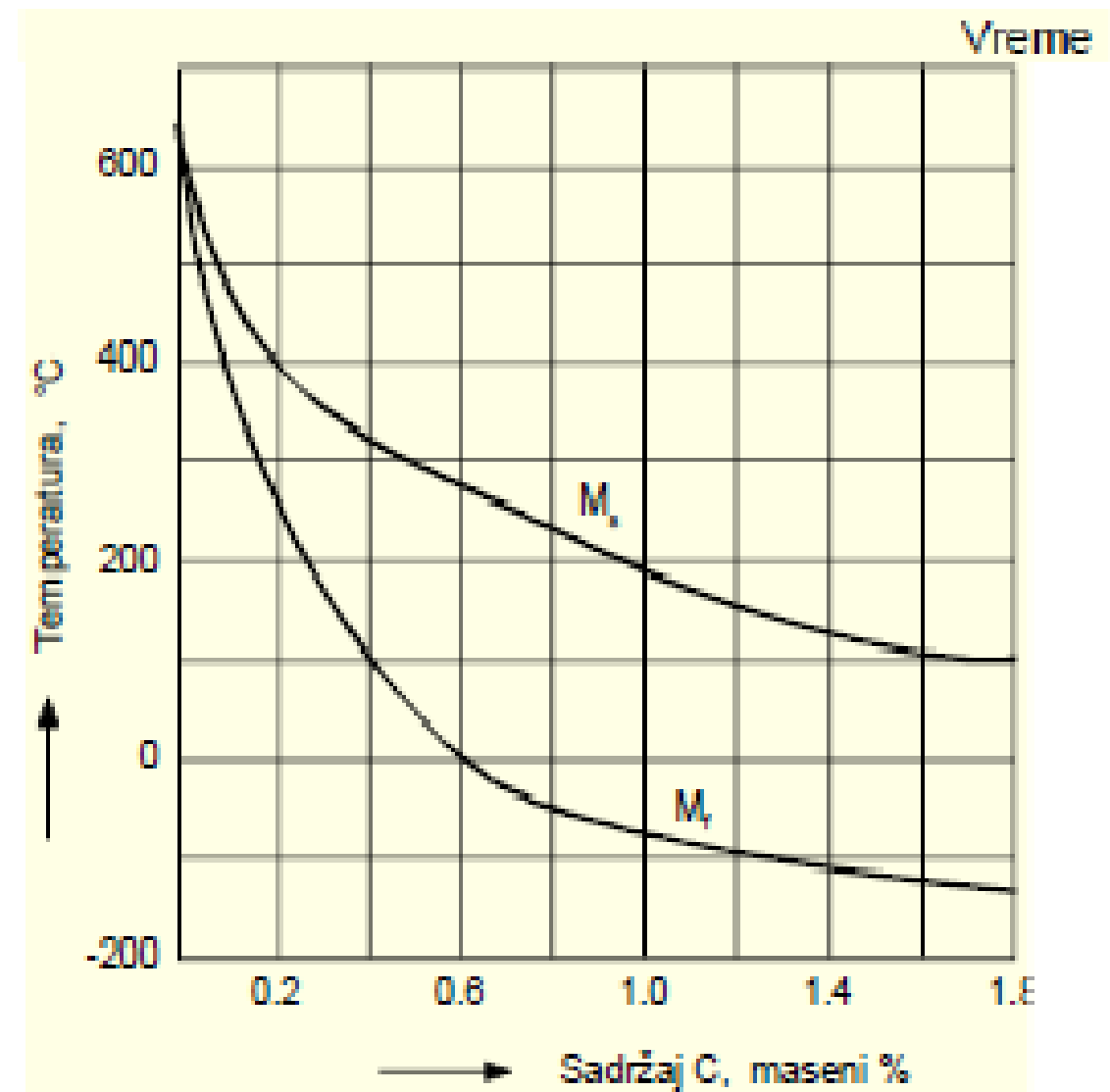
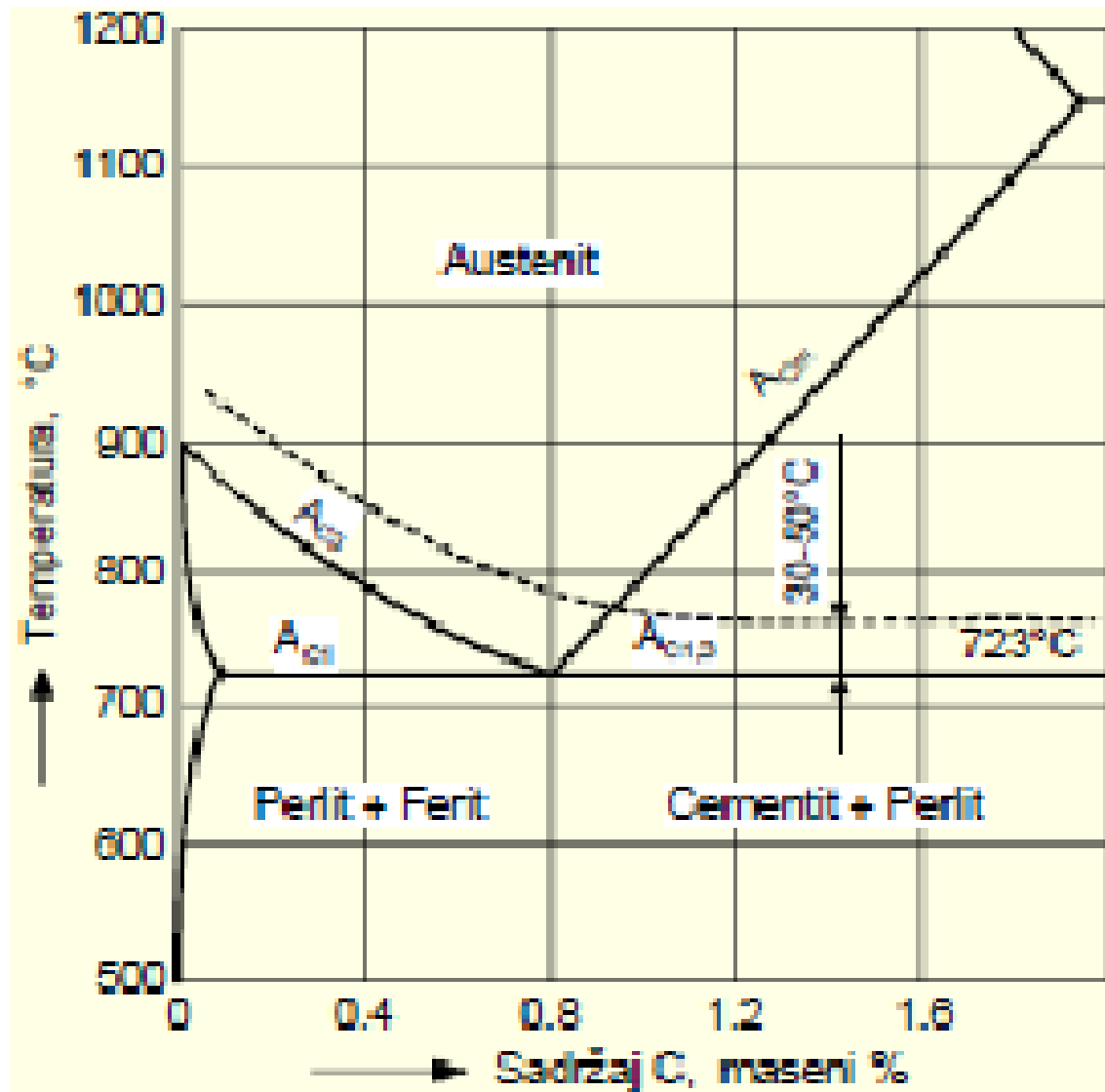
Potpuno žarenje



KALJENJE ČELIKA

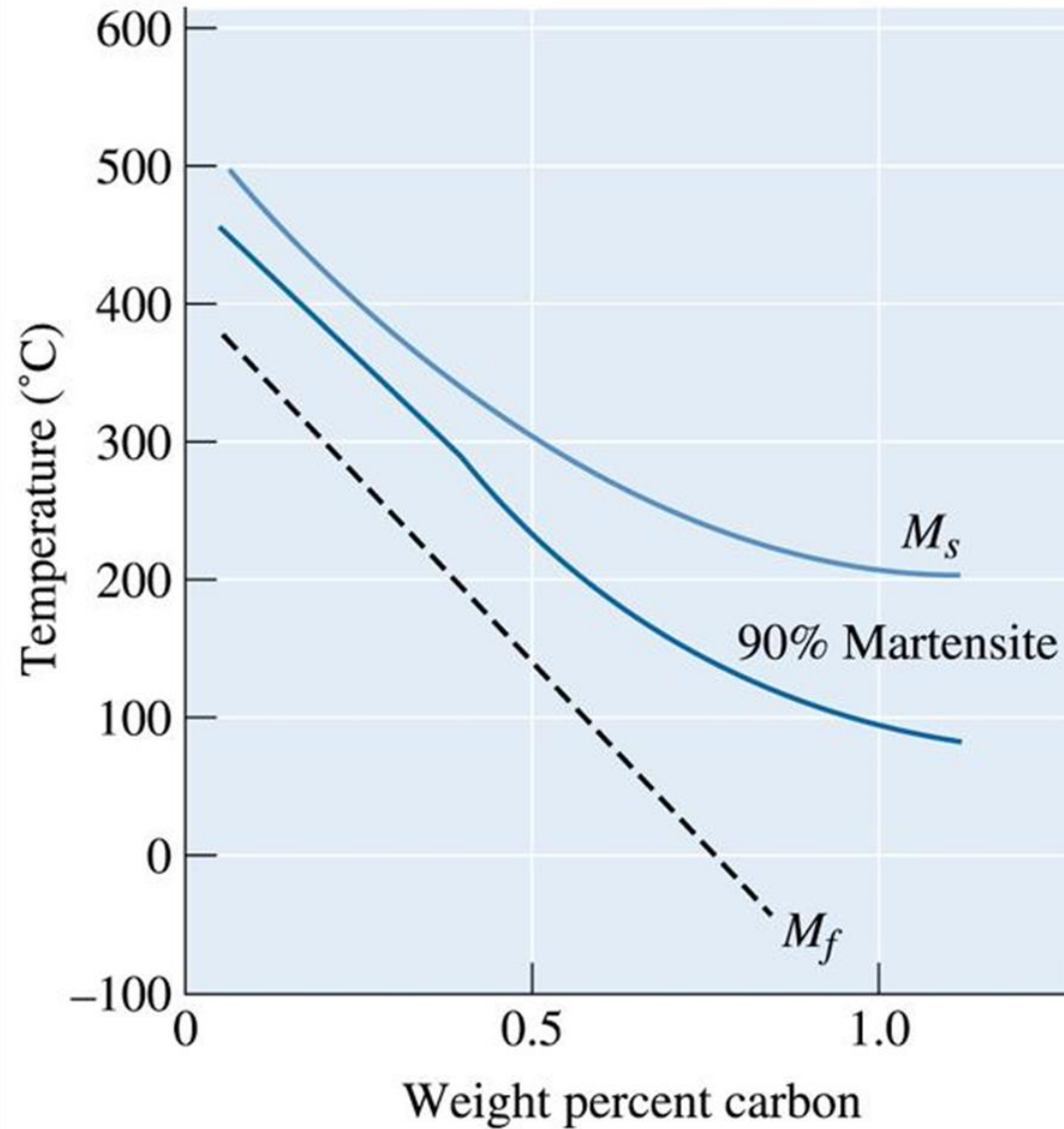
- Kaljenje čelika je termička obrada koja se izvodi zagrevanjem radnog predmeta iznad temperature A_{c3} , za podeutektoidne i $A_{c1,3}$ za nadeutektoidne čelike, progrevanjem na toj temperaturi i hladjenjem brzinom većom od kritične.
- Minimalna brzina hlađenja, pri kojoj se austenit transformiše u martenzit (bez perlita) zove se kritična brzina hlađenja.
- Martenzit je prezasićen čvrst rastvor ugljenika u α -željezu (feritu).

KALJENJE ČELIKA

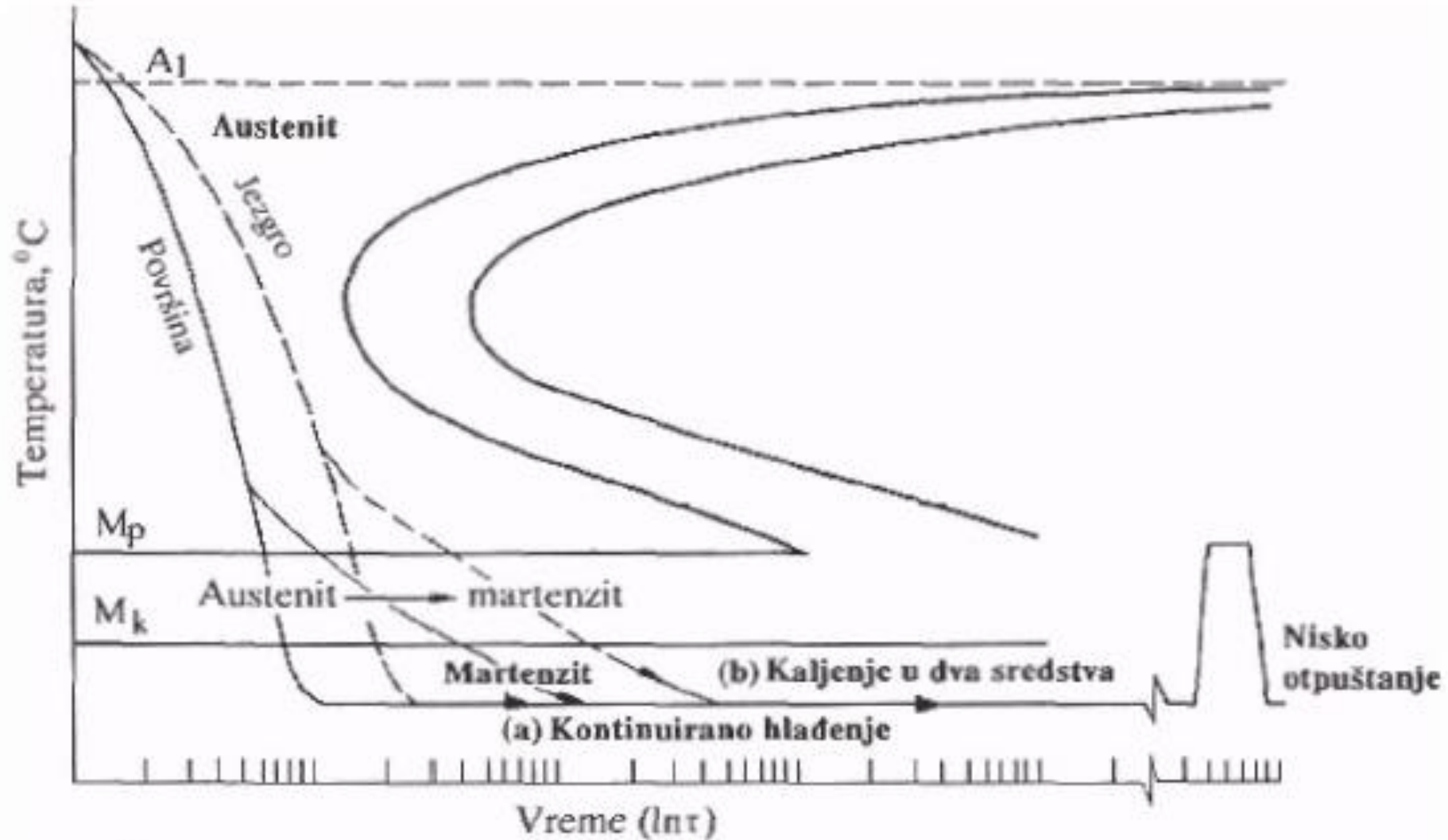


KALJENJE ČELIKA

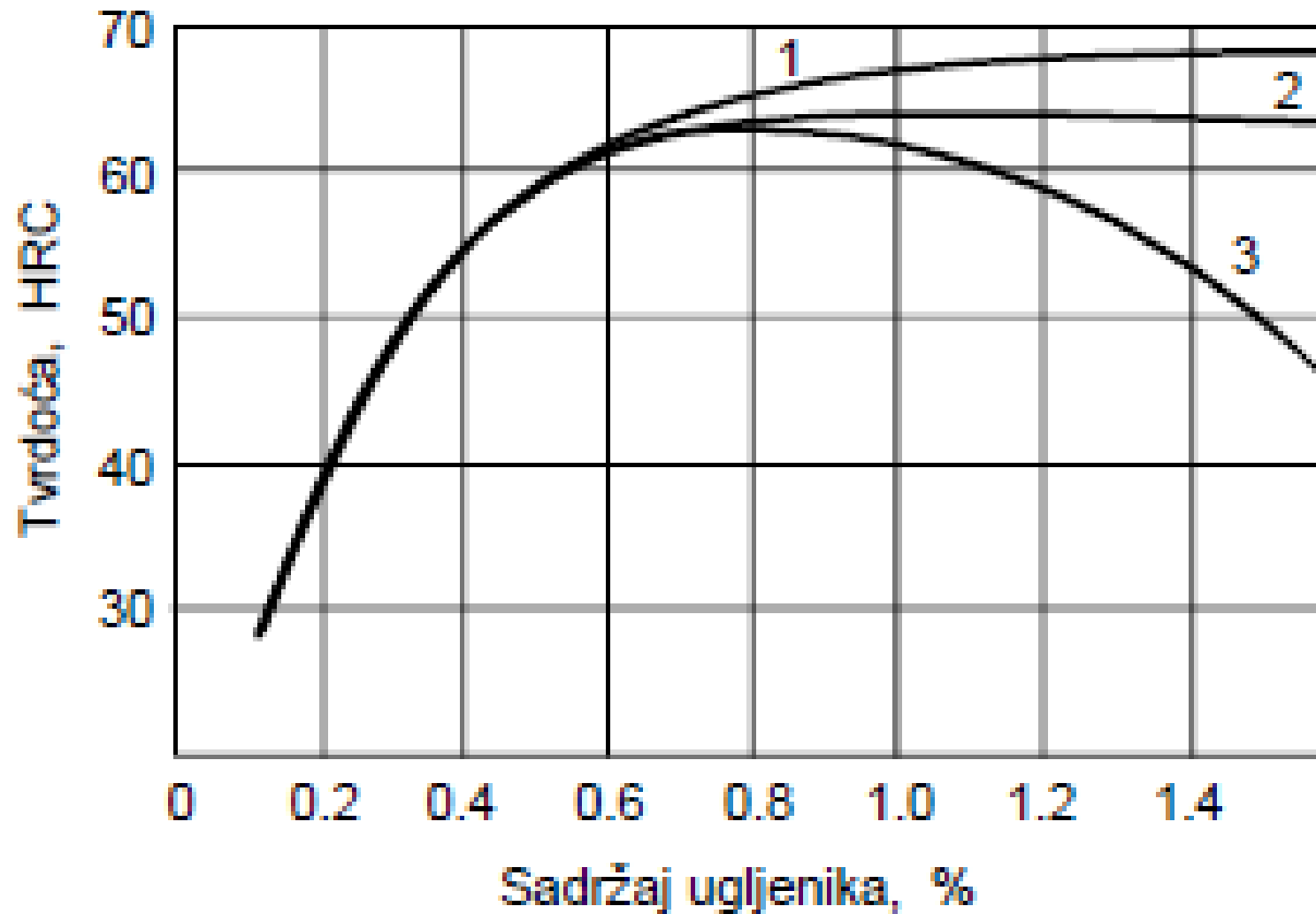
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning® is a trademark used herein under license.



Termokinetički dijagram



Tvrdoća martenzita u funkciji % C

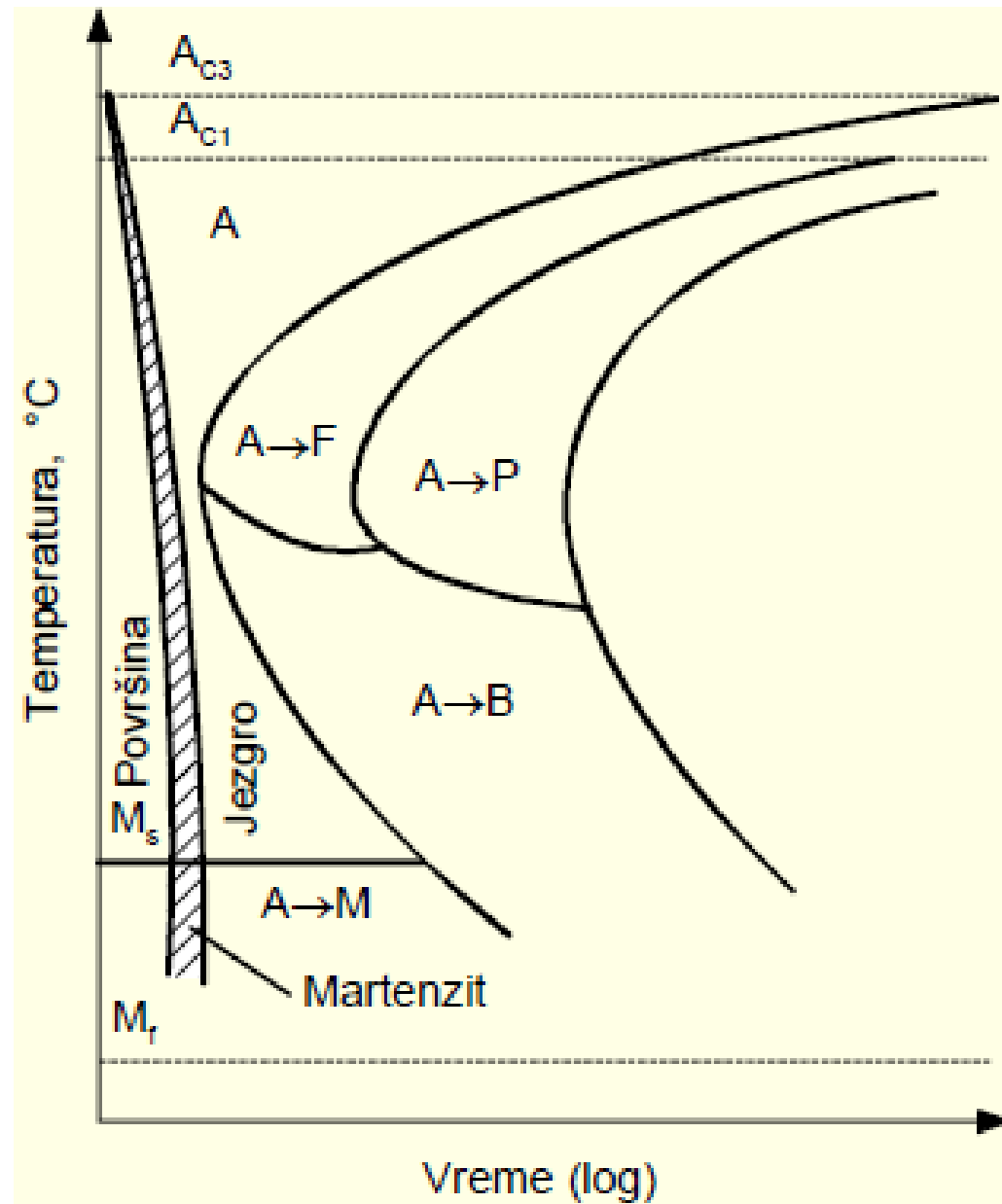


Vrste kaljenja

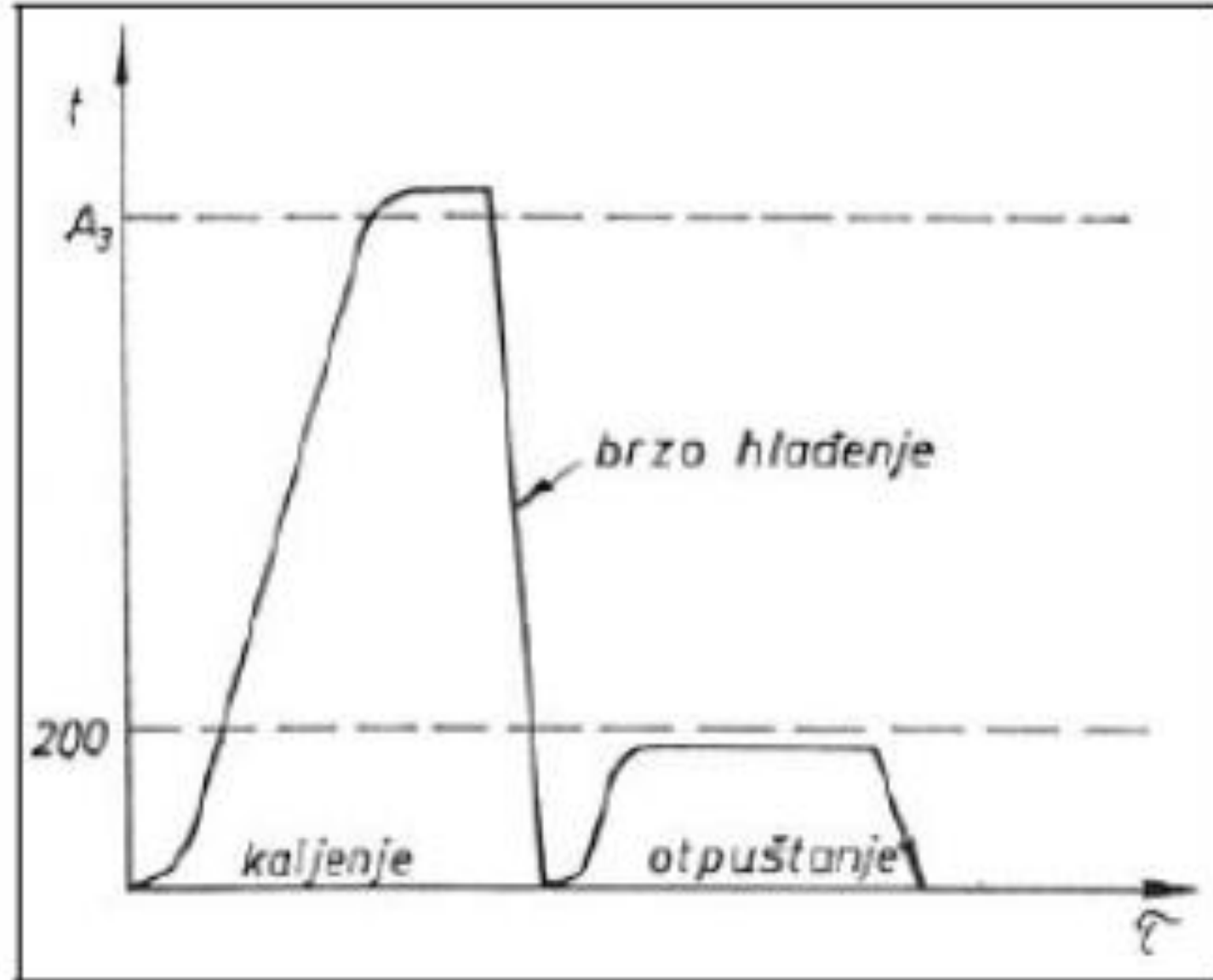
- Kontinuirano kaljenje - obično kaljenje: postupak kaljenja sa hlađenjem u jednom rashladnom sredstvu (voda, ulje) do potpunog hlađenja.
- Kaljenje u dva sredstva
- Stepenasto kaljenje
- Izotermalno kaljenje (sličan stepenastom kaljenju)
- Obrada čelika na niskim temperaturama

Kontinualno (obično) kaljenje

Izvodi se neprekidnim hladjenjem komada iz austenitnog područja do temperature ispod martenzitne promene M_s . Brzina hladjenja se bira tako da se spreči difuziona promena austenita sve do temperature martenzitnog preobražaja, gde on potpuno ili delimično prelazi u martenzit.

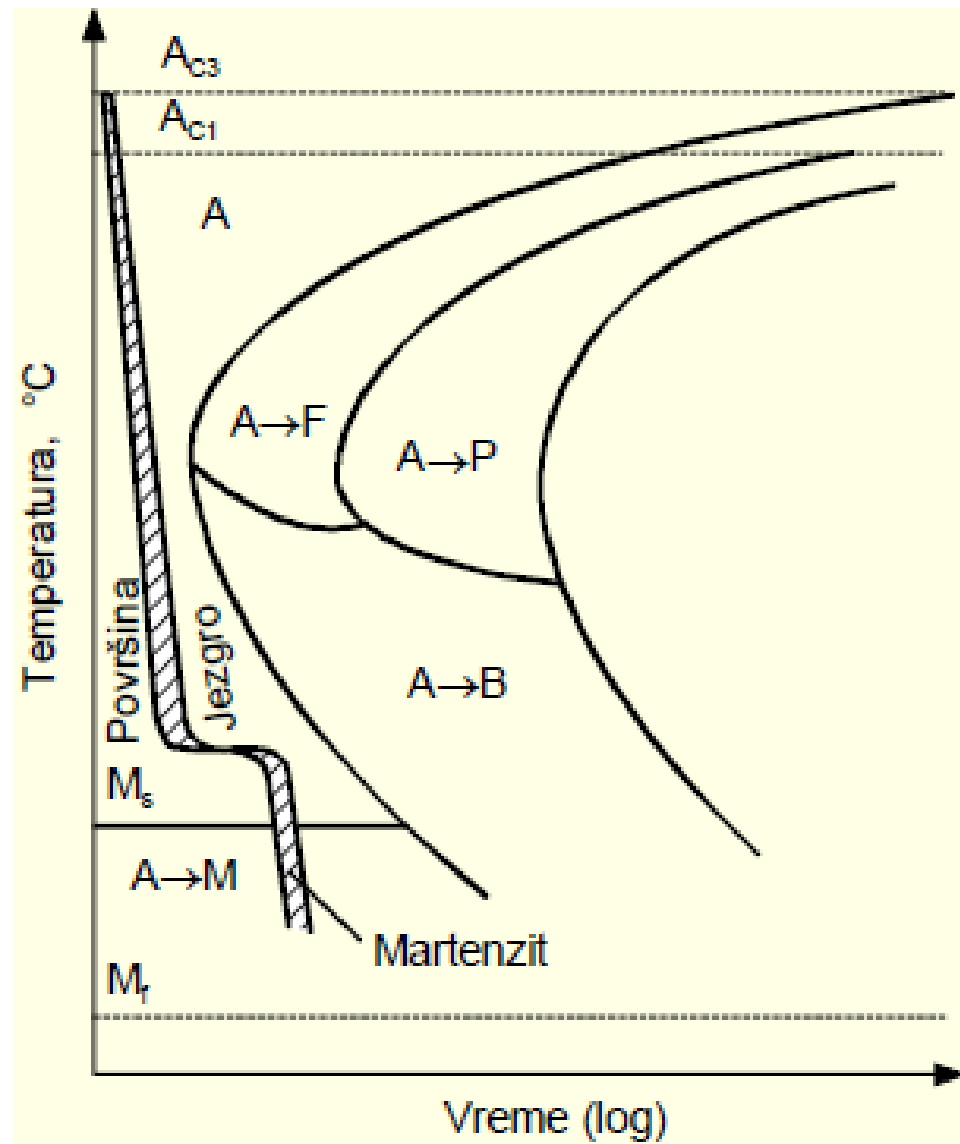


Kontinualno (obično) kaljenje

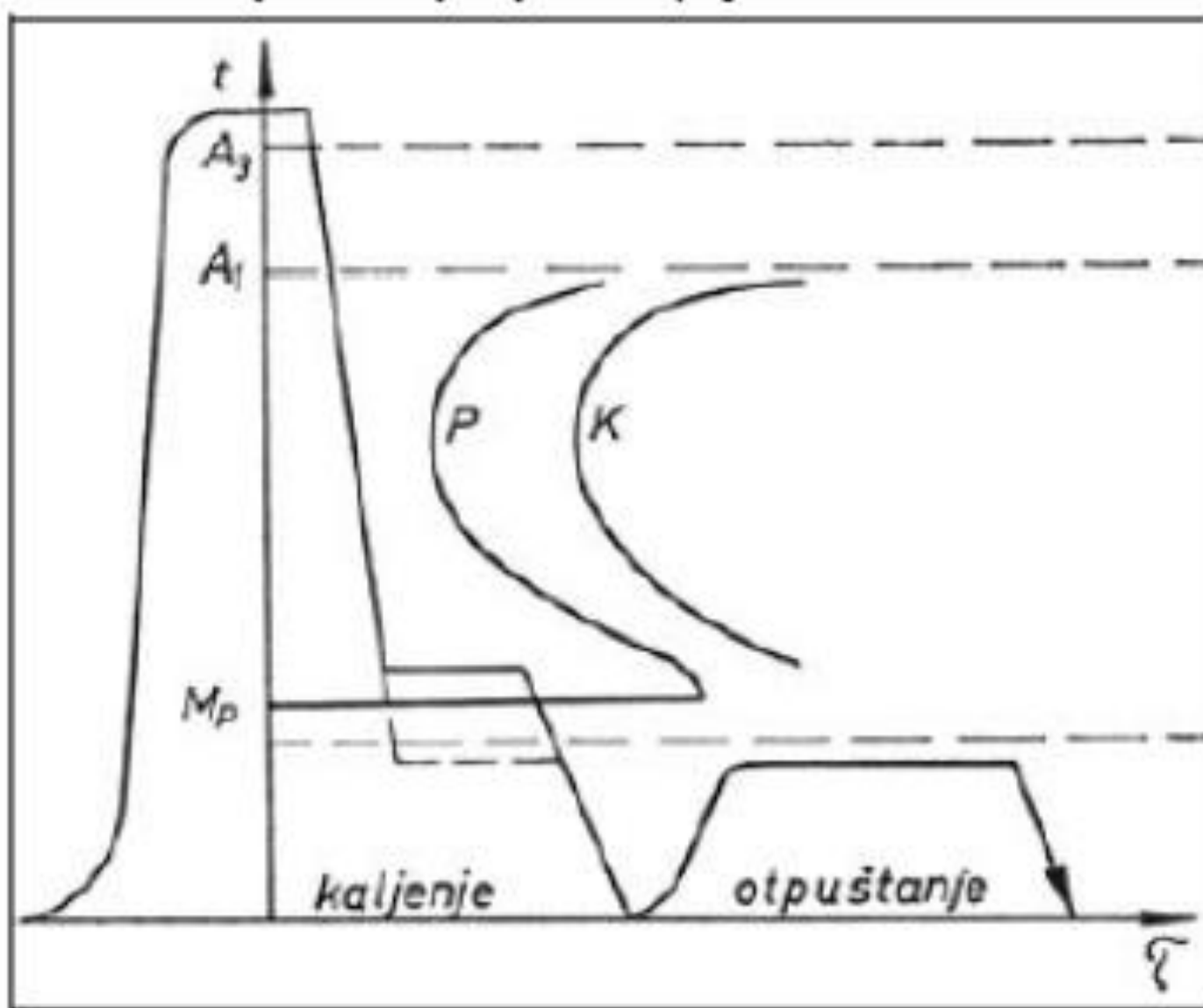


Stepenasto martenzitno kaljenje

- Primenjuje se kod ugljeničnih čelika tankih preseka (10-12 mm) ili malih prečnika 8-10 mm.
- Stepenastim kaljenjem smanjuju se unutrašnji naponi, deformacije i mogućnost pojave prslina.



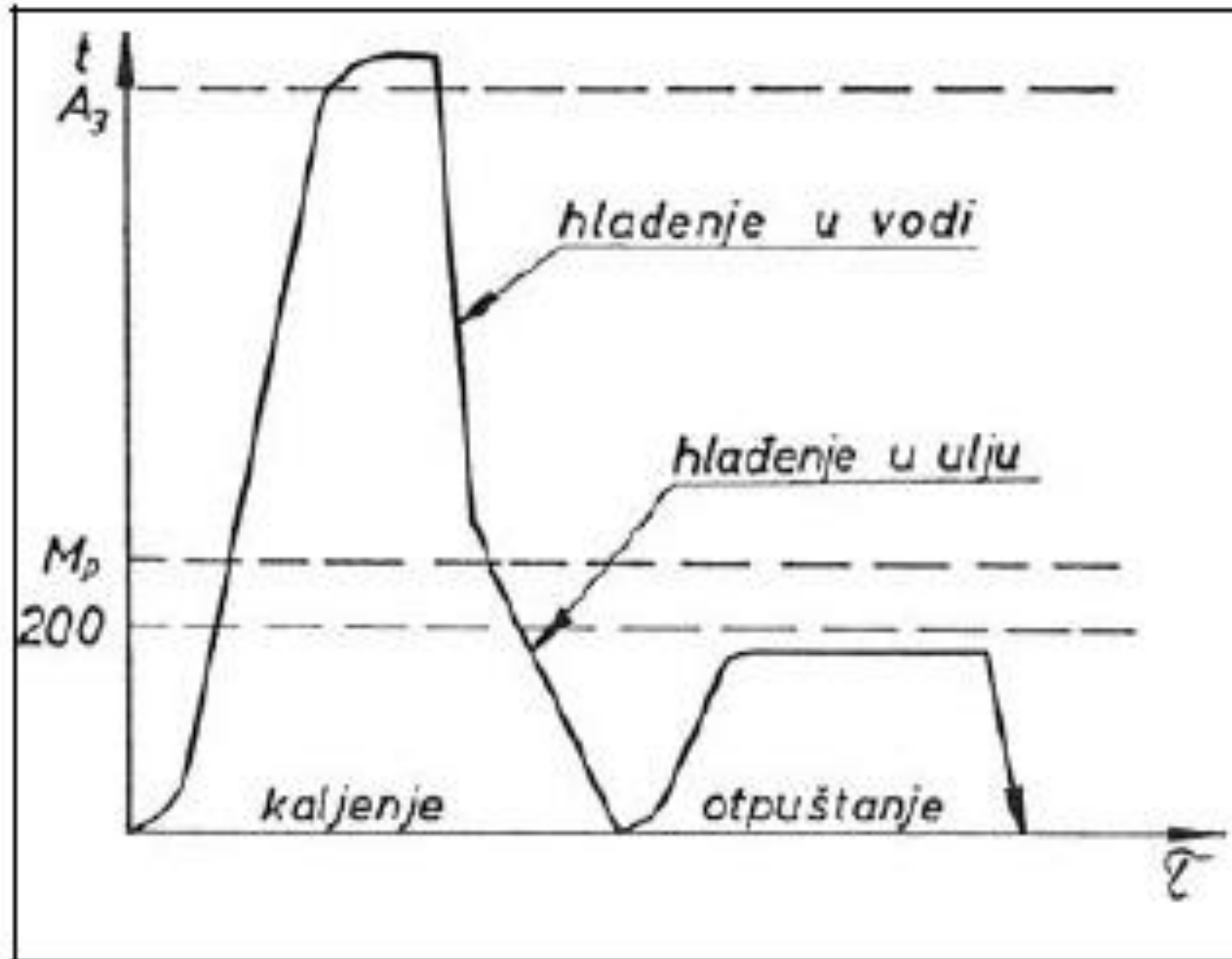
Stepenasto martenzitno kaljenje



Kaljenje u dve sredine

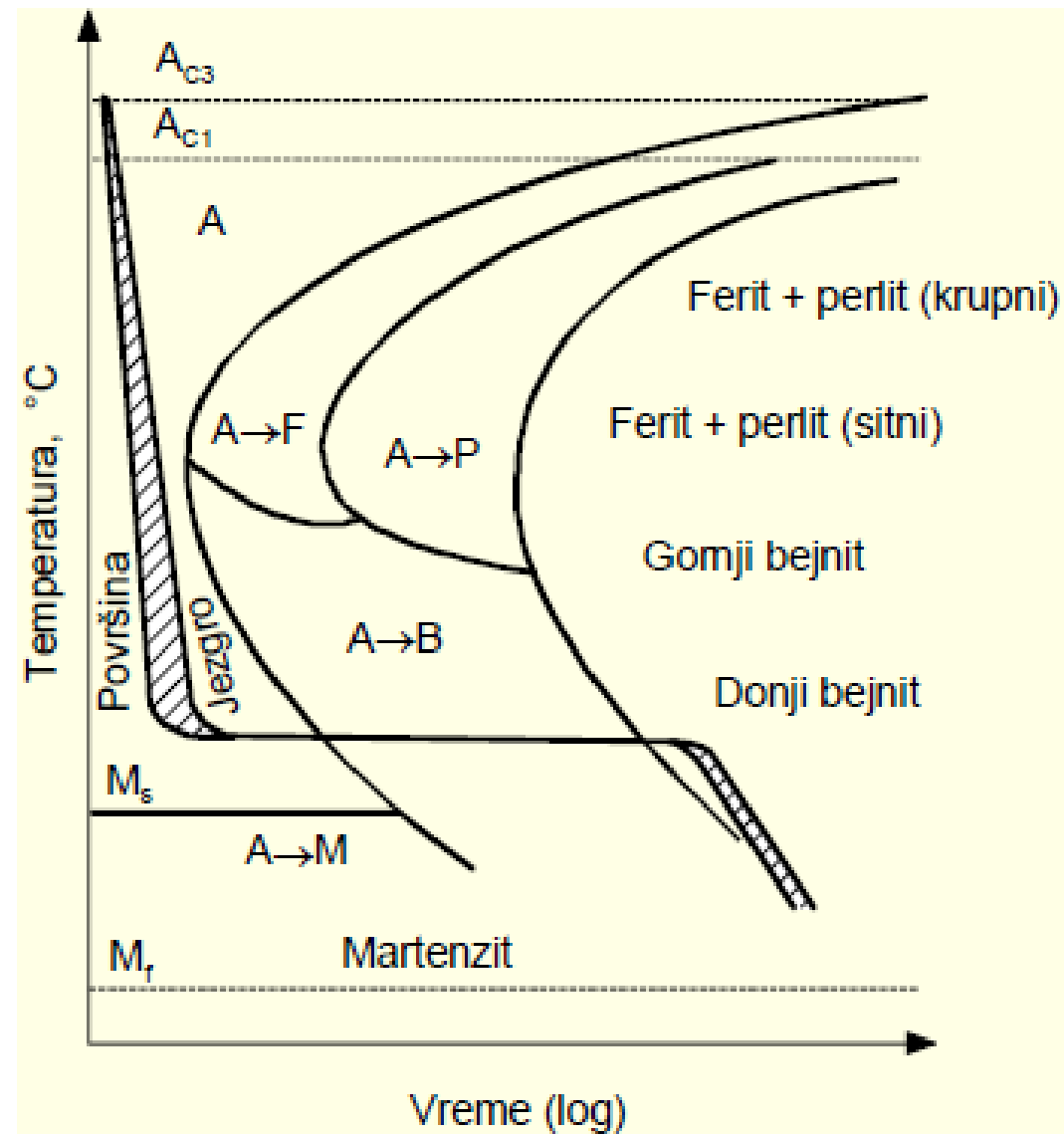
- Prekidno kaljenje, omogućuje da se deformacije delova pri kaljenju svedu na minimum, izbegnu prsline i dimenzijske greške.
- Prvo: velikom brzinom hlađenja u vodi, austenit je samo pothlađen i nije došlo do transformacija.
- Drugo: sa manjim brzinama hlađenja i tu nje manja opasnost od pucanja.
- Za delove složenog oblika i alatne čelike.
- Potrebno veliko iskustvo kalioaca.

Kaljenje u dve sredine

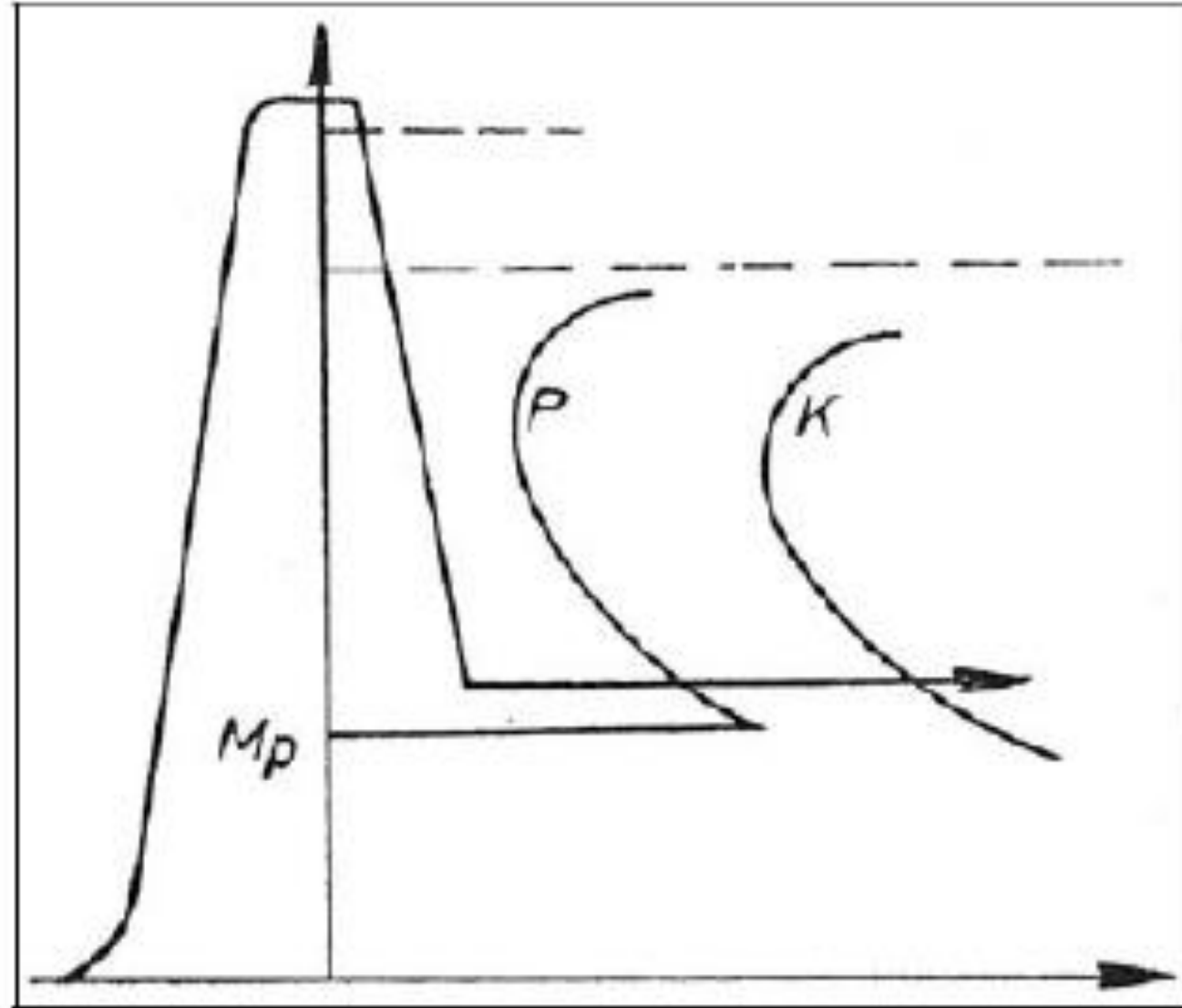


Izotermalno kaljenje

- Čelik beinitne strukture ima manju tvrdoću (40-58 HRC) od martenzitne, ali je znatno duktilniji (plastičniji) i žilaviji od čelika zakaljenog na martenzit i otpuštenog na istu tvrdoću.
- Izotermalno se kale uglavnom delovi malih preseka, izradjeni od ugljeničnih i niskolegiranih čelika.



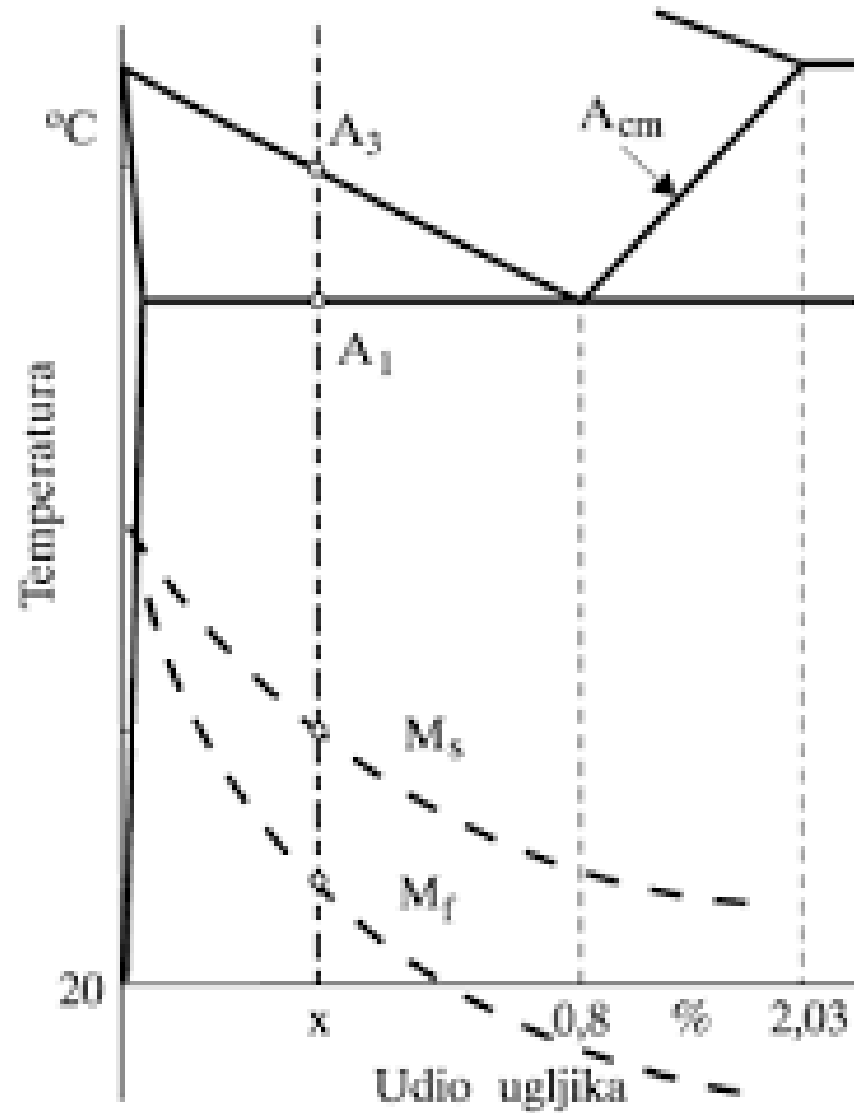
Izotermalno kaljenje



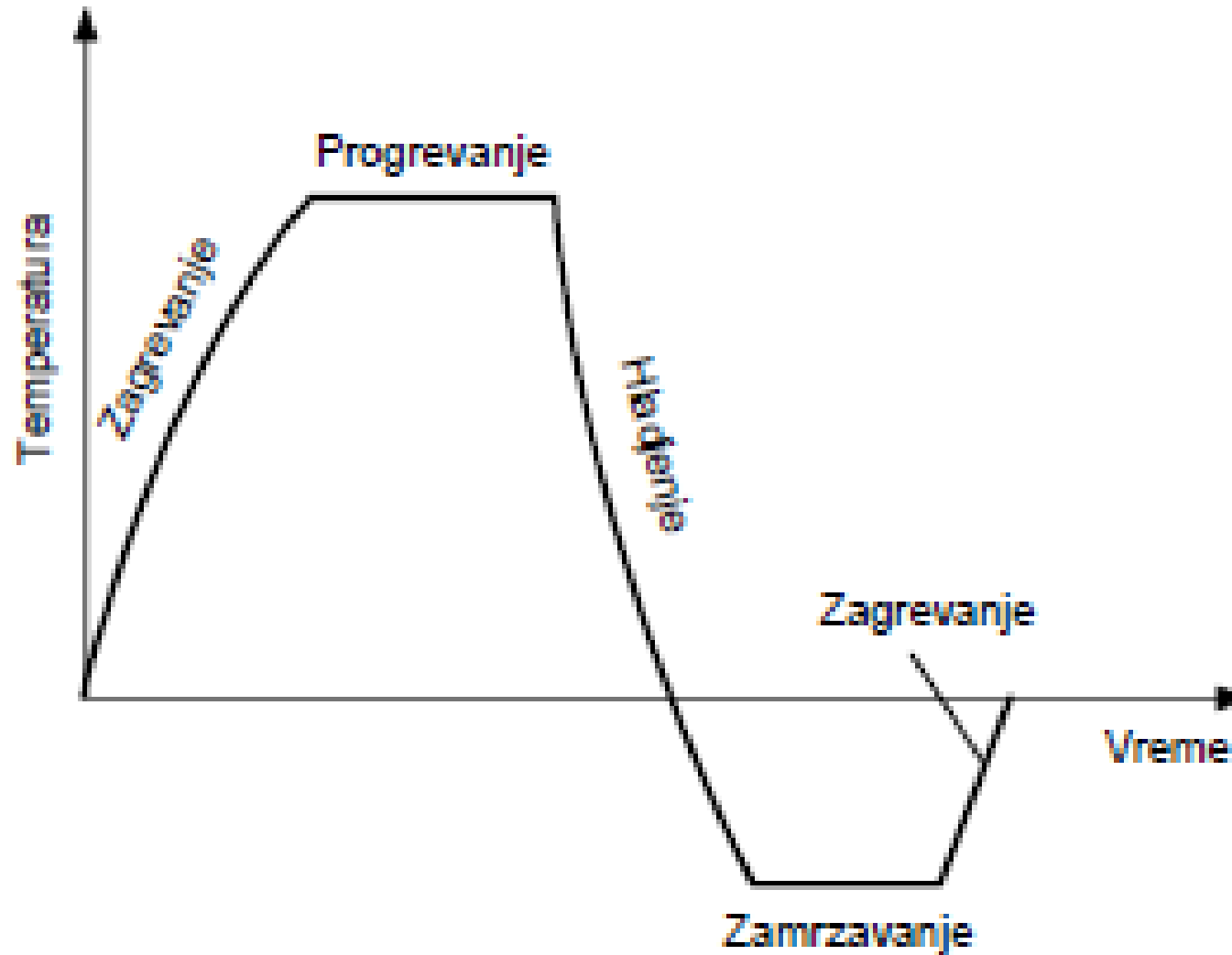
Kaljenje na niskim temperaturama

- Ponekad se u cilju transformacije zaostalog austenita, nastavlja sa hladjenjem ispod 0C, deo se zadržava na niskoj temperaturi ("zamrzava") i ponovo zagreva do sobne temperature
- Ovim postupkom postiže se odgovarajuće povećanje tvrdoće i bolja stabilizacija strukture, smanjuju se unutrašnji strukturni naponi i time umanjuje sklonost ka spontanoj promeni specifične zapremine u toku vremena (tzv. starenje), što je u nekim slučajevima veoma značajno. Na primer, pri izradi preciznih mernih alata potrebno je ostvariti dimenzijsku stabilnost, koja neće biti poremećena u toku vremena, pa se oni često kale na niskim temperaturama.

Duboko hlađenje ispod temperature završetka martenzitne transformacije



Kaljenje na niskim temperaturama

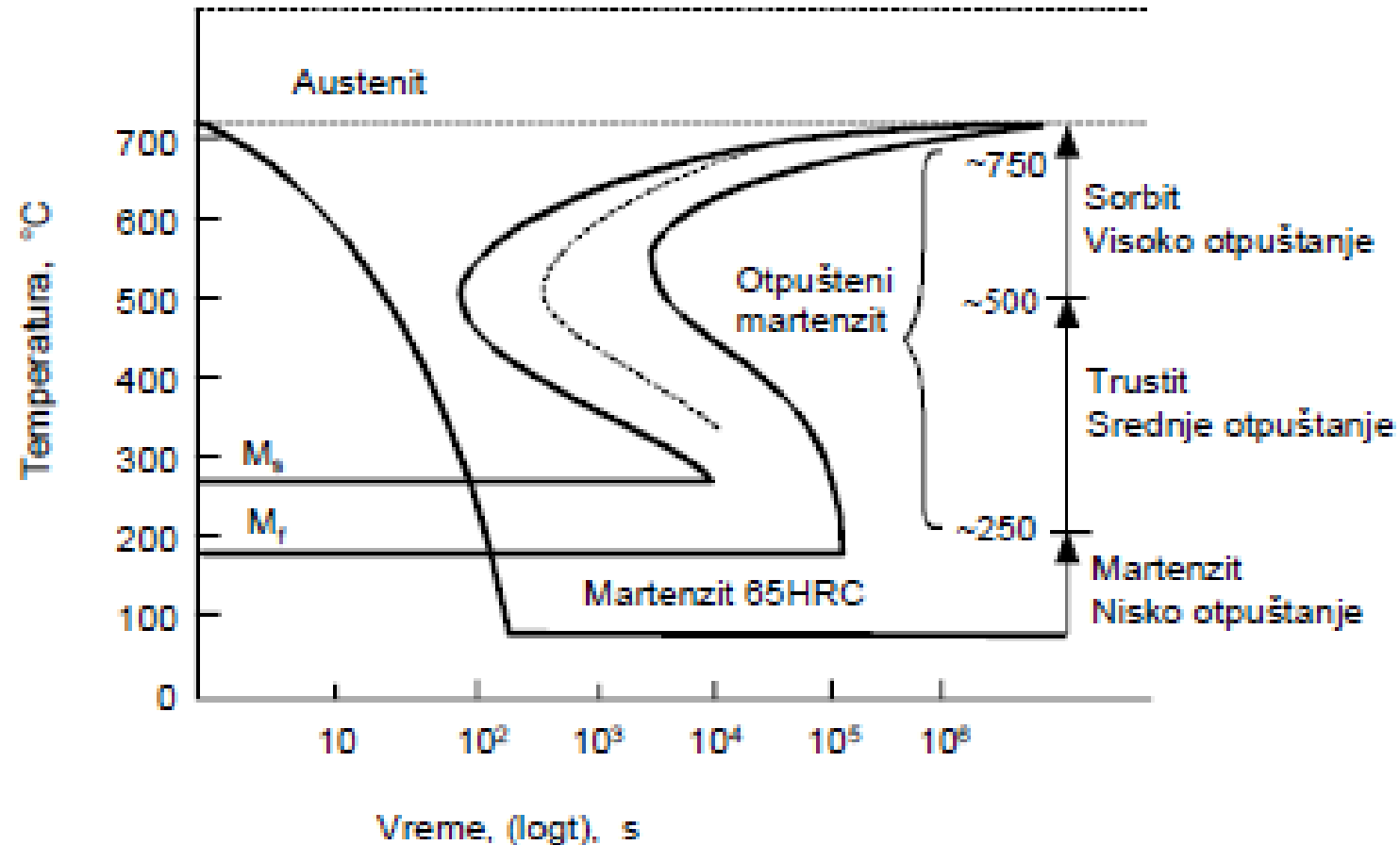


Otpuštanje

- Martenzit je suviše krt da bi se čelični delovi sa takvom strukturom mogli uspešno primeniti u mašinstvu. Osim toga, u njima zaostaju znatni unutrašnji naponi. Zato se uvek posle kaljenja, izvodi naknadno zagrevanje i sporo hladjenje - otpuštanje.
- Ako se okaljeni (zakaljen) čelik zagreva, aktivira se difuzija atoma, posebno ugljenika, utoliko više, ukoliko je temperatura zagrevanja viša i duže vreme držanja na toj temperaturi. Ovakav proces termičke obrade, tj. naknadnog zagrevanja do ispod kritične temperature A_1 , držanja kraće vreme na toj temperaturi i zatim laganog hladjenja (na primer, na mirnom vazduhu), naziva se otpuštanje.

Zavisno od temperature zagrevanja pri otpuštanju ugljeničnih čelika, razlikuju se:

- nisko,
- srednje i
- visoko otpuštanje.



KALJENJE ALATNIH ČELIKA

KALJENJE ALATNIH ČELIKA

- Osobine kaljene strukture zavise od sadržaja legirajućih elemenata rastvorenih u austenitu pre kaljenja (početka hlađanja). Legirajući elementi mogu da formiraju različite karbide, ponekad i veoma složene, koji sadrže više legirajućih elemenata istovremeno. Neki se razlažu već pri zagrevanju iznad A_3 temperature, neki tek pri temperaturama oko 1000°C , poneki su stabilni i do 1250°C , ali postoje i primarni karbidi (na primer kod brzoreznih čelika) koji se ne rastvaraju pri zagrevanju za kaljenje.

Glavne osobine alata, u zavisnosti od radnih uslova:

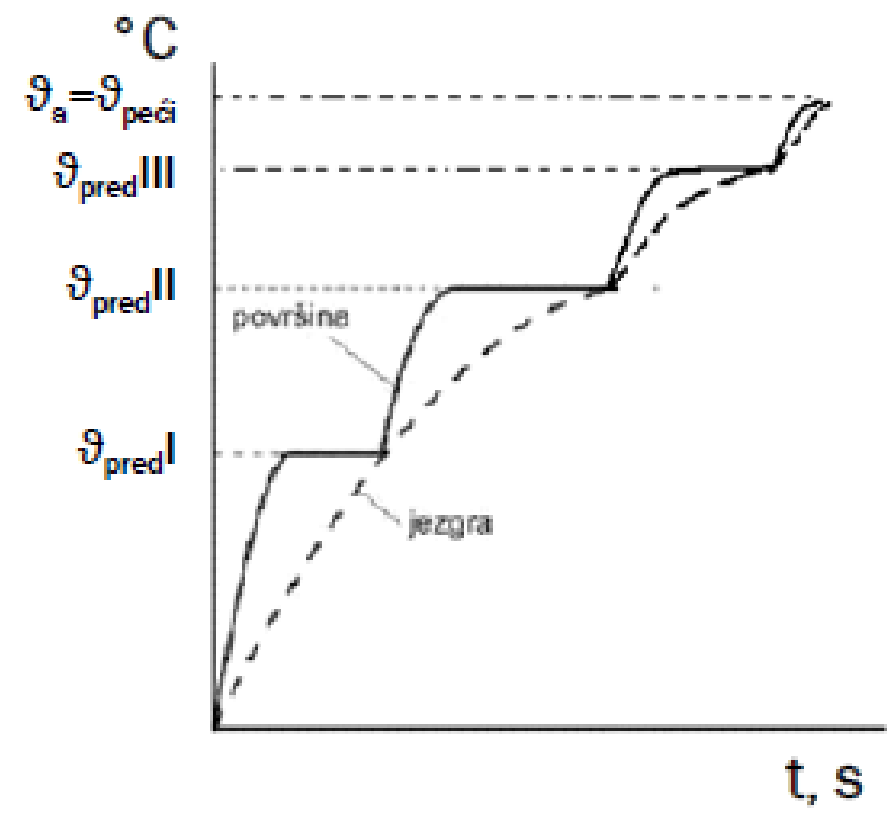
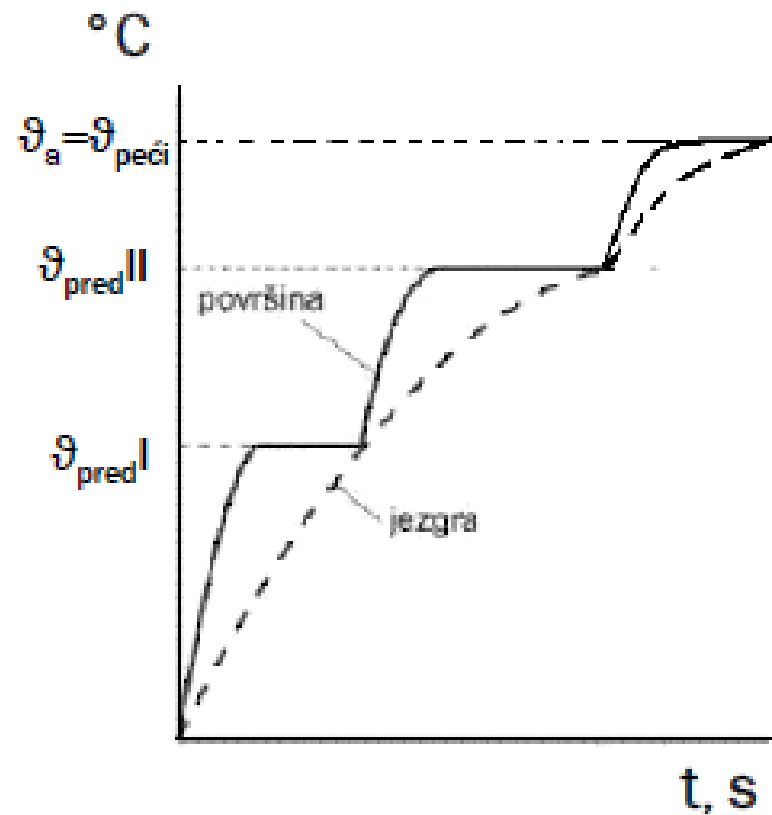
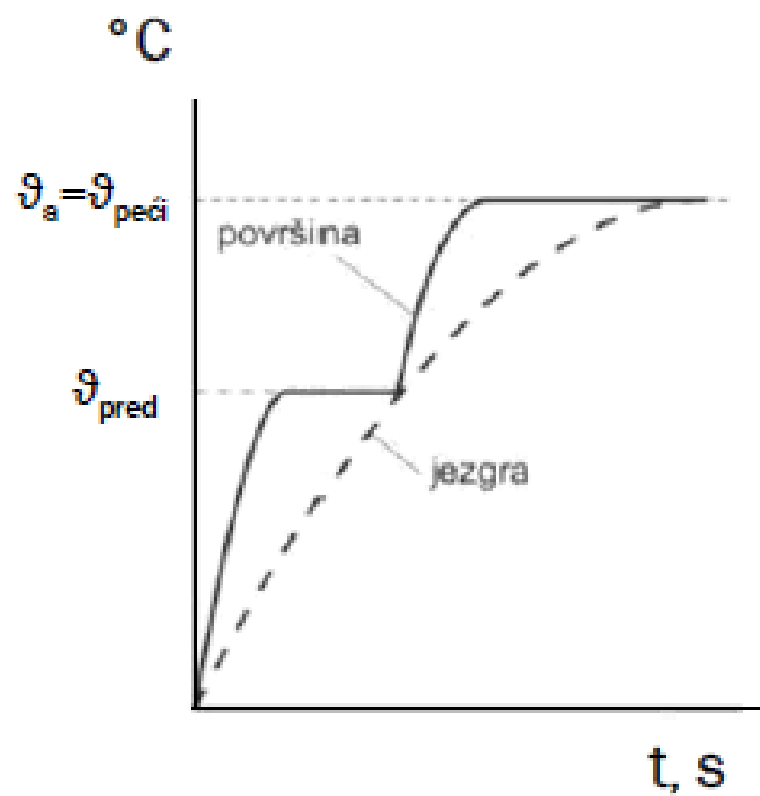
- 1. Mehaničke**
- 2. Habanje**
3. Hemijska postojanost
4. Toplotna postojanost
5. Tehnološke osobine

Kaljenje ugljeničnih alatnih čelika

- Najstariji alatni nčelici. Radna sposobnost se zasniva na tvrdoći martenzita, a samo malim delom zbog prisustva cementita. Zbog toga se primenjuje samo za radne temperature $<200^{\circ}\text{C}$, zbog efekta otpuštanja.
- Primena za rad na hladno i za rezanje manjim brzinama.
- Tvrdoća se lako postiže na vrlo tankim oštricama finih alata. Tvrdoća raste do 0.8%C. Iznad toga nastaje mrežasti cementit.
- Fenomen žilavosti ovih čelika mogu se pripisati maloj prokaljivosti, koja se postiže malim sadržajem Si i Mn, tako da se martenzitna struktura dobija samo na površini, a dublje su prelazne strukture pa čak i perlit.

Alatni čelici

- Isporučuju se u meko žarenom stanju i preporučuje se stepenasto zagrevanje, a na temp. kaljenja da bude što manje, zbog krupnoće zrna.



Otpuštanje ugljeničnih alatnih čelika

- Temperatura otpuštanja zavisi od zahteva alata i pravi se kompromis između tvrdoće i žilavosti.
- Vršiti se raspad tetragonalnog martenzita, zaostalog austenita i smanjuju se zaostali naponi.

100-130°C: ↗ otpornost na habanje (malo dinamički opterećeni)-merni alati.

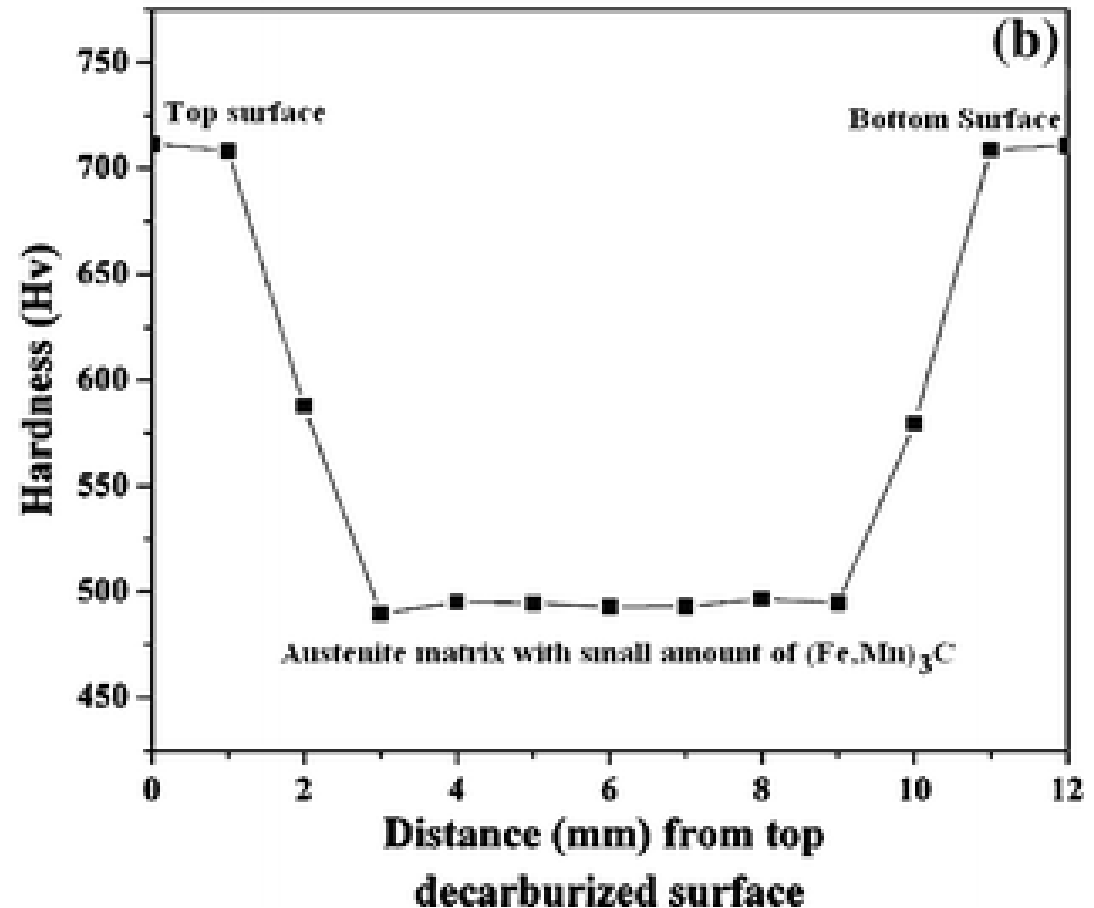
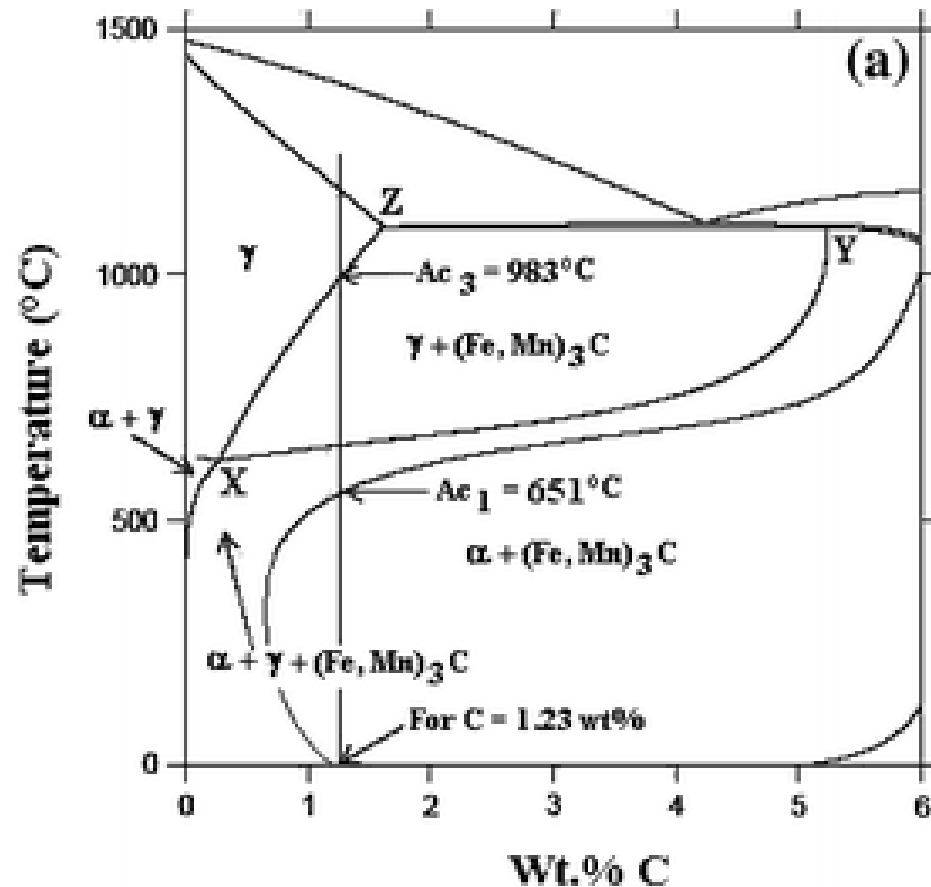
150-180°C: ↘ udarna opterećenja (61-63HRC)- alati za presovanje.

200-240°C: ↗ žilavost i udarno opterećenje (<58HRC)-alati za presovanje mekših materijala.

- Vreme otpuštanja 30-60min, u zavisnosti od zahteva.
- Ako ima brušenja, još 30-60min, radi nastalih napona

KALJENJE AUSTENITNIH ČELIKA (Gašenje)

- Hadfieldov čelik (12-14%Mn, 1,2—1,4%C)
- Dobar čelik za rad u abrazivnim sredinama, što omogućava austenitna struktura.



- U sirovim odlivcima koji sadrže veliki % karbida javlja se izlučeni karbid po granici zrna. Količina i oblik karbida zavise od %C i uslova hlađenja odlivka.
- Sirov odlivak ima malu žilavosti može pukne pri udaru i zato je nepovoljan za primenu. Popravljanje mehaničkih osobina postiže se kaljenjem koje ima za cilj fiksiranje austenitne strukture.

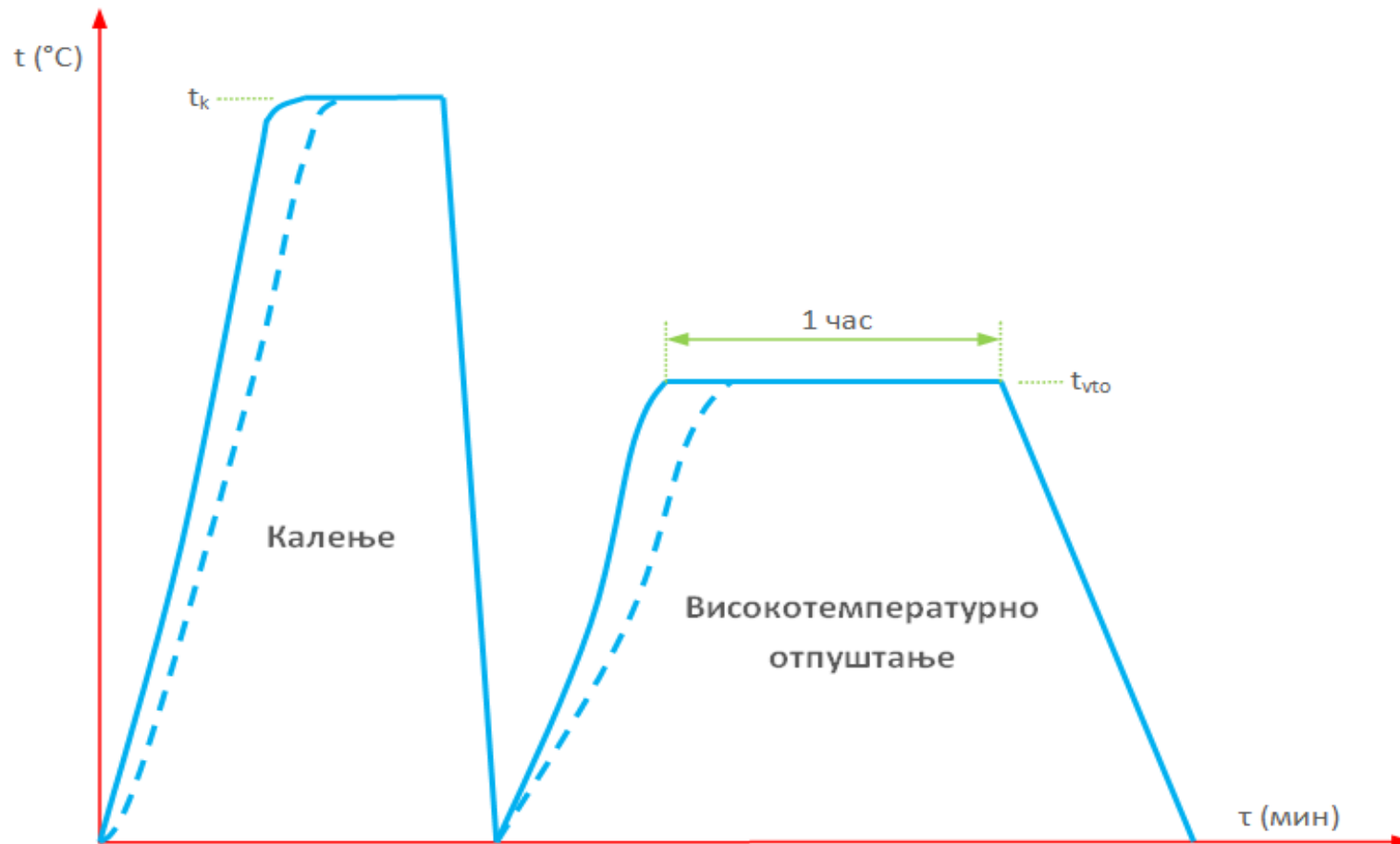
	Pre livenja	Posle livenja
Zatezna čvrstoća kp/mm^2	40-60	80-100
Žilavost kp/mm^2	1-3	20-30
Tvrdoća HB (kp/mm^2)	200-300	170-230

- Temp.kaljenja se bira iznad A3, jer je svrha rastvaranje cele količine ugljenika u austenitu.
- Temp.kaljenja manganskog čelika je 1050-1100°C.
- Zagrevanje je 2-4 sata. λ je 3-5 puta manji nego kod običnog čelika.
- Rastvorereni karbidi oko zrnaca koče porast austenitnog zrna i ono ostaje malo.
- Kaljenje je u vodi, nema otpuštanja i struktura ostaje čist austenit.

POBOLJŠAVANJE

Kombinovani postupak poboljšavanja

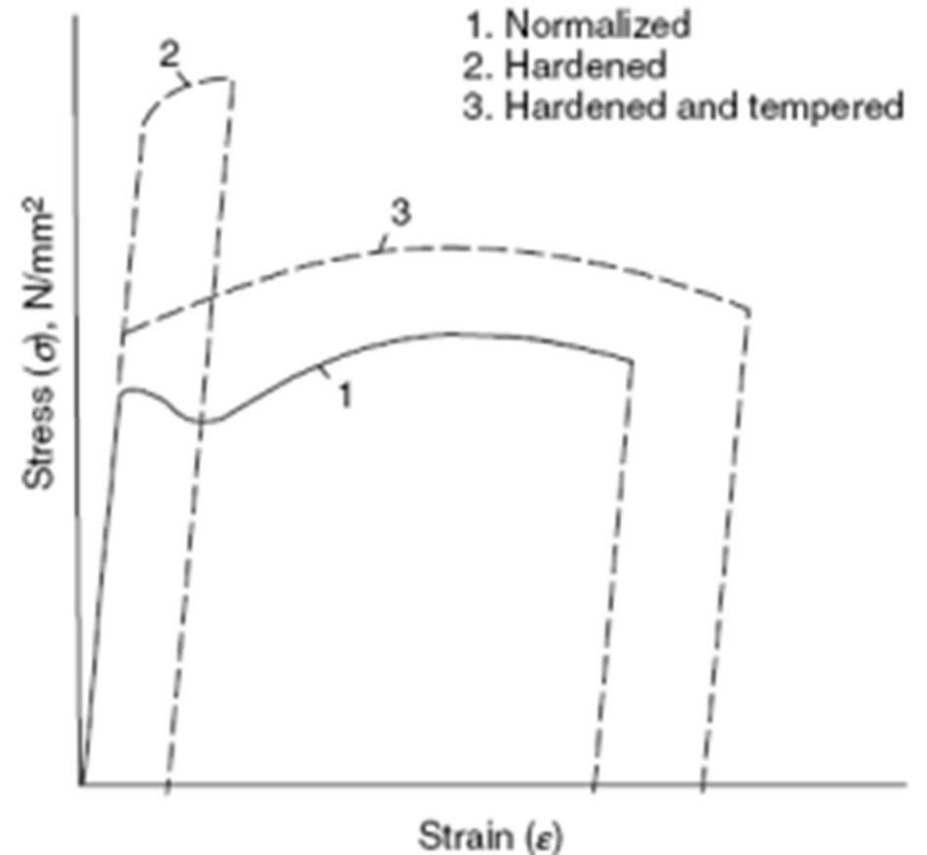
Poboljšavanje predstavlja jednu od najznačajnijih vrsta termičke obrade čelika. Najčešće se izvodi u vidu kombinovanog postupka, pri čemu se nakon kaljenja vrši visokotemperaturno otpuštanje, sa ciljem stvaranja nekog od prelaznih oblika strukture (sorbit, trustit) ili izotermalnom transformacijom austenita u beinit.



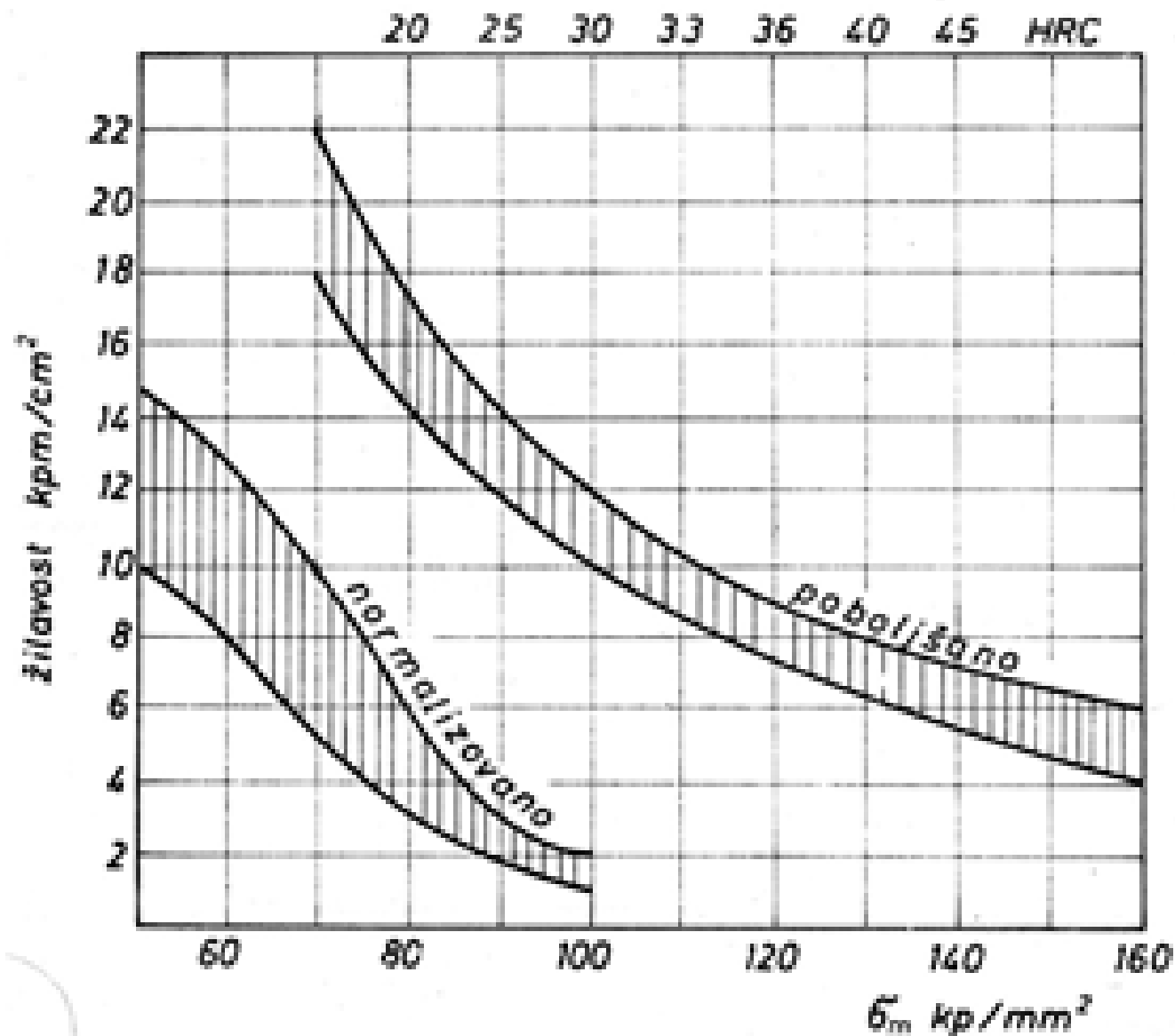
- Postupkom poboljšavanja se postižu više mehaničke osobine nego normalizacijom, što znači viša zatezna čvrstoća R_m i granica razvlačenja R_p , te se postupak koristi u mašinstvu za odgovorne opterećene delove.
- Kod poboljšavanja nesrazmerno više raste R_p od R_m , što je cilj u konstrukcijama.

$$\eta = \frac{R_p}{R_m} 100$$

kriva napon - deformacija čelika



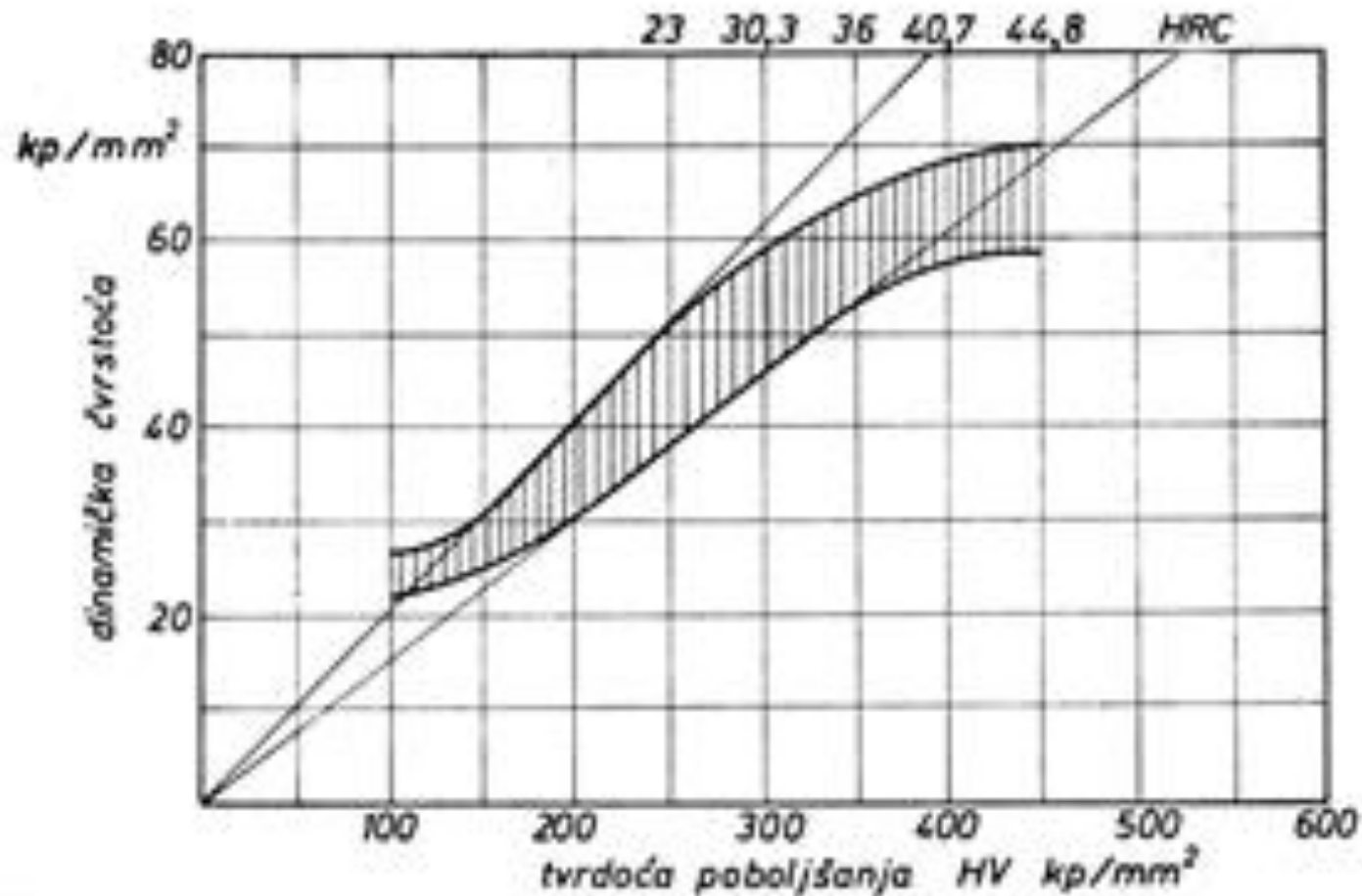
Odnos čvrstoće i žilavosti nakon normalizacije i nakon poboljšavanja



Dinamička čvrstoća

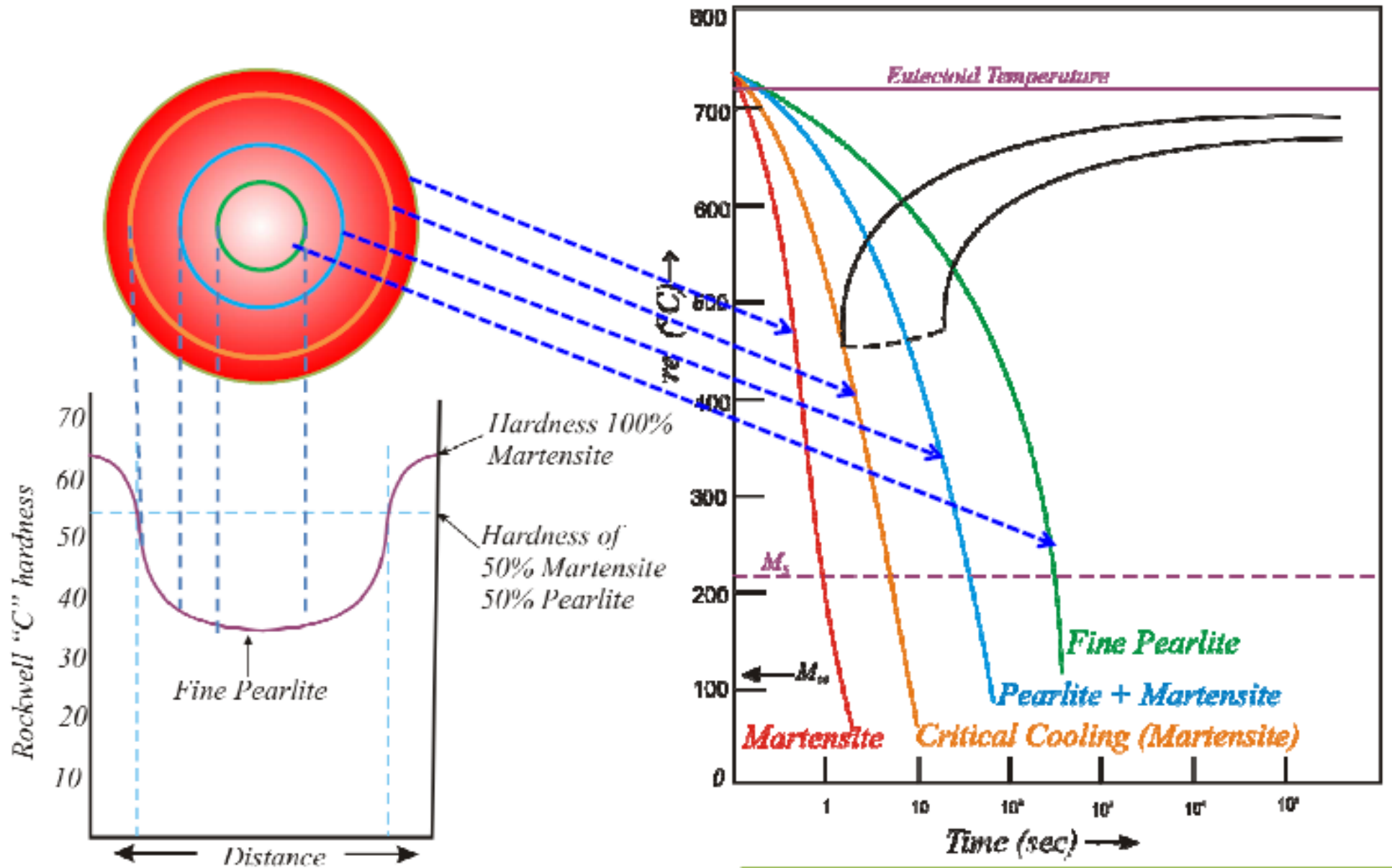
- Pored tvrdoće i statičke čvrstoće, nakon poboljšavanja dolazi do povećanja **dinamičke čvrstoće**, zbog čega se poboljšani delovi najčešće koriste u dinamički opterećenim konstrukcijama. Kolika će tvrdoća da se ostvari nakon poboljšavanja zavisi od tvrdoće nakon kaljenja. Najveća tvrdoća nakon kaljenja postiže se kada se u strukturi nalazi 100% martenzita. Ova tvrdoća naziva se kaljivost, a najviše zavisi od sadržaja ugljenika u čeliku.
- Često se u industrijskoj praksi prave greške pri izboru poboljšavanja kao termičkog tretmana. Naime, zapostavlja se veoma važna osobina kaljenja, a time i poboljšavanja, a to je da se konkretan radni predmet može okaliti, tj. poboljšati samo do određene mere.

- Poboljšavanje ima uticaj na dinamičku čvrstoću jer dinamička čvrstoća raste sa porastom statičke čvrstoće. σ_D u poboljšanom stanju ne zavisi od vrste čelika već samo od tvrdoće poboljšavanja (slika). Presek koji možemo poboljšati zavisi od legirajućih elemenata, a tvrdoća od %C. Oblik krive važi za sve dinamičke čvrstoće (zatezanje, savijanje, uvijanje).

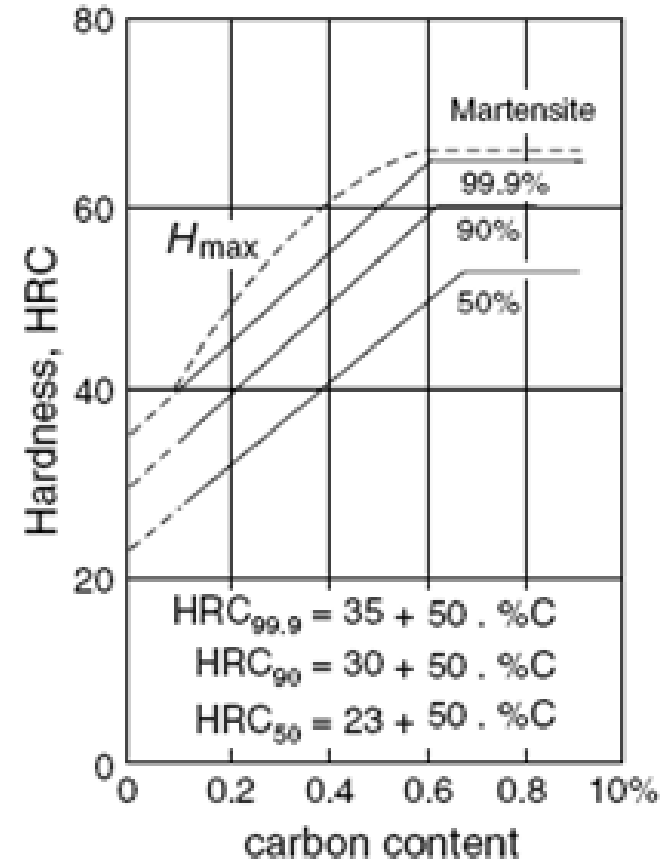
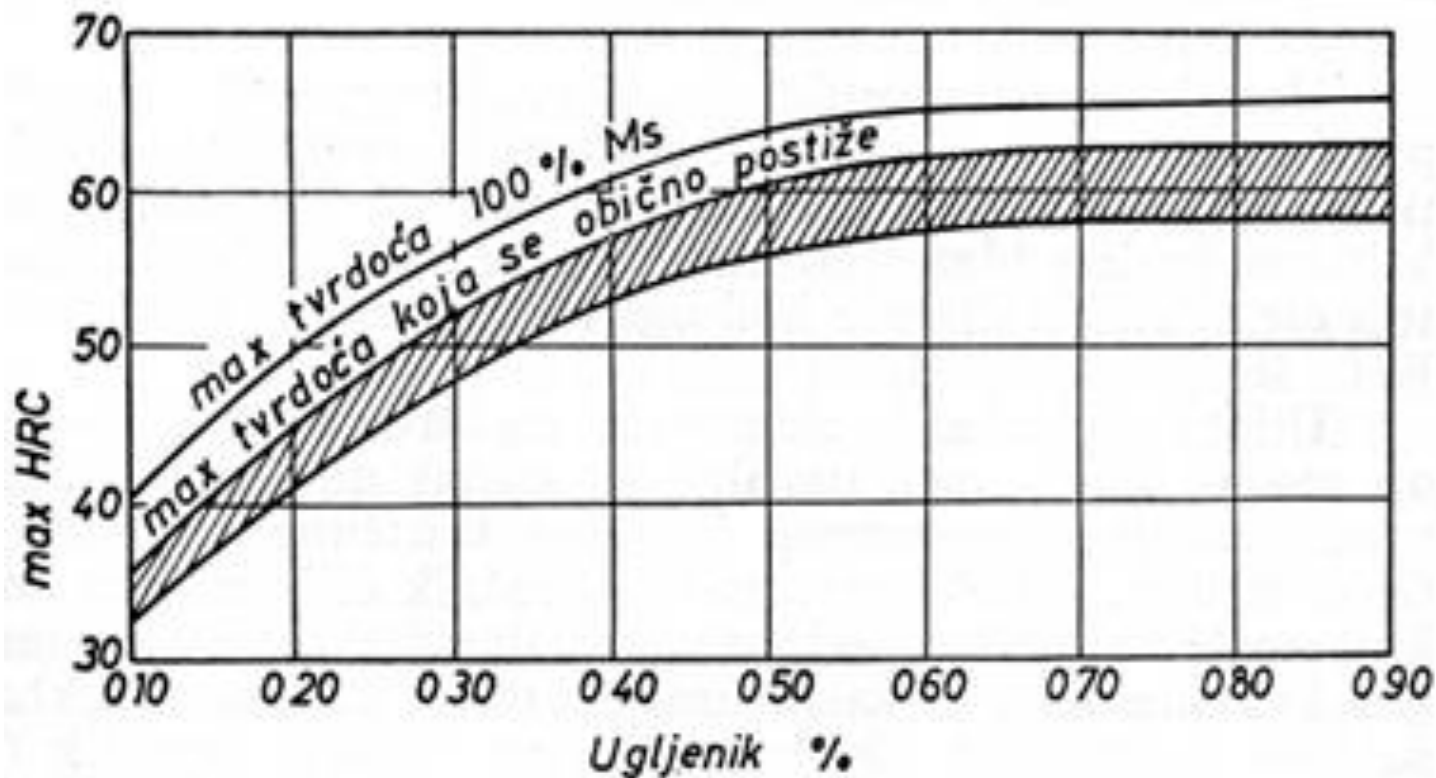


Zavisnost zatezne dinamičke čvrstoće od tvrdoće poboljšavanja

Profil tvrdóce kod cilindra



- Najveća tvrdoća nakon kaljenja postiže se kada se u strukturi nalazi 100% martenzita. Ova tvrdoća naziva se **kaljivost**, a najviše zavisi od sadržaja ugljenika u čeliku.
- Odnos najveće tvrdoće pri 100 % martenzita prema ostvarivim tvrdoćama koje se najčešće postižu i približan odnos između tvrdoće i procenta ugljenika za razne procenete martenzita



Izbor čelika za poboljšavanje

- Pri izboru čelika za određeni radni predmet i usvajanju poboljšavanja kao vida termičke obrade potrebno je imati u vidu gore navedeno, tj. da osobine po preseku komada zavise od prokaljivosti.

a) Provera prema čvrstoći

- Proverava se da li određeni čelik uopšte može da postigne traženu čvrstoću. Vršiti se provera prema dinamičkoj čvrstoći. Kako čvrstoća najviše zavisi od udela ugljenika određuje se koliko ugljenika treba da sadrži čelik da bi postigao traženu čvrstoću. Za tu svrhu koristi se sledeći izraz:

$$\%C = (0.00083 \sigma_{Ds} + 0.1667)^2$$

- gde je: σ_{Ds} - dinamička čvrstoća u Mpa

- Dobijena neophodna količina ugljenika upoređuje se sa donjom vrednošću udela ugljenika kod razmatranog čelika.
- Kako bi se postigla određena dinamička čvrstoća mora se ostvariti odgovarajuća tvrdoća nakon poboljšavanja (H_p u HRC):
- Za postizanje određene tvrdoće nakon poboljšavanja zahteva se odgovarajuća tvrdoća nakon kaljenja (H_k u HRC):
- Zavisnost tvrdoće kaljenja od procenta gljenika u čeliku data je izrazom:

$$\sigma_{Ds} = 10H_p + 200 \text{ (Mpa)}$$

Zahtevana tvrdoća nakon poboljšavanja dobija se ukoliko je tvrdoća posle kaljenja dovoljna. Potrebna tvrdoća nakon kaljenja određuje se iz izraza:

$$H_k = 35 + 0.5H_p \text{ HRC}$$

- Zavisnost tvrdoće kaljenja od procenta ugljenika u čeliku data je izrazom:

$$H_k = 60\sqrt{\%C} + 15$$

b) Provera prema prokaljivosti

Nakon što se utvrdi da u čeliku ima dovoljno ugljenika da bi se uopšte postigla zahtevana čvrstoća, proverava se da li se ta čvrstoća može postići na željenoj dubini. U tu svrhu koristi se formula H. Justa:

$$Hk = 95\sqrt{C} - 0.00276J_{50}^2\sqrt{C} + 20Cr + 38Mo + 14Mn + 5.5Ni + 6.1Si + 39V + 96P - 0.81K - 12.28\sqrt{J_{50}} + 0.898J_{50} - 13$$

gde su:

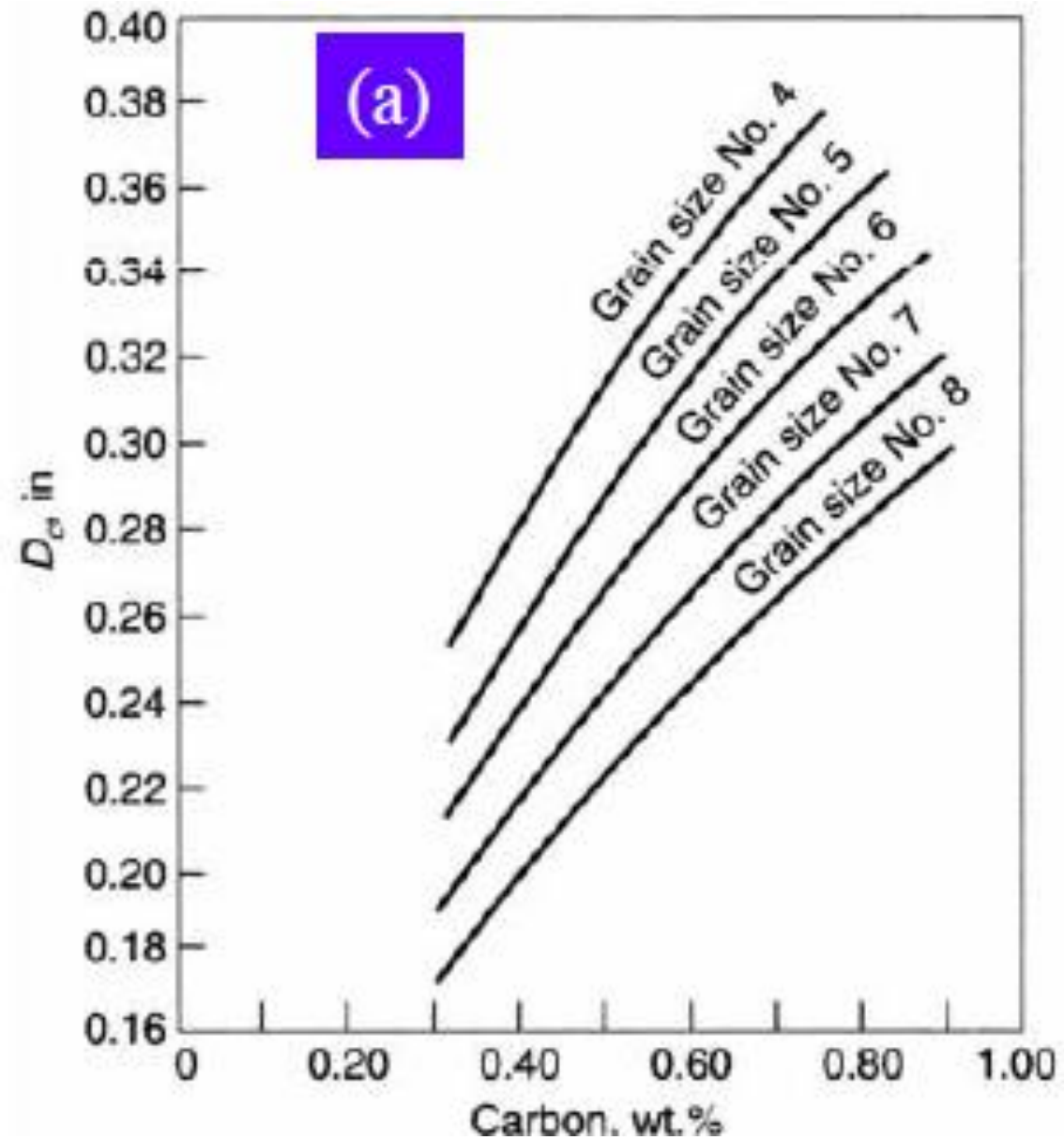
C, Cr, Mo, Mn, Ni, Si, V i P - srednji udeli hemijskih elemenata.

K - krupnoća zrna

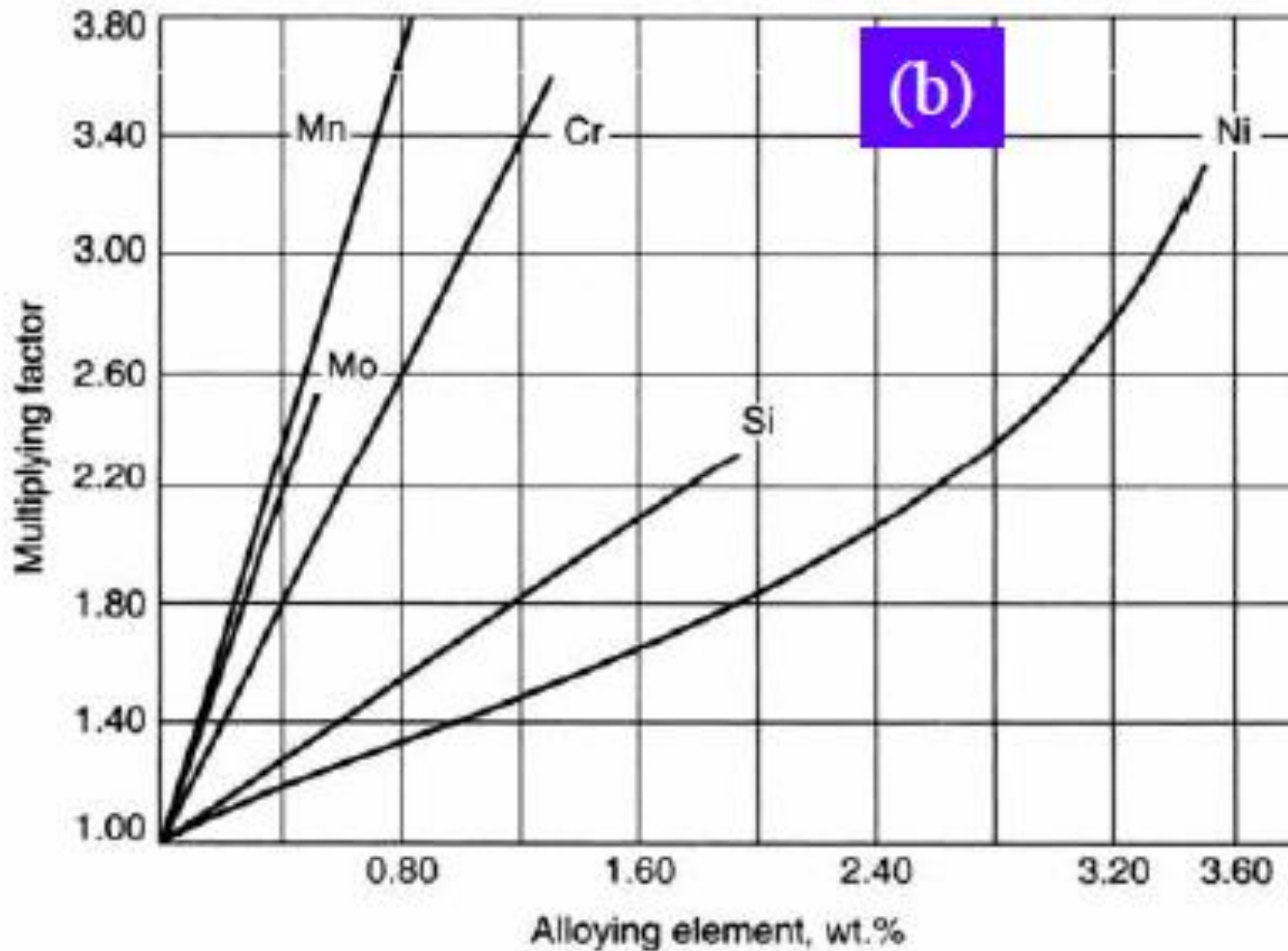
J₅₀ - prokaljivost prema Džominiju.

Vrednost "Hk" upoređuje se sa zahtevanom tvrdoćom nakon kaljenja koja je određena. Ukoliko je tvrdoća manja od zahtevane tvrdoće čelik ne može da postigne zahtevanu čvrstoću na željenoj dubini i odbacuje se. U tom slučaju potrebno je izabrati neki drugi čelik koji se odlikuje većom prokaljivošću.

Kritični prečnik kao funkcija sadržaja ugljenika i krupnoće zrna



Uticaj legirajućih elemenata na prokaljivost



Ova funkcija je nastala regresionom analizom eksperimentalnih podataka.

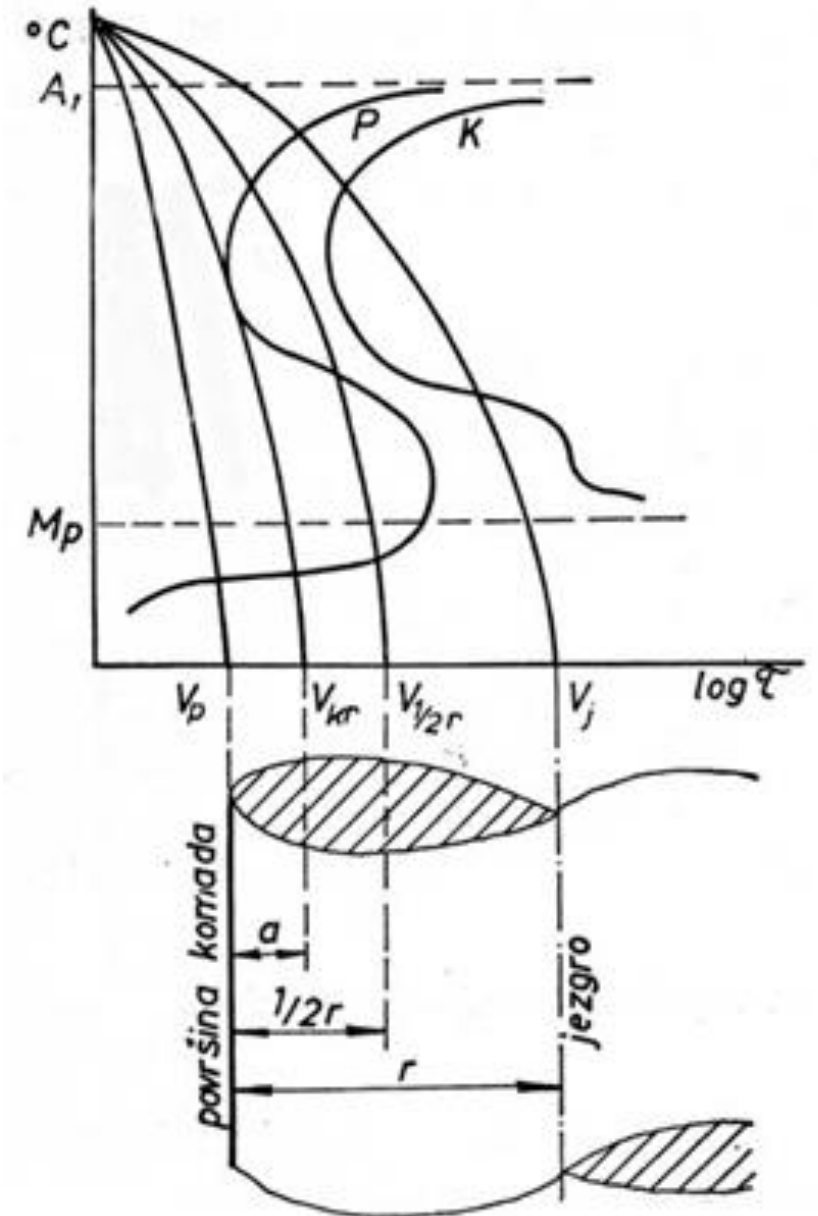
- Legirajući elementi Ni, Cr, W, Mn snižavaju kritičnu brzinu kaljenja i povećavaju prokaljivost. Co povećava kritičnu brzinu i snižava prokaljivost. Skala efikasnosti legirajućih elemenata kojom utiču na cenu čelika i njegovu prokaljivost

Ni	V	Mo	Si	Cr	Mn
1.14	1	0.57	0.26	0.11	0.08

- Najjeftiniji je Mn i od njega treba poći pri izboru.

Šema različitih brzina hlađenja po dubini komada

- Prokaljivost pokazuje do koje dubine ispod površine komada je obavljena martenzitna transformacija u određenoj meri. Na prokaljivost utiču oblik komada, dimenzije, uslovi hlađenja, kao i individualne osobine čelika, poput hemijskog sastava, strukture pre kaljenja, sposobnosti provođenja toplote itd. Uslovi hlađenja nisu jednaki u svim slojevima radnog komada.

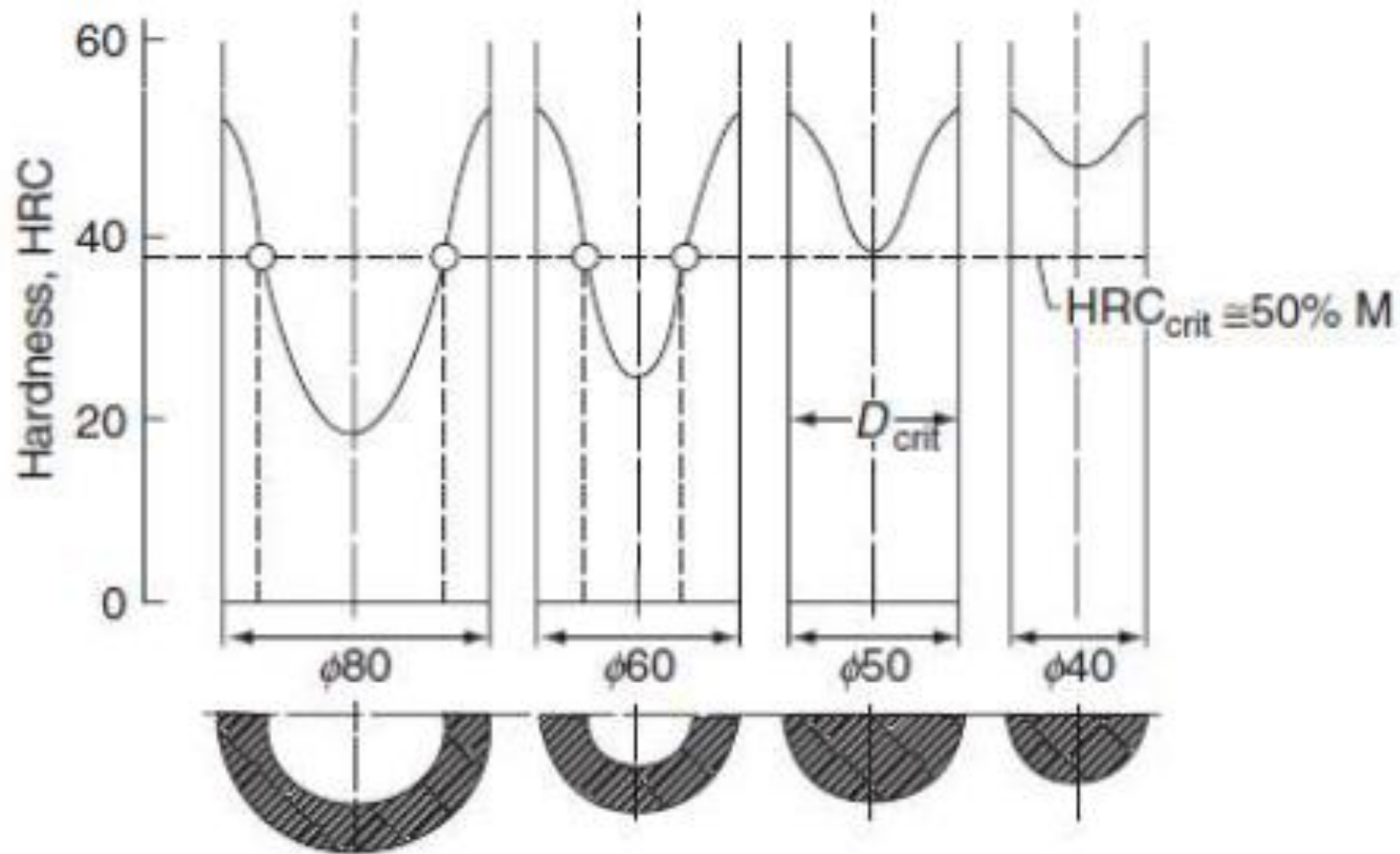


Određivanje prokaljivosti po Grosmanu (Grossmann)

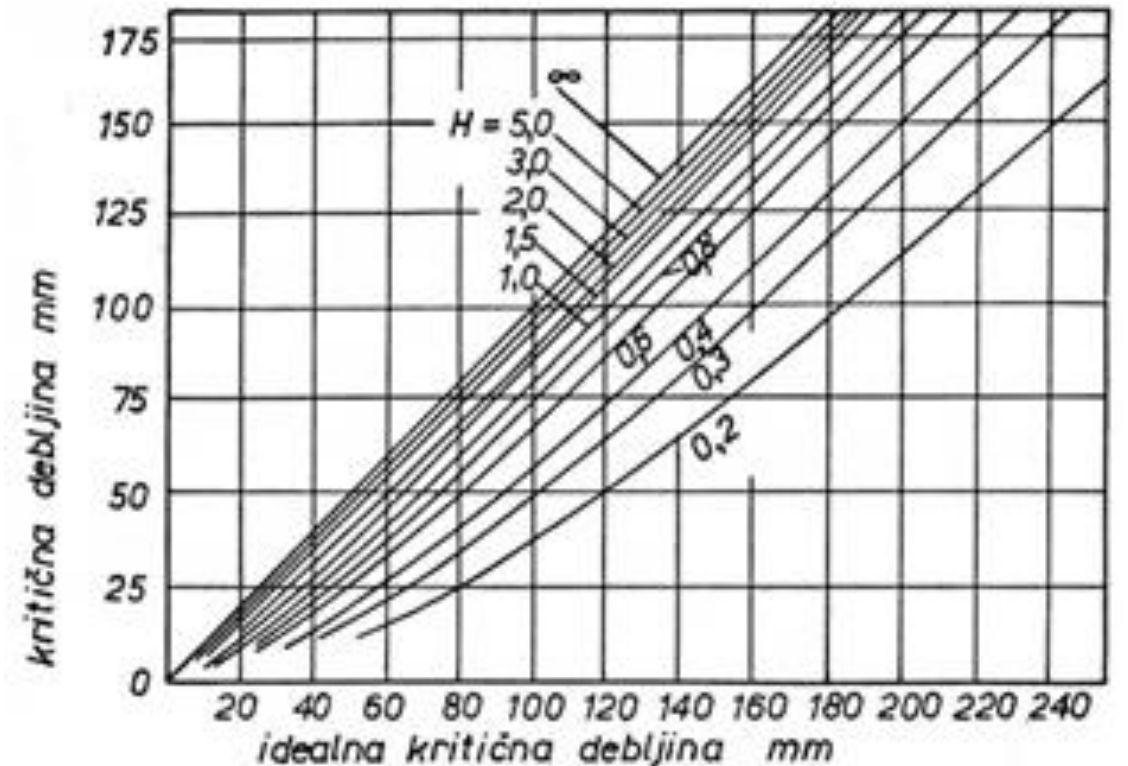
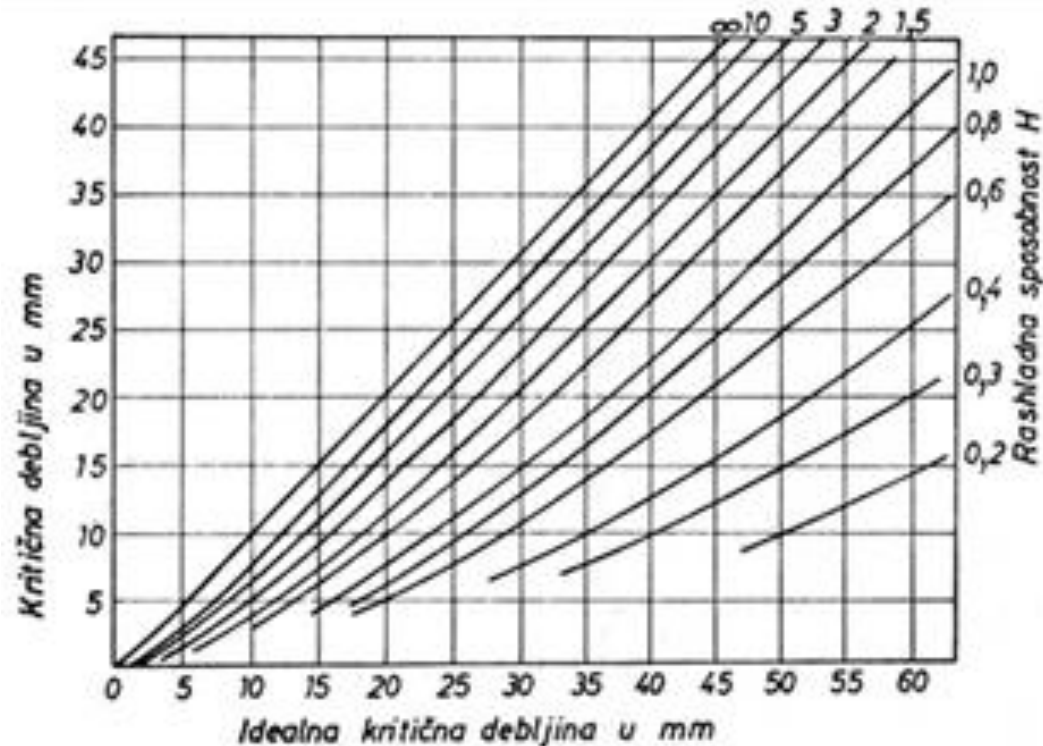
- Veliki broj cilindričnih čeličnih šipki različitog prečnika kali se u određenim uslovima. Meri se procenat martenzita u centru svake šipke. Izdvaja se ona šipka koja ima 50 % martenzita u centru, a prečnik iste predstavlja kritični prečnik D_k . Taj prečnik važi samo za određene uslove hlađenja koji se definišu preko faktora H koji predstavlja rashladnu sposobnost sredstva za hlađenje. Faktor H dat je u tabeli.

Relativno kretanje		Faktor rashladne sposobnosti H			
Sredstva za hlađenje	Komada	Vazduh	Ulje	Voda	Rastvor soli
Nema	Nema	0.02	0.3	1.0	2.2
Nema	Srednje		0.4 - 0.6	1.5 - 3	
Nema	Jako		0.6 - 0.8	3.0 - 6	7.5
Jako ili mlazom			1.0 - 1.7	6.0 - 12	

Određivanje kritičnog prečnika prema Grosmanu

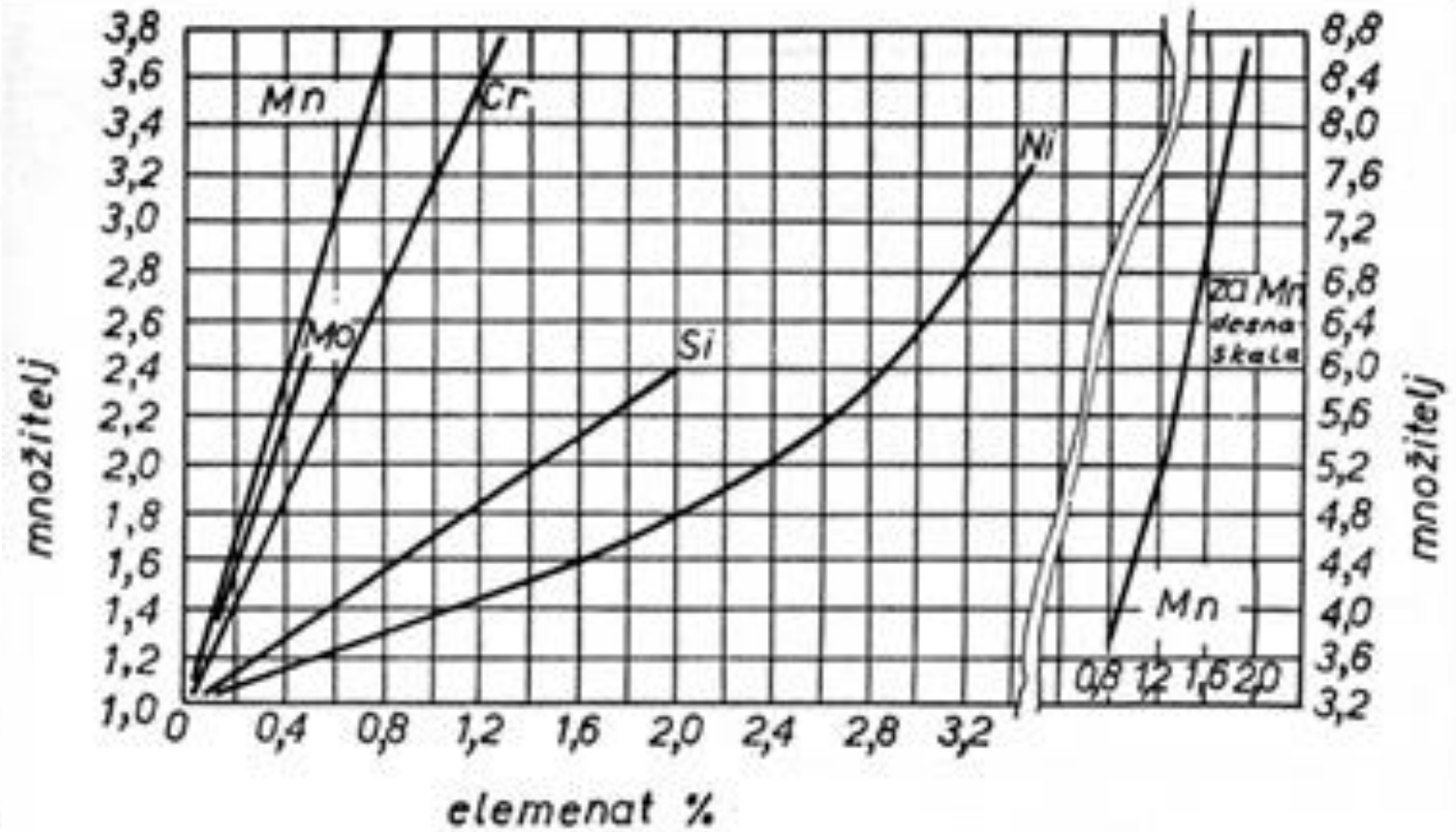
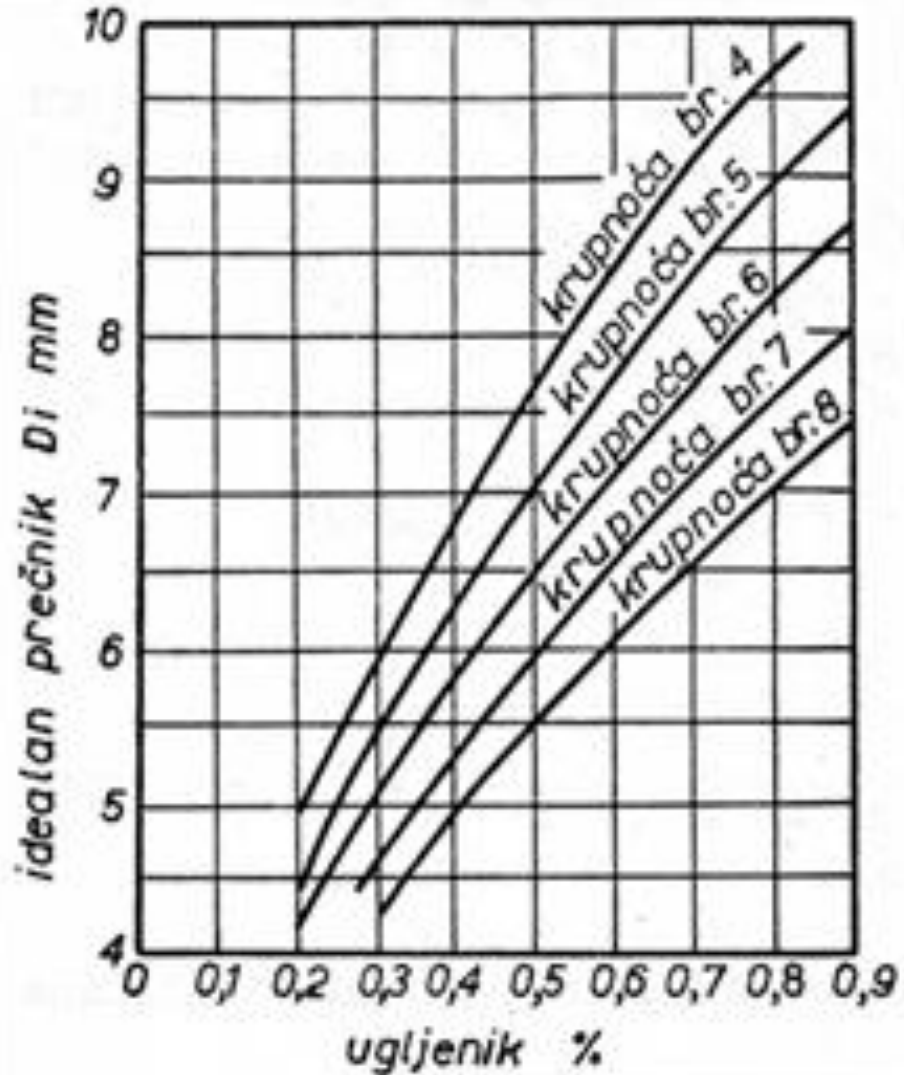


- Kako bi se odredila prokaljivost nezavisno od sredstva za hlađenje, Grosman uvodi idealni kritični prečnik D_i . Predstavlja prečnik nekog čelika koji je hlađen u idealnim uslovima ($H=\infty$), pri kome nastaje 50 % martenzita u centru. Ovakvi uslovi hlađenja podrazumevaju da se komad ohladi za beskonačno kratko vreme. Odnos idealnog kritičnog i kritičnog prečnika dat je na slci. (za ploče male debljine i za ploče velike debljine)



Zavisnost

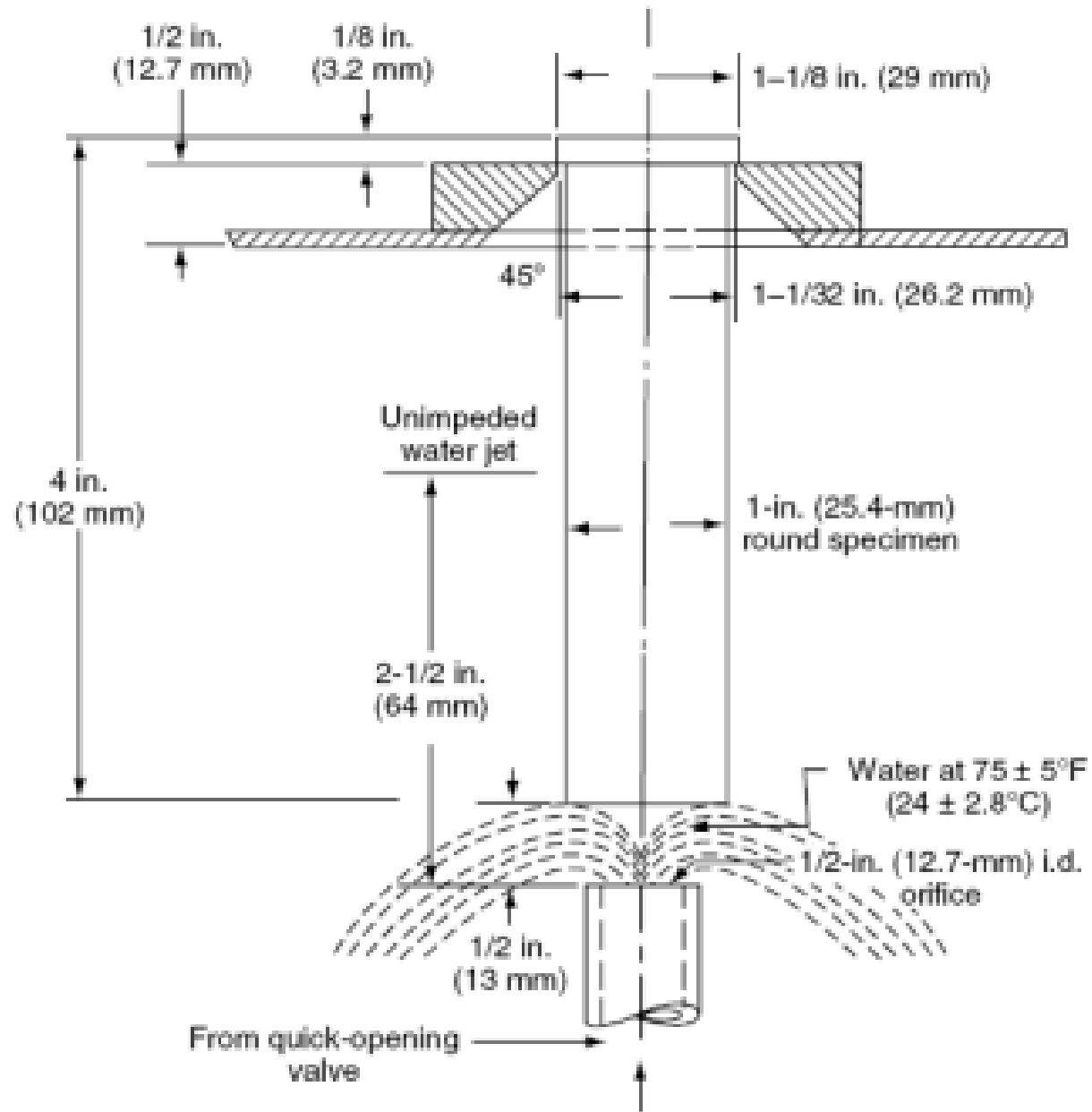
a) idealnog kritičnog prečnika od %C i krupnoće zrna, b) množitelj za razne L.E.



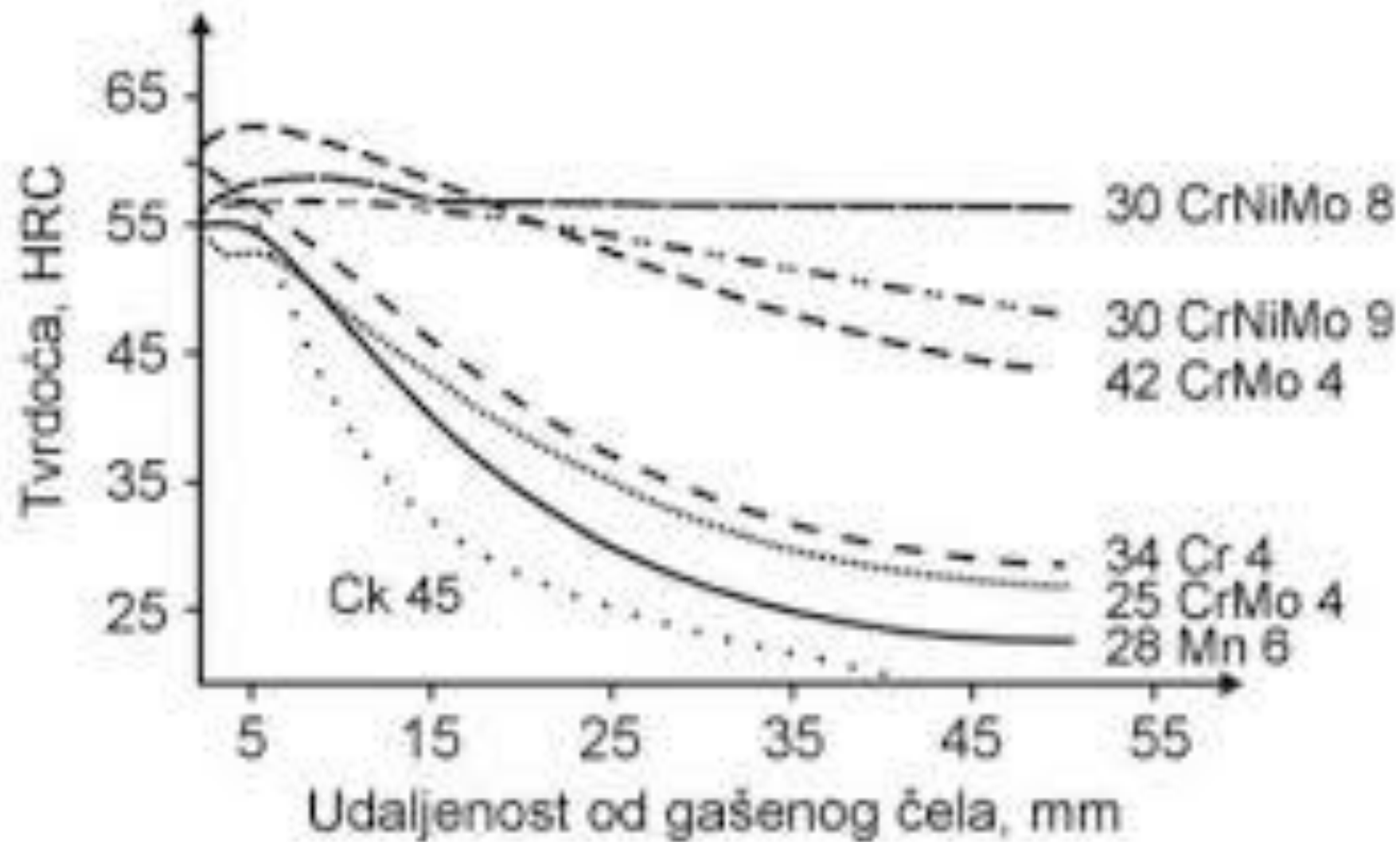
Određivanje prokaljivosti po Džominiju (Jominy)

- Ovaj postupak je brži i jeftiniji od Grosmanovog. Izvodi se na samo jednoj probi i odlikuje se dobrom ponovljivošću. Definisan je mnogim standardima. Uzorak dimenzija 25x100mm zagreva se u peći sa zaštitnom atmosferom (30-40min) do T kaljenja na kojoj se zadržava 30 min. Zatim se brzo postavlja na uređaj i kali od donjeg čela koje se hladi mlazom vode. Hlađenje se vrši u tačno određenim uslovima: mlaz ističe iz cevi prečnika $\frac{1}{2}$ cola (12,7mm), otvor cevi udaljen je od epruvete $\frac{1}{2}$ cola, brzina isticanja vode definisana je visinom stuba vode (63,5mm), temperatura vode za hlađenje je $24 \pm 2,5$ °C. Epruveta se hladi mlazom 10min, a zatim se hladi u vodi.

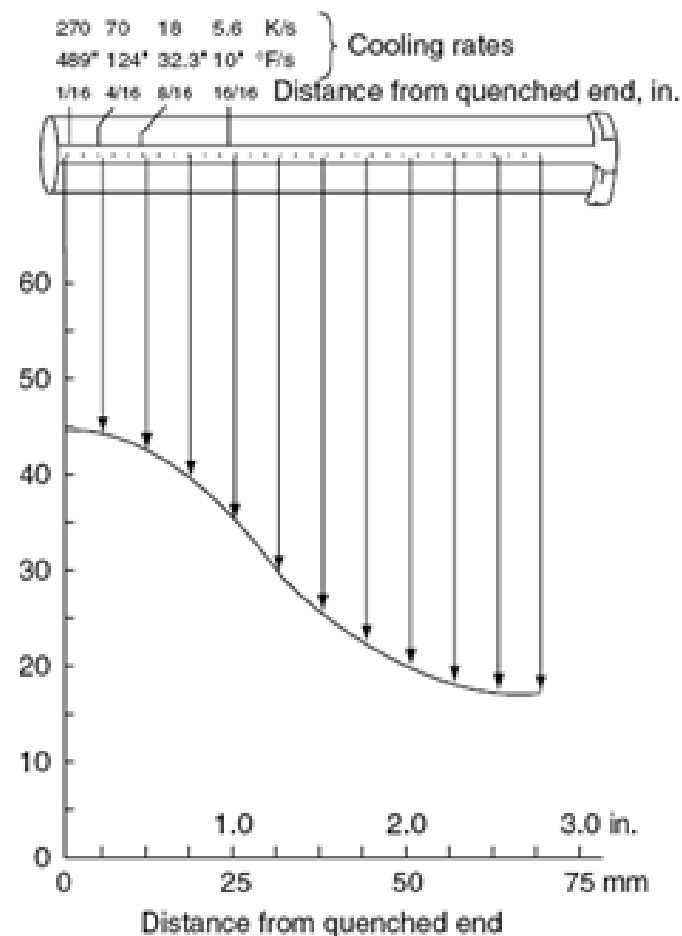
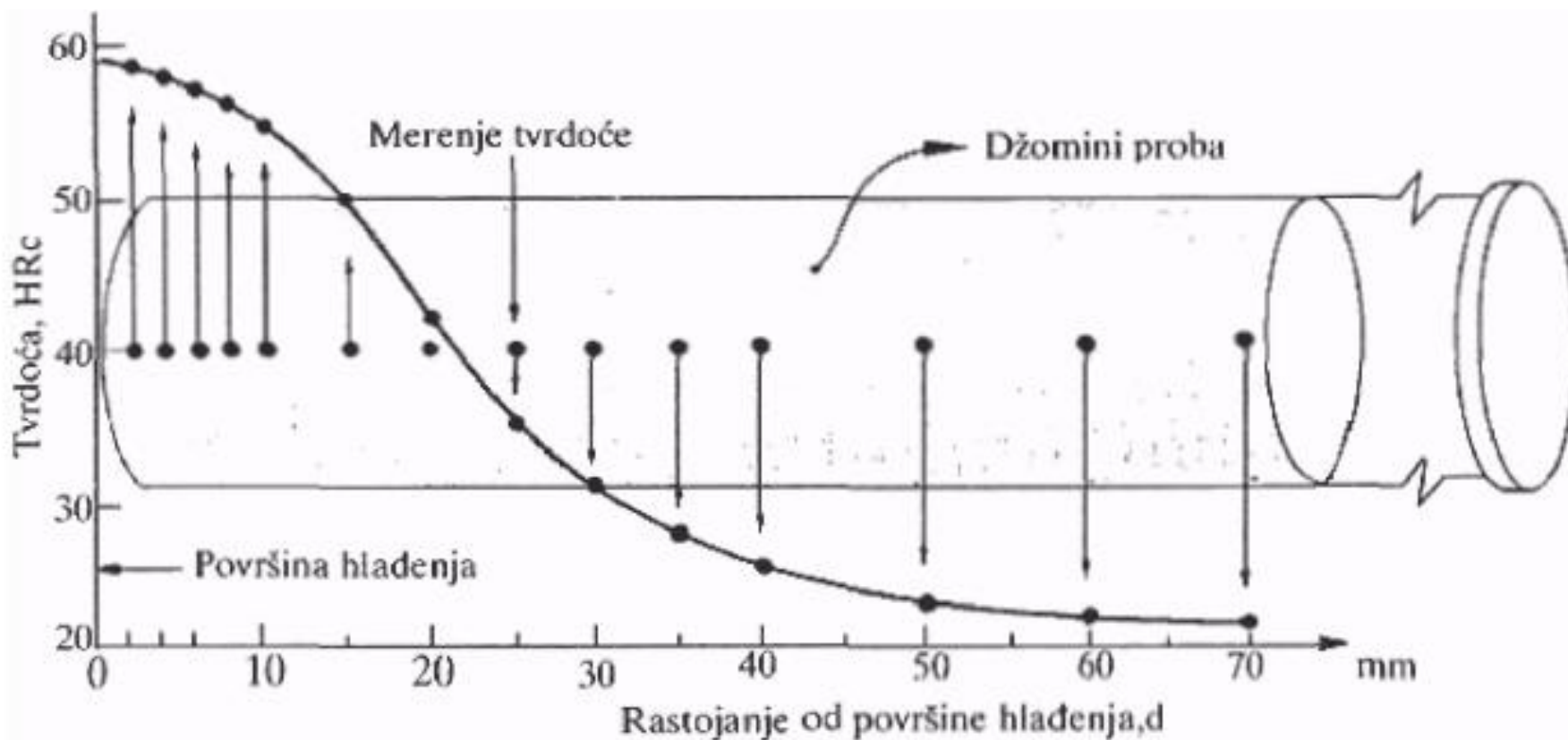
Šema Džomini postupka



Jominy krive

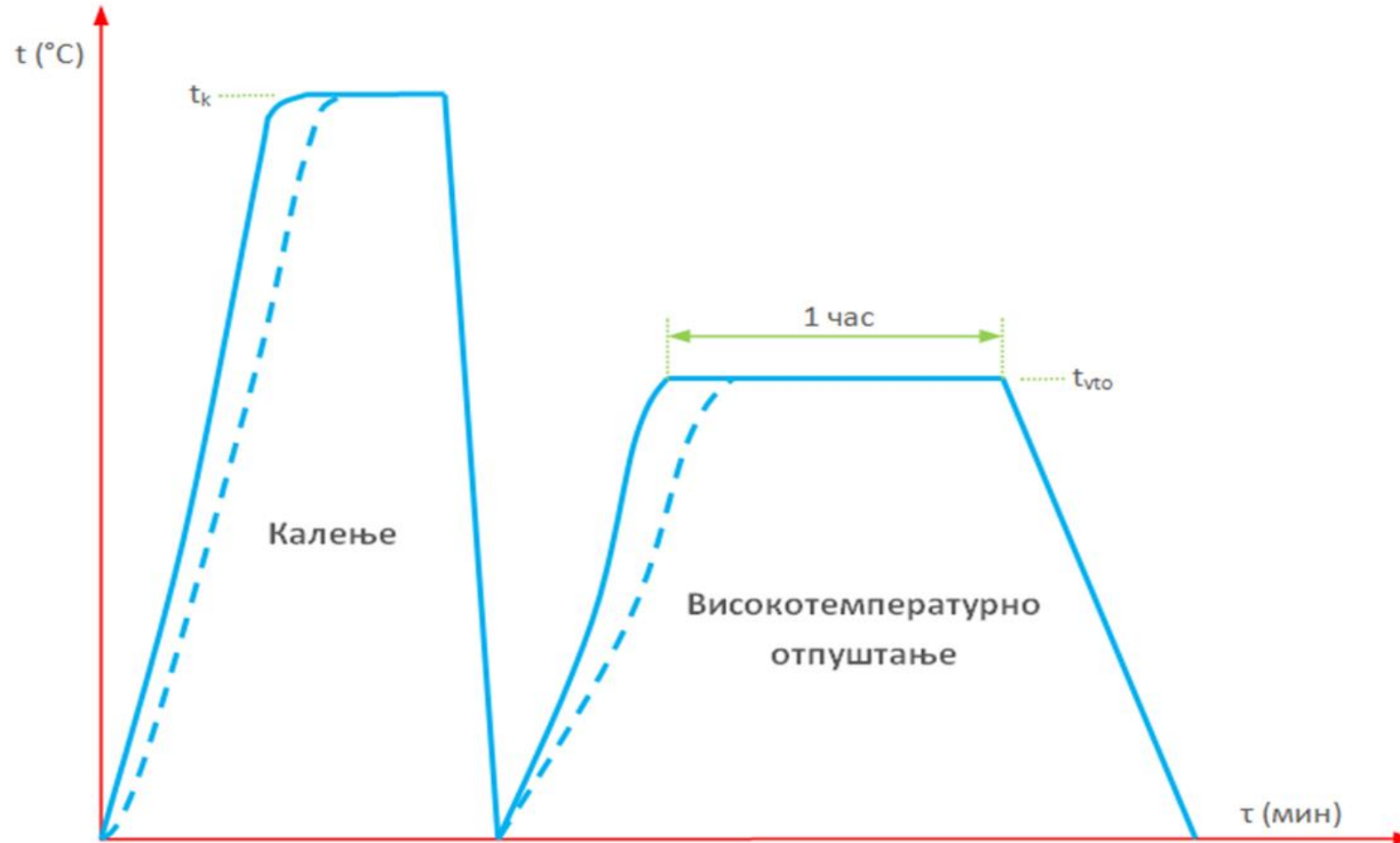


- Najveća brzina hlađenja javlja se na čelu epruvete i smanjuje se prema drugom kraju epruvete, što dovodi do stvaranja različitih mikrostruktura i variranja tvrdoće. Nakon kaljenja epruveta se brusi sa dve strane po 0,3 mm, po izvodnici, a zatim se meri tvrdoća. Dobijaju se krive prokaljivosti kao što je prikazano na slici.

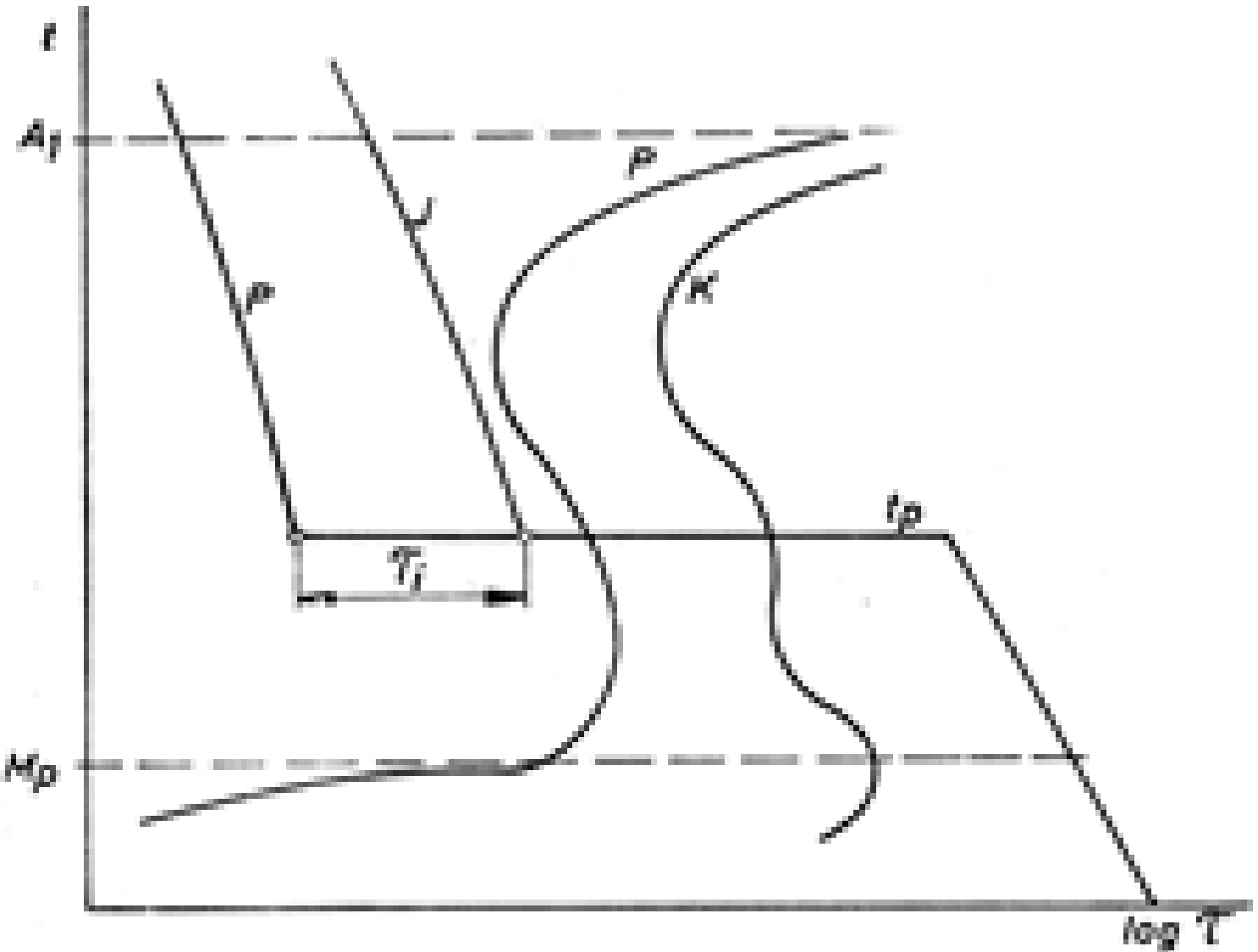


Postupci poboljšavanja

1. Kombinovani postupak



Izotermalno poboljšavanje



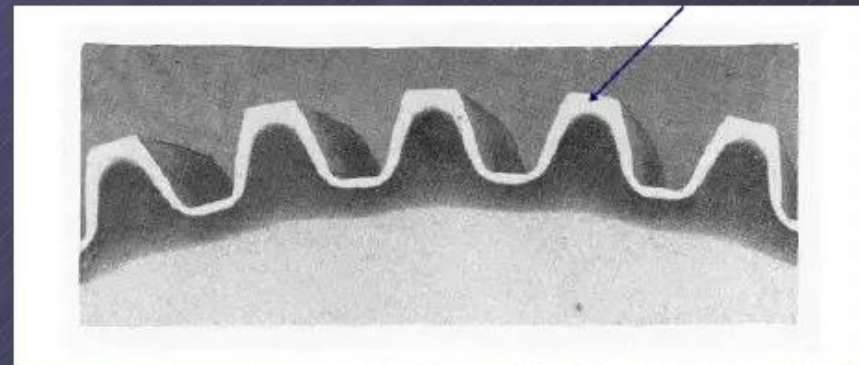
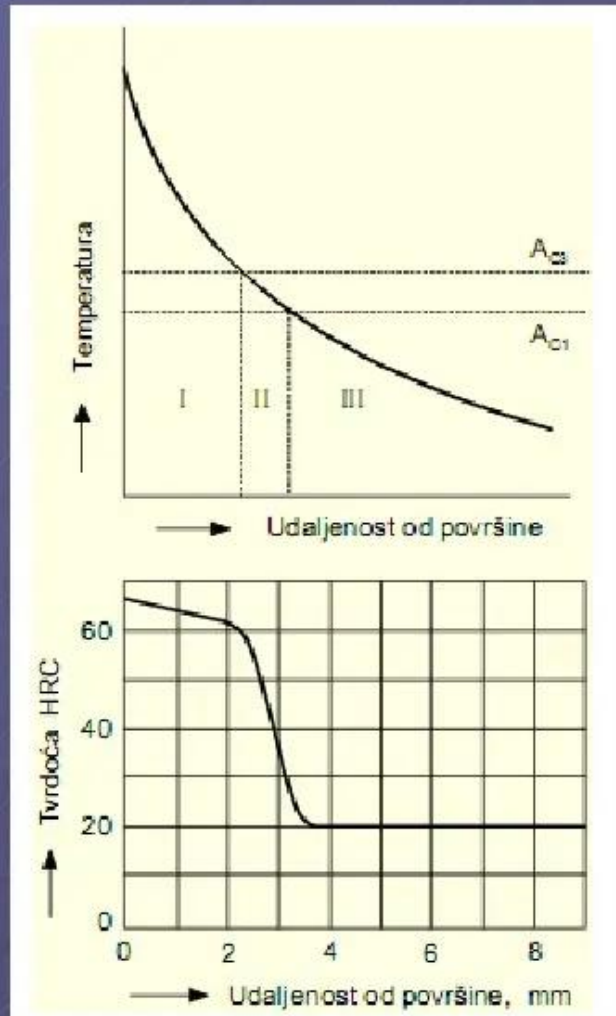
- Napomene:

1. Izotermalno poboljšavanje se koristi gde postoji opasnost od pucanja i gde oblik komada ne dozvoljava klasično kaljenje

2. Kod poboljšavanja na više tvrdoće, kod kombinovanog postupka, postoji opasnost od otpusne krtosti, i tada treba birati drugi legirani čelik (Mn, Ni), da se preostali austenit stabilizuje ili primeniti izotermalno kaljenje.

POVRŠINSKO OJAČAVANJE

Površinsko kaljenje



Cilj površinskog ojačavanja je promena osobina površinskog sloja do određene dubine i pri tome se vrši:

- poboljšanje mehaničkih osobina delova, a naročito dinamičke čvrstoće;
- povećanje otpornosti na habanje;
- povećanje hemijske postojanosti ili vatrostalnosti

To su faktori sigurnosti i veka trajanja konstrukcije.

- Da bi se povećala otpornost na habanje potrebno je povećati tvrdoću, dok je za povećanje dinamičke čvrstoće pored povećanja čvrstoće potrebno povećati žilavost. Ovakav zahtev se može ispuniti izborom čelika dovoljne čvrstoće i žilavosti i ojačavanjem površinskog sloja nekim od postupaka površinskog ojačavanja.

- Ukoliko je veličina kontaktnih napona veća od σ_T nastaje plastične deformacije. Prema Palmgrinu kritični napon je onaj koji daje tek vidljivu deformaciju posmatranu golim okom. Do ovog slučaja neće doći ako je površinska tvrdoća po Vickersu:

$$HV \geq 7500 \sqrt[3]{\frac{K_o}{18\phi_P}} \dots\dots\dots(1)$$

gde su:

za linijski dodir	za tačkasti dodir
$K_o = F/DB$	$K_o = F/D^2$

- K_o - površinski pritisak [MPa]
- F - sila pritiska,
- D - prečnik cilindra,
- B - dužina cilindra,
- ϕ_P - faktor kontakta prema Palmgrinu
- Ova formula ima najveću primenu kod delova sa visokom tačnošću obrade i visokih kvaliteta površine (kotrljajni ležajevi).

Za druge slučajeve pogodnija je metoda Levina i Rešetova.

Prema ovoj metodi potrebna tvrdoća može se odrediti na osnovu sledećeg izraza:

Za linijski dodir:

$$HRC \geq \frac{18.6F}{K \cdot d \cdot B} + 41.4 \dots\dots\dots(2)$$

Za tačkasti dodir:

$$HRC \geq \frac{18.6F}{K \cdot d^2} + 41.4 \dots\dots\dots(3)$$

gde su:

F (N) - veličina pritisne sile,

d (m) - prečnik valjka,

K (Pa) - dozvoljeno kontaktno opterećenje,

B (m) - dužina valjka.

Kx10 ⁵ [Pa]			
Vrsta tretmana	Lopta	Kratak valjak	Dugi valjak
potpuno kaljen ili cementiran pa kaljen	6	200	150
indukciono kaljen	5	180	130
nitriran	4	150	100

- U slučaju ljuskanja ili pitinga dolazi do odvaljivanja površinskih slojeva kao posledica zamora materijala. Pod dejstvom promenljivog kontaktnog opterećenja dolazi do pojave promenljivog napona smicanja u površinskom sloju koji ima maksimalnu vrednost na određenoj dubini ispod površine. Na toj dubini dolazi najpre do pojave zamora i prve pukotine paralelne sa površinom koja se postepeno razvija u ljuskanje površinskog sloja. Veličina napona smicanja kao i dubina na kojoj se pojavljuje maksimalna vrednost ovog napona može se izračunati iz Hercovih jednačina.

- Za linijski dodir: u ovom slučaju linija dodira deformiše se u traku širine $2a$, gde je a (mm):

$$a = 1.075D_1\varphi\sqrt{\frac{K}{E}}$$

- Za tačkasti dodir: u ovom slučaju kontaktna tačka deformiše se u krug poluprečnika a , gde je a (mm):

$$a = 0.88D_1\sqrt[3]{\frac{K}{E}}$$

- Pri linijskom dodiru maksimalni napon javlja se na dubini $0.78a$, a kod tačkastog na dubini od $0.47a$. Veličina tog napona određuje se na osnovu sledećih izraza:

- Za linijski dodir:
$$\tau_{MAX} = 0.18\sqrt{KE}$$

- Za tačkasti dodir:
$$\tau_{MAX} = 0.17\sqrt[3]{KE^2}$$

- Postupak površinskog ojačavanja treba sa sigurnošću da obuhvati dubinu na kojoj se pojavljuje maksimalni napon smicanja, a to će biti ako je dubina ojačavanja:

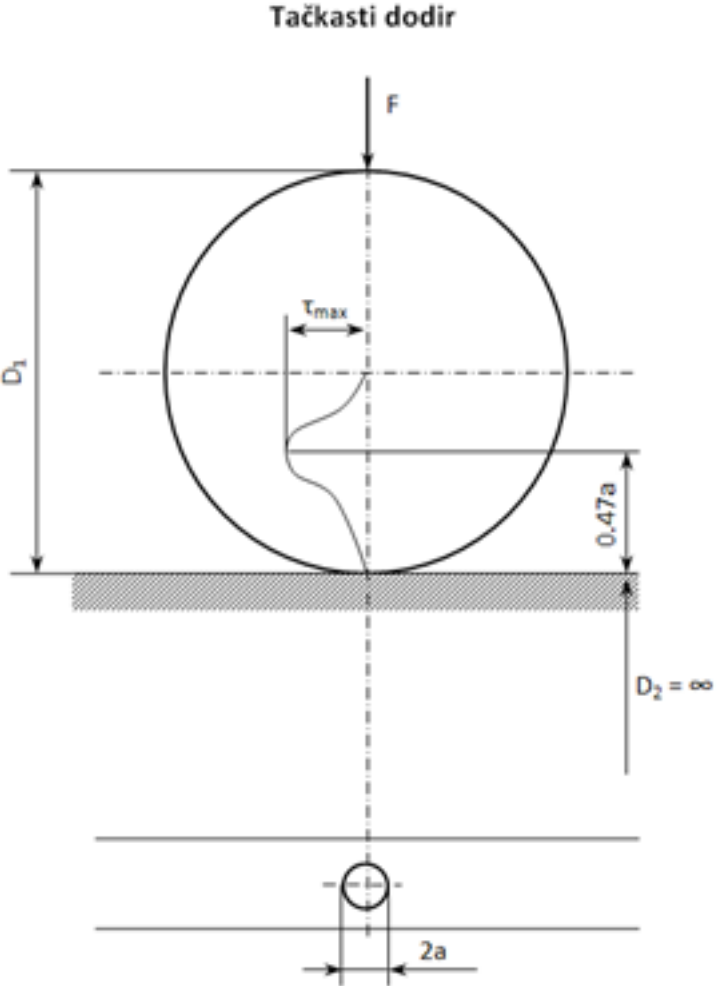
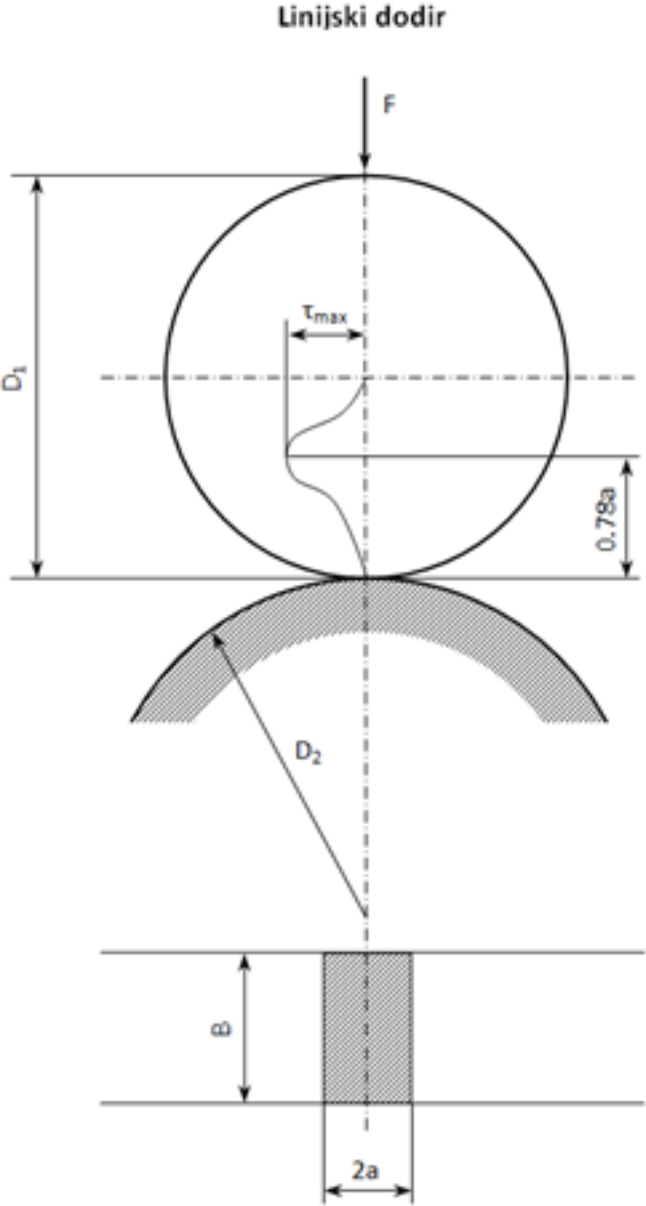
$S = a$ - za linijski dodir

$S = 0.6a$ - za tačkasti dodir

Parametri površinskog ojačavanja:

- najmanja površinska tvrdoća i
- dubina ojačavanja.

Raspored kontaktnog napona po dubini pri linijskom i tačkastom dodiru



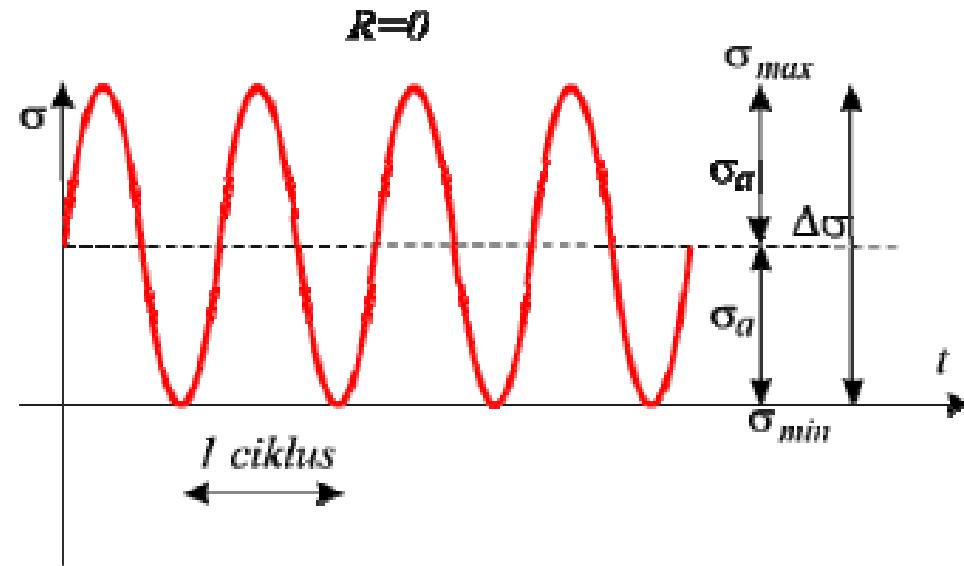
- Rešavanje ovakvog dvojnog zahteva se postiže izborom materijala dovoljne čvrstoće i žilavosti i da se samo jedan površinski sloj ojača (površinsko kaljenje, cementacija, indukciono kaljenje, nitriranje, i inženjerstvom površina-deponovanjem prevlaka).

Povećanje σ_D

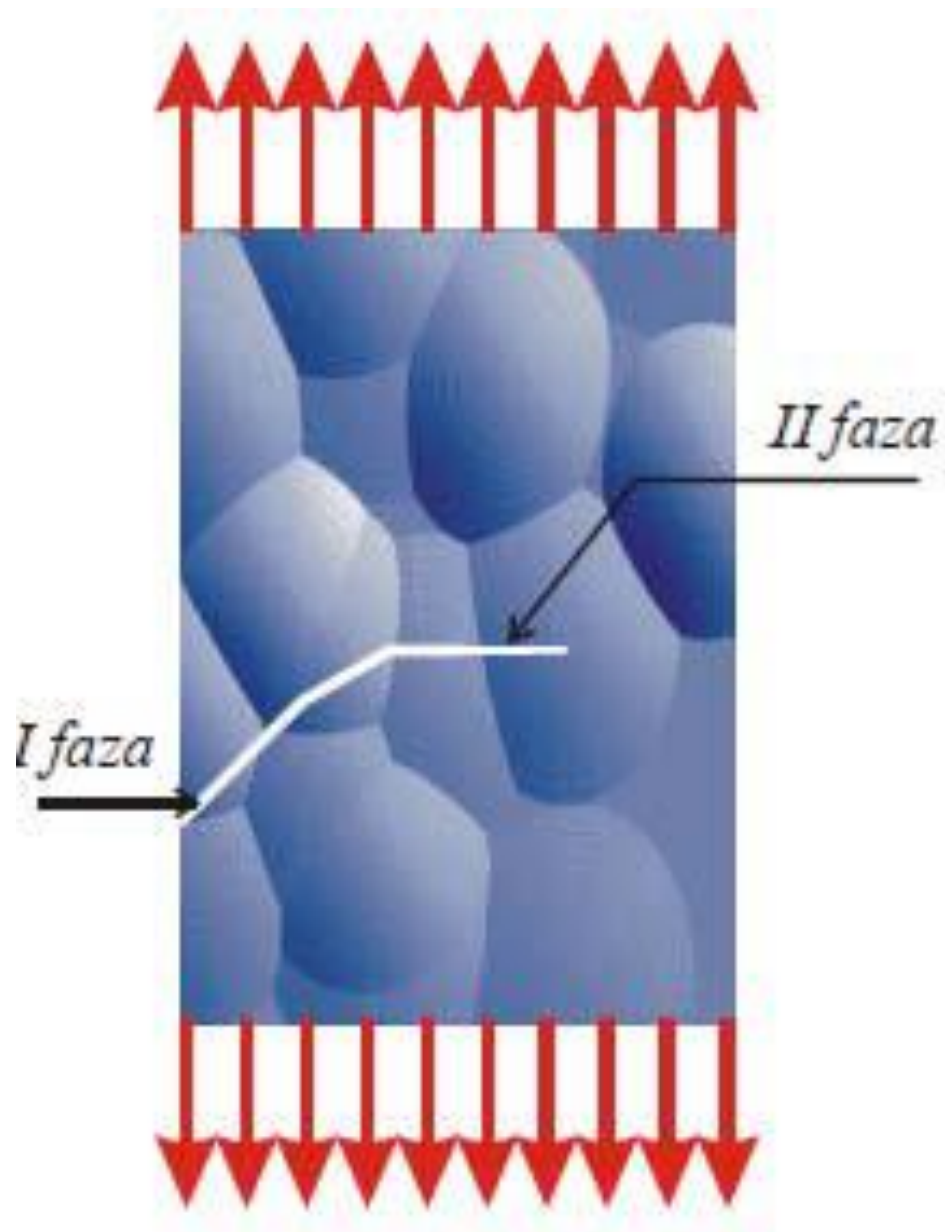
Kod statičkih opterećenja, polazni podatak za dimenzionisanje komada je jedna vrednost opterećenja ili napona.

Kod dinamičkog opterećenja, a naročito sa nesimetričnim ciklusima, postoje dva podatka:

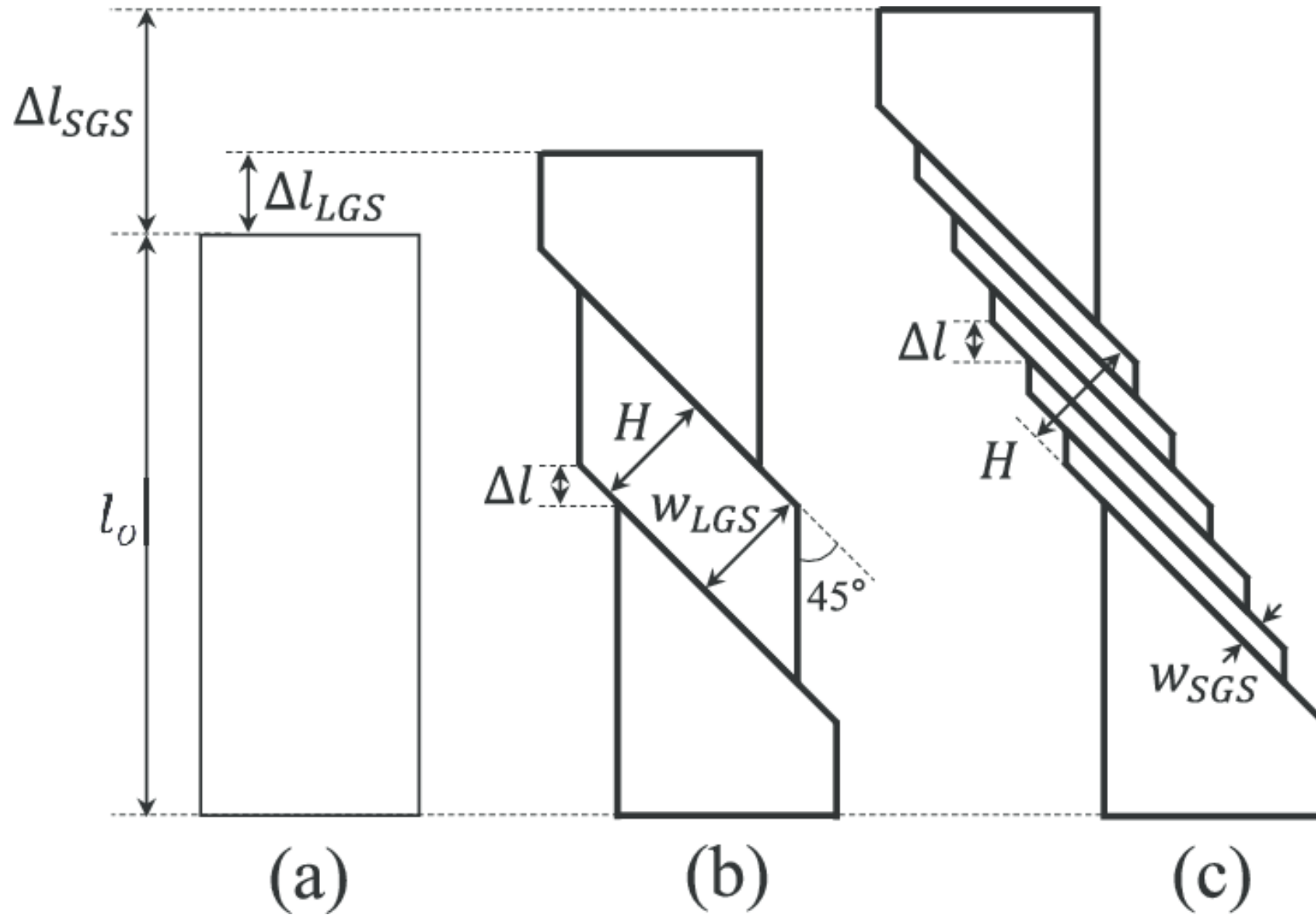
- srednji napon
- Amplituda



Faze rasta pukotine pri cikličkom opterećenju, prva i druga faza

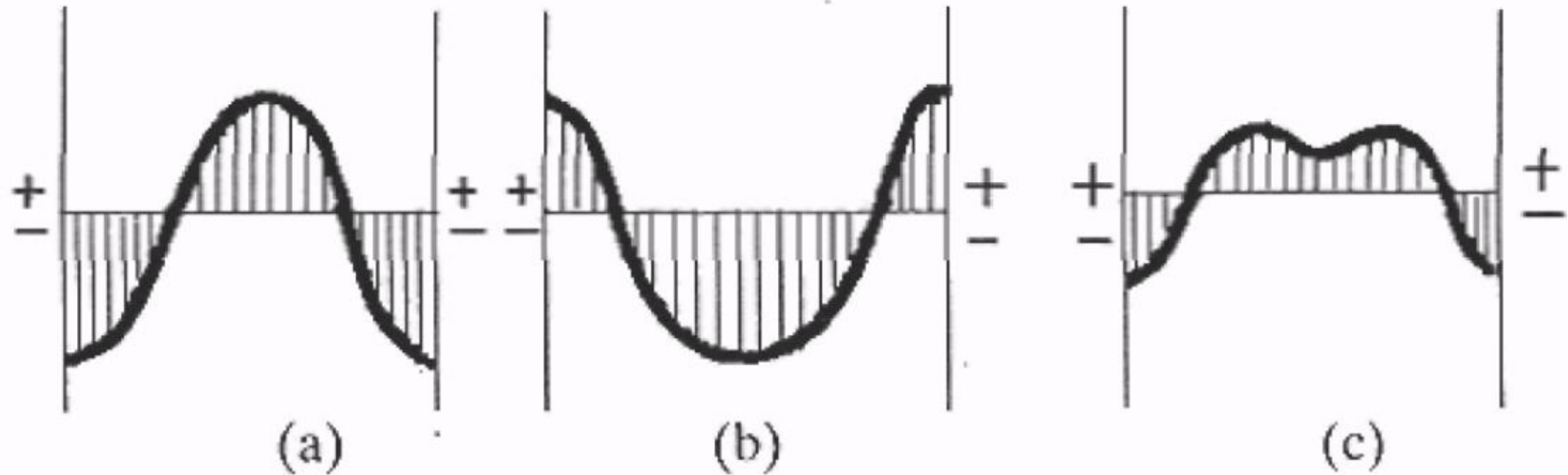


Ludersove trake klizanja



Dejstvo zaostalih napona u površinskom sloju

- Zaostali naponi imaju važnu ulogu. Zaostali pritisni naponi mogu smanjiti zatezne napone, koji potiču od spoljnog opterećenja i na taj način smanjuju ukupne napone u površinskom sloju. Pritisni naponi se postižu termohemijskom obradom, površinskim kaljenjem i naklepom.



Slika 10.24. Zaostali naponi u procesu kaljenja: (a) termički; (b) strukturni; (c) ukupni.

Povećanje σ_D cementacijom

- Cementacija utiče na povećanje σ_D i istovremeno raste otpornost na habanje. Postupak je lako izvodljiv i uobičajeni faktori sa kojima se kontroliše povećanje

σ_D , cementacijom su:

1. Tvrdća površinskog sloja
2. Čvrstoća i tvrdća jezgra komada
3. Dubina ojačanog sloja

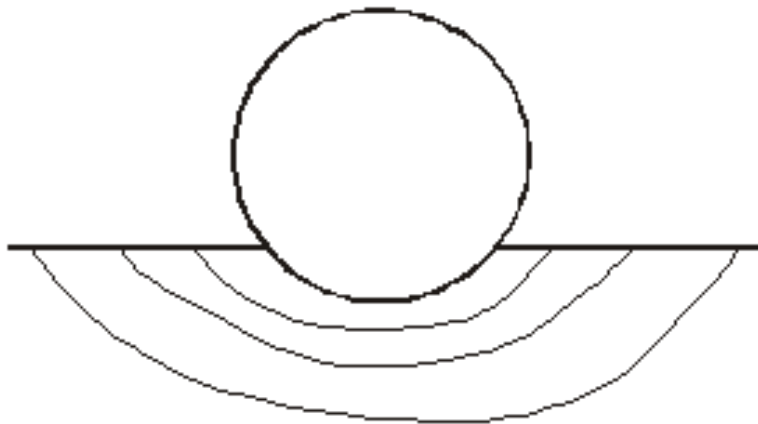
1. Tvrdća zavisi od %C u površinskom sloju. Postoji optimalna tvrdća, odnosno struktura cementiranog sloja: M+karbid+Az. Cementit (karbid) ne sme biti izlučen po granici zrna (krto), niti da bude krupnozrni. Az može da bude do 15%.

2. Tvrdća jezgra je kod čelikam u poboljšanom stanju 20-46 HRC, a kod čelika za cementaciju 29-46 HRC.

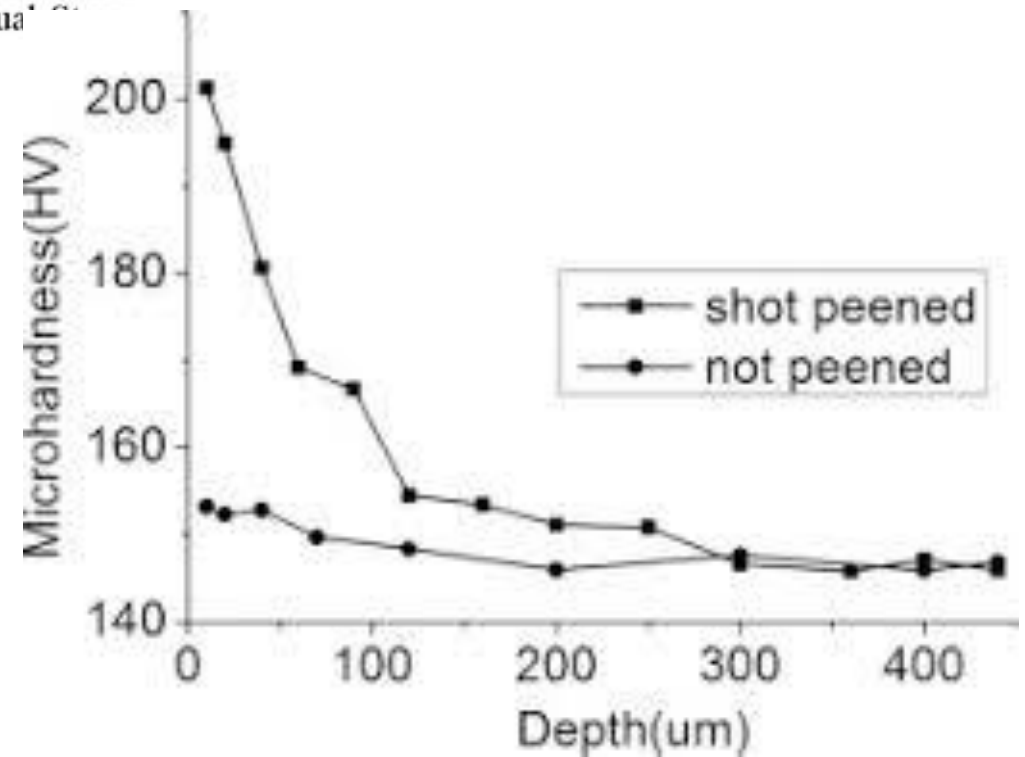
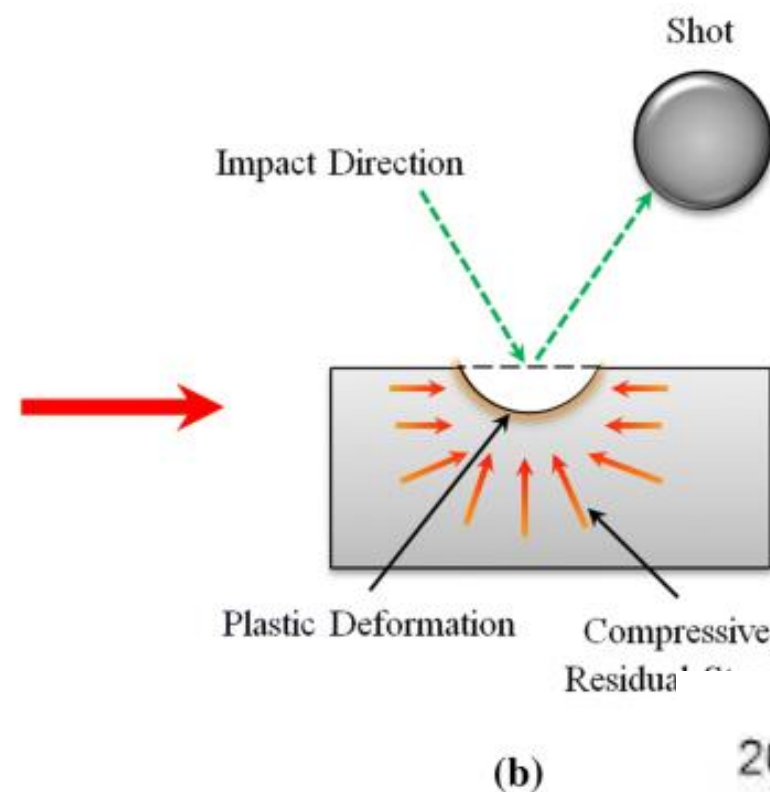
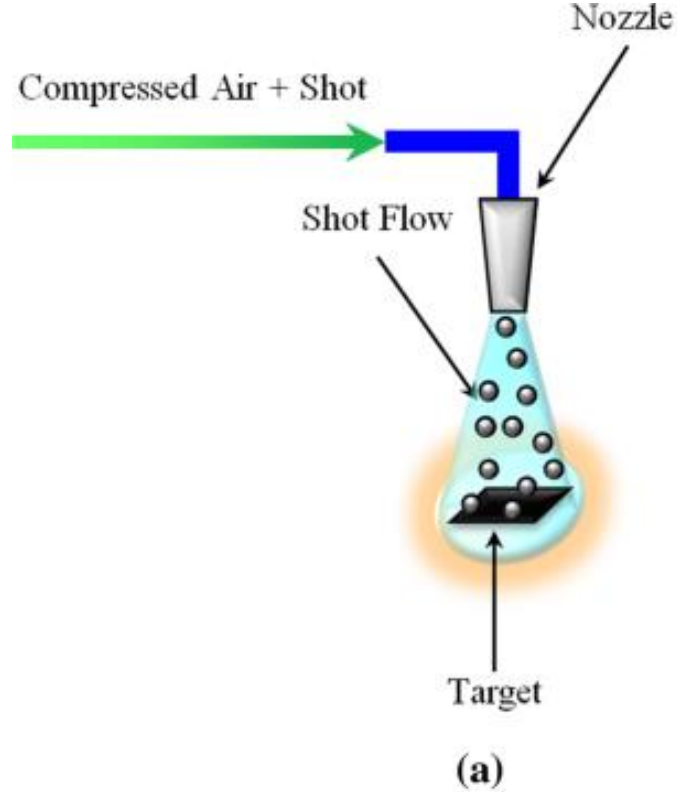
Povećanje σ_D plastičnim deformisanjem na hladno (NAKLEP)

- Efekat ojačavanja nastaje ako je plastična deformacija obavljena na „hladno“. Na gotovim delovima se ovaj postupak izvodi „bombardovanjem“ cele površine čeličnim kuglicama (sačmarenje) ili valjanjem metala, profilisanim alatima.
- **Deformaciono ojačavanje** tankog sloja na površini čelika dovodi do stvaranja unutrašnjih napona u čeliku, koji su posledica razlika u stepenu deformacija, počev od površine ka unutrašnjosti. Prednaponi pritiska koji ostaju posle deformacije smanjuju mogućnost pojave prslina usled radnih napona zatezanja. Najbolji efekti ojačavanja se postižu u slučaju kada je ojačani sloj velike površine a male debljine.
- **Valjanje.** Ovaj postupak je u suštini isti kao prethodni, ali se može primeniti na ravanski ili osno simetrične delove trakastog ili pločastog oblika. Pri prolazu takvih delova između valjaka sa tačno izabranim stepenom deformacije i prečnikom valjaka izaziva se deformacija površinskih delova i odgovarajuće ojačavanje.

- Sačmarenje. Postupak se izvodi tako što se mlaz sitnih čeličnih kuglica (sačme) usmeri na površinu predmeta uz pomoć sabijenog vazduha. Usled udara čeličnih kuglica u površinu predmeta, površina se plastično deformiše i usled toga ojačava. Pri tome se usled plastične deformacije javljaju zaostali naponi, slika.
- Ojačavanje površine čelika smanjuje habanje površine i produžava radni vek a prednaponi pritiska povećavaju dinamičku čvrstoću, tako da se mašinski deo može opteretiti većim zateznim naponima.
- Ovaj postupak je pogodan za ojačavanje površina termički obrađenih i delova kovanih na povišenim temperatura, jer se sačmarenjem ujedno i očisti površina od oksida. Takođe se mogu sačmariti i delovi koji su složenijeg i nesimetričnog oblika. Na stepen ojačavanja i kvalitet površine utiču: veličina i brzina kuglica, vreme sačmarenja, ugao snopa kuglica u odnosu na površinu i sl.



- Dubina ojačanog sloja plastičnim deformisanjem se reguliše brzinom i kuglica (3-6 m/s) i veličinom kuglica (0.2 -4 mm).
- Efekat ojačavanja zavisi od stepena plastične deformacije i polazne strukture. Ukoliko je nestabilnost strukture veća, mogu se postići veći efekti ojačavanja.
- Dejstvo naklepa dovodi do razaranja iglica martenzita, i izlomljene iglice zadržavaju isti pravac za manje sile, a kod velikih sila se menja njihov pravac, te je nova struktura bez vidljive orijentacije.
- Objašnjenje uzroka ojačavanja površinskim naklepom, daje teorija dislokacija, odnosno, dolazi do aktiviranja izvora dislokacija i na taj način se uvćava gustina dislokacija. To se dešava zbog nastajanja čestica karbida, koje otežavaju kretanje dislokacija, usled čega raste tvrdoća.
- Glavna prednost je mogućnost primene na čelicima velike čvrstoće.



TERMO-HEMIJSKA OBRADA

- Ovim postupcima se postiže obogaćivanje površine čelika hemijskim elementima sklonim intersticijskom ugrađivanju u kristalnu rešetku.
- **Cementacija** je postupak obogaćivanja površine čelika ugljenikom. Osnovni cilj je da površina mašinskih delova bude dovoljno tvrda i otporna na habanje a da jezgro delova ostane dovoljno žilavo. Vršiti se na delovima koji su namenjeni za rad u uslovima promenljivih opterećenja i trenja.
- Na temperaturi $900\div 950^{\circ}\text{C}$ vrši se obogaćivanje ugljenikom do $0,8\% \text{C}$ a predmet se zatim kadi. Cementacijom se tretiraju nisko-ugljenični čelici ($0,1\div 0,2\% \text{C}$) a cementirani sloj je najčešće dubok $0,5\div 2 \text{ mm}$. Cementacija se izvodi u čvrstom, tečnom ili gasovitom sredstvu.
- **Nitriranje** je postupak difuzije azota (N) u površinski sloj čeličnog dela. Kao sredstvo za nitriranje koristi se amonijak (NH_3). Delovi se postepeno zagrevaju do temperature nitriranja ($t=480\div 650^{\circ}\text{C}$). Nitriranje daje tvrdu površinu (otpornu na habanje), povećanu trajnu dinamičku čvrstoću i bolju postojanost čeličnih delova prema koroziji. Dubina nitriranog sloja je do 1 mm .

- **Cijanizacija (karbonitriranje)** je jednovremeno obogaćivanje površine čelika ugljenikom i azotom, a primenjuje se u istom cilju kao i prethodne metode.
- **Siliciranje** je proces obogaćivanja površine čelika silicijumom radi poboljšanja postojanosti prema dejstvu kiselina.
- **Difuziona metalizacija** je proces obogaćivanja površine čelika metalima (Al, Cr, Zn). Zbog male brzine difuzije, uprkos visokoj temperaturi ($t=950\div 1100^{\circ}\text{C}$) proces traje veoma dugo.
- **Fosfatiranje** je postupak gde se čelični predmet potapa u fosfornu kiselinu (H_3PO_4) pri čemu se atomi Fe iz površinskog sloja obrazuju sa rastvorom sloj železo-fosfata.
- **Bruniranje** je postupak gde se na površini čelika i legurama bakra obrazuje tamni oksidni sloj. Obrada se vrši kuvanjem u rastvoru sumporne kiseline. Ovaj postupak služi za antikoroziону zaštitu i umanjenje refleksije svetlosti od površine metala.

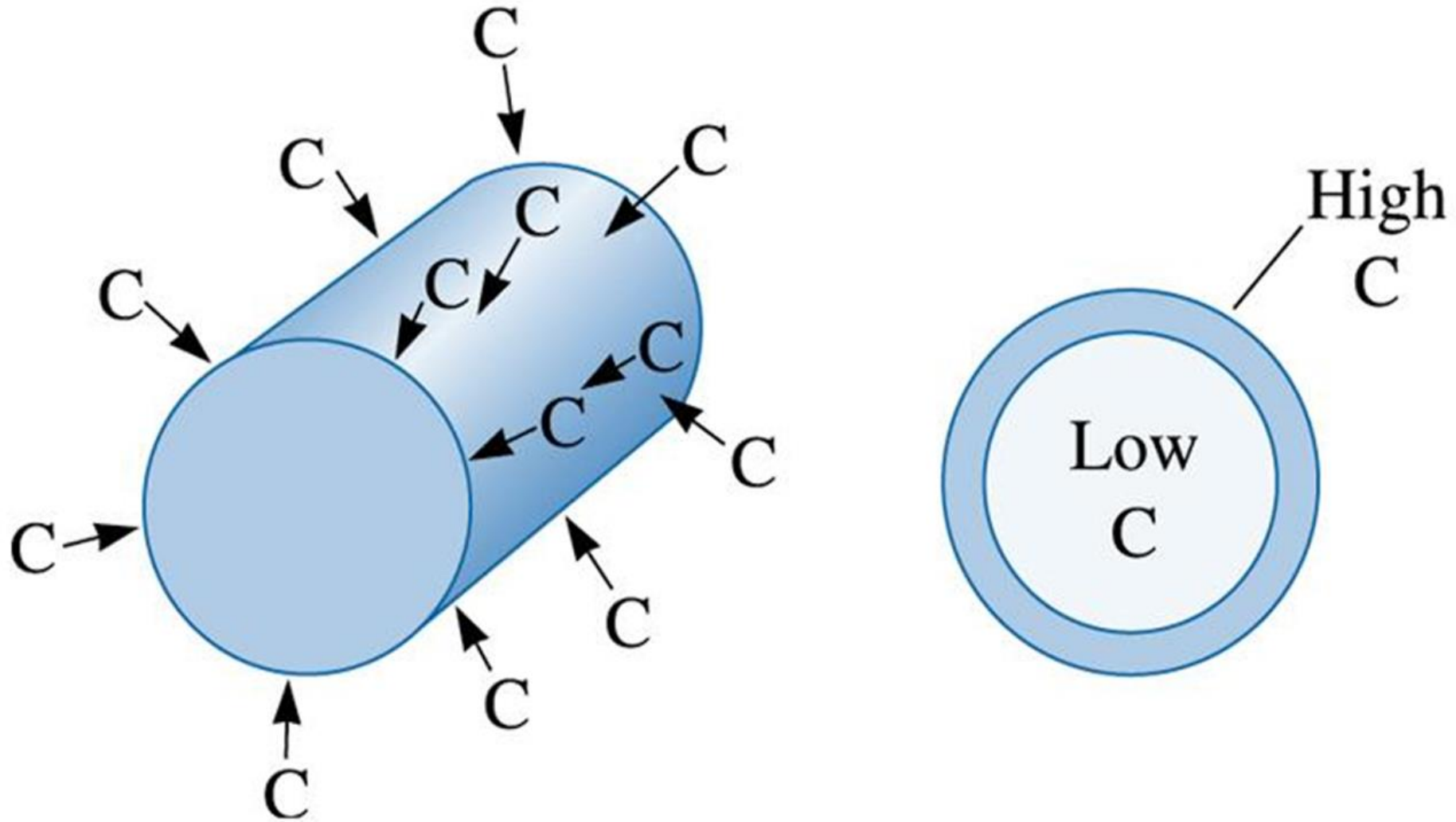
Cementacija

- Cementacija se sastoji od naugljeničavanja površinskog sloja mekog i žilavog čelika sa malim procentom ugljenika (ispod 0.3%). Cementacija se vrši na temperaturama 900 - 950 °C. Posle kaljenja povećava se tvrdoća samo u naugljeničenom površinskom sloju (65 HRC), dok jezgro komada zbog malog sadržaja ugljenika ostaje žilavo.
- Delovi za cementaciju su obrađeni gotovo na definitivno, jer se posle mogu obraditi jedino brušenjem, odnosno rezanjem posle cementacije a pre kaljenja.

Prednosti cementacije:

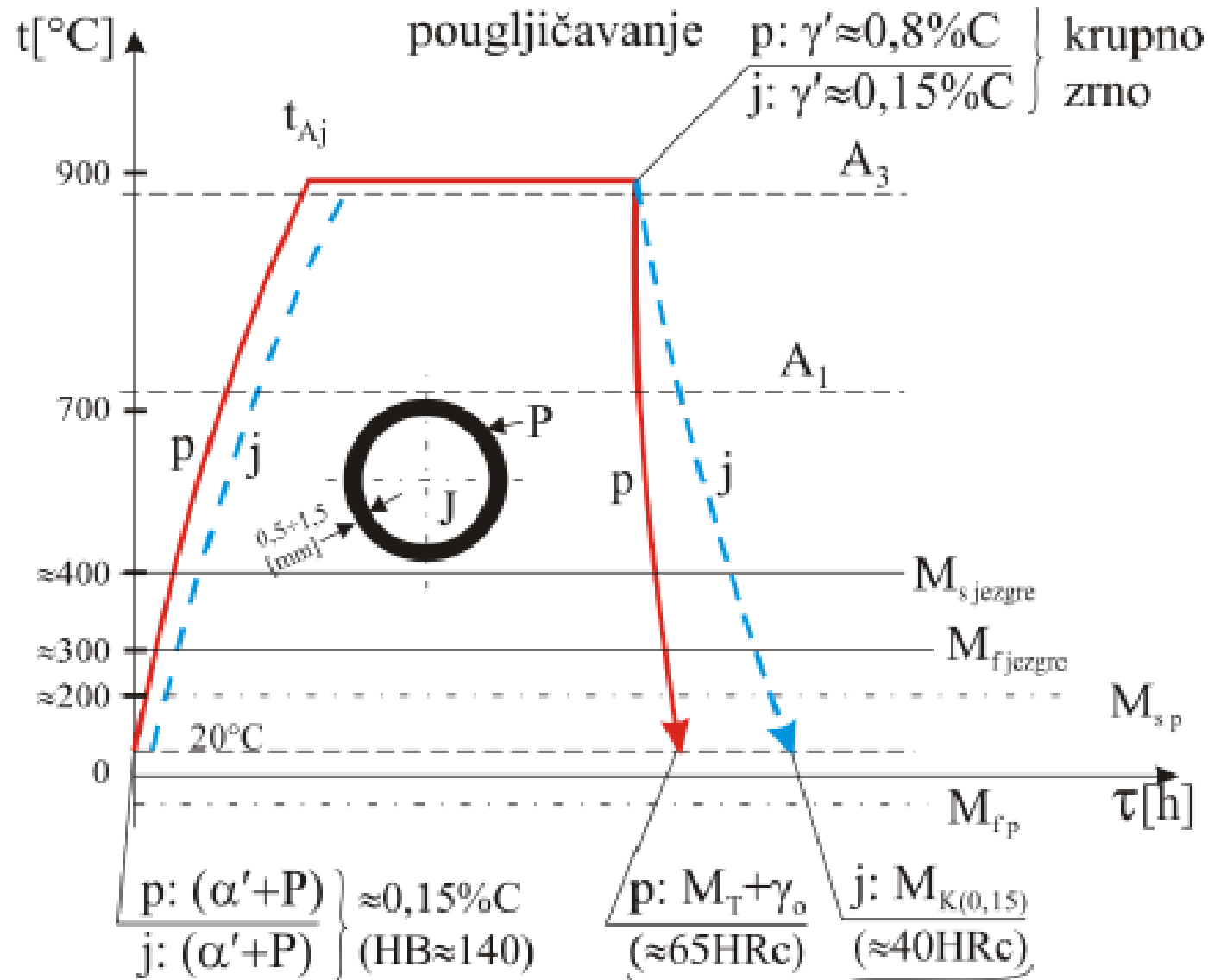
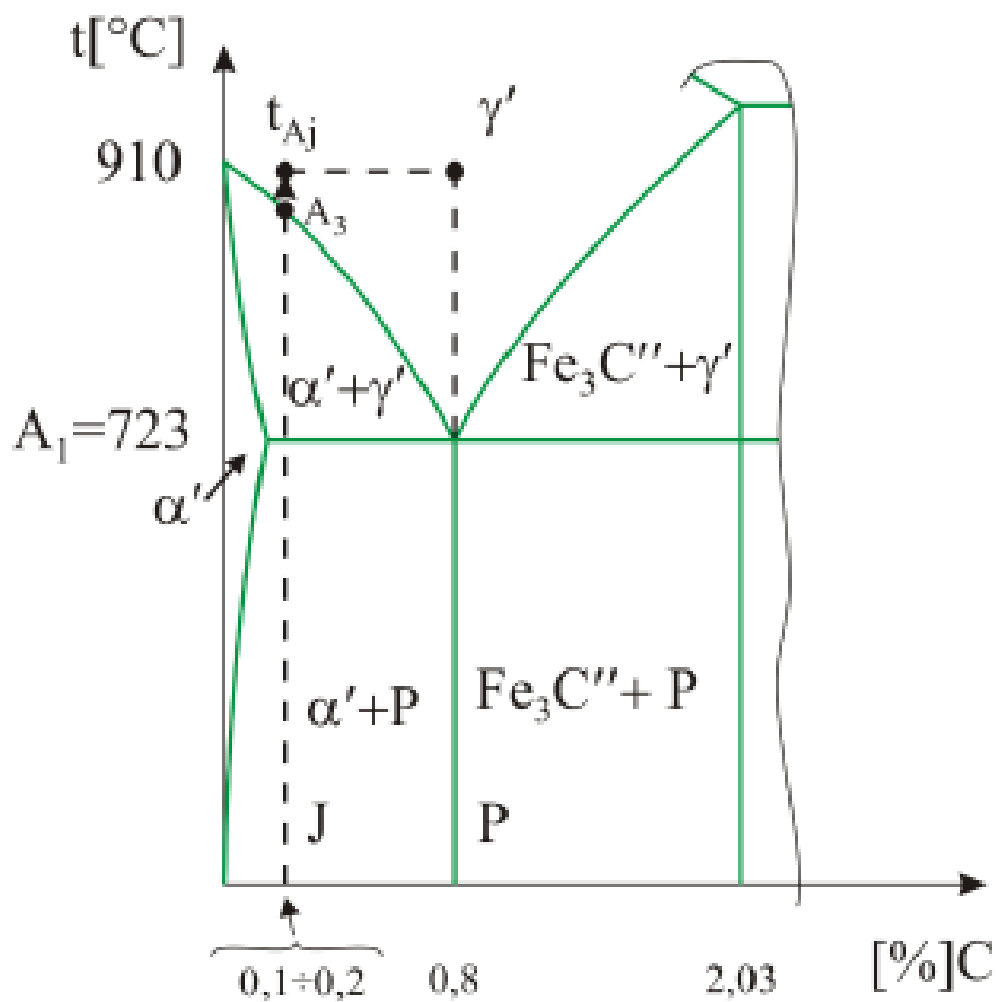
1. Primena za dinamička i udarna opterećenja, zbog žilavog jezgra.
2. Malo deformisanje komada posle kaljenja (tanak sloj martenzita)
3. Delovi zaštićeni od cementacije mogu se i posle kaljenja obrađivati rezanjem.

Cementacija



Šematski prikaz cementacije

UTICAJ LEGIRAJUĆIH ELEMENATA!



KRUPNO ZRNO → SLABA ŽILAVOST

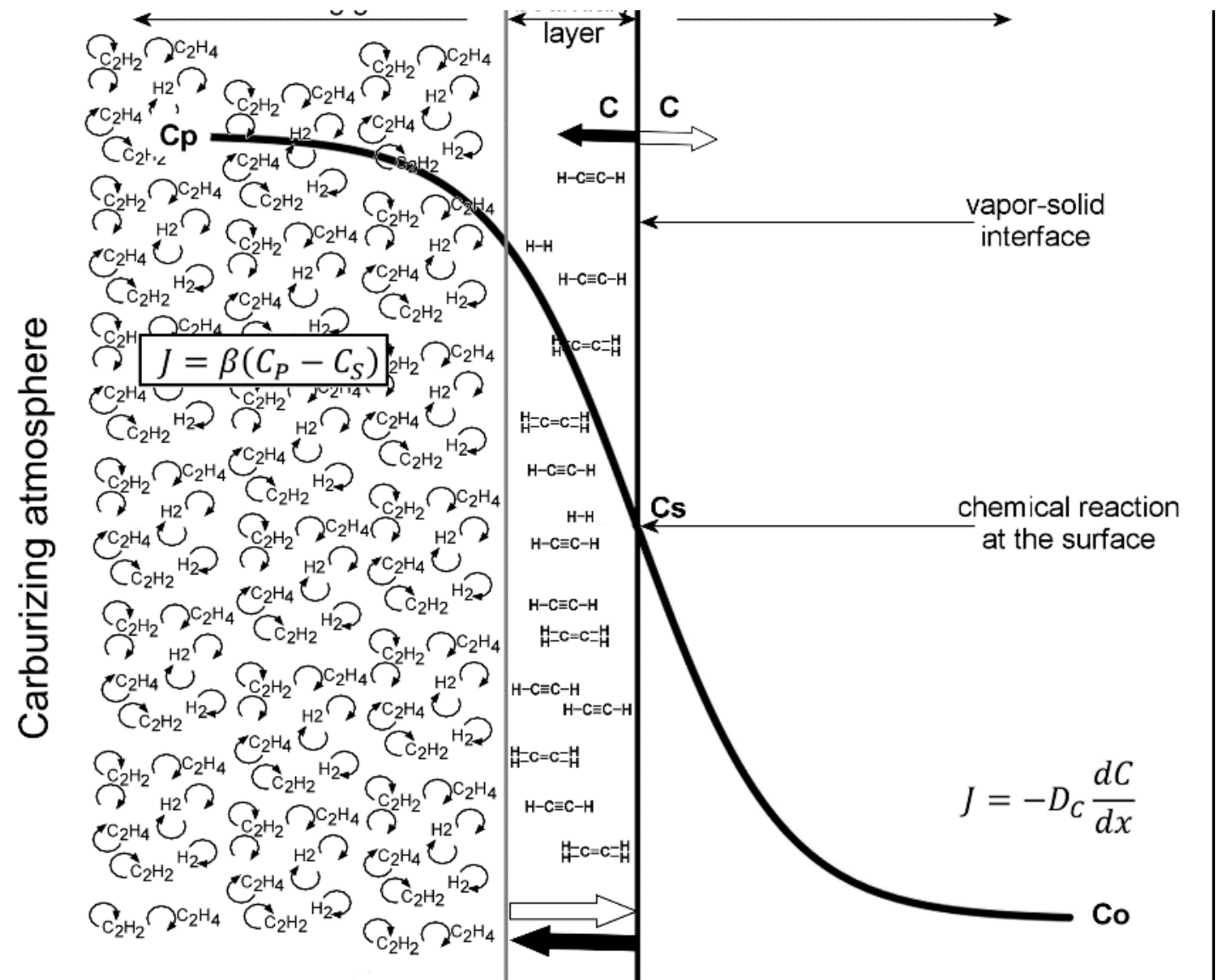
Nedostaci cementacije:

1. Cementirani delovi su primenljivi samo za niže temperature (200°C)
2. U površini veća količina preostalog austenita, zbog više ugljenika.
3. Zbog visoke temperature procesa dolazi do deformacije.

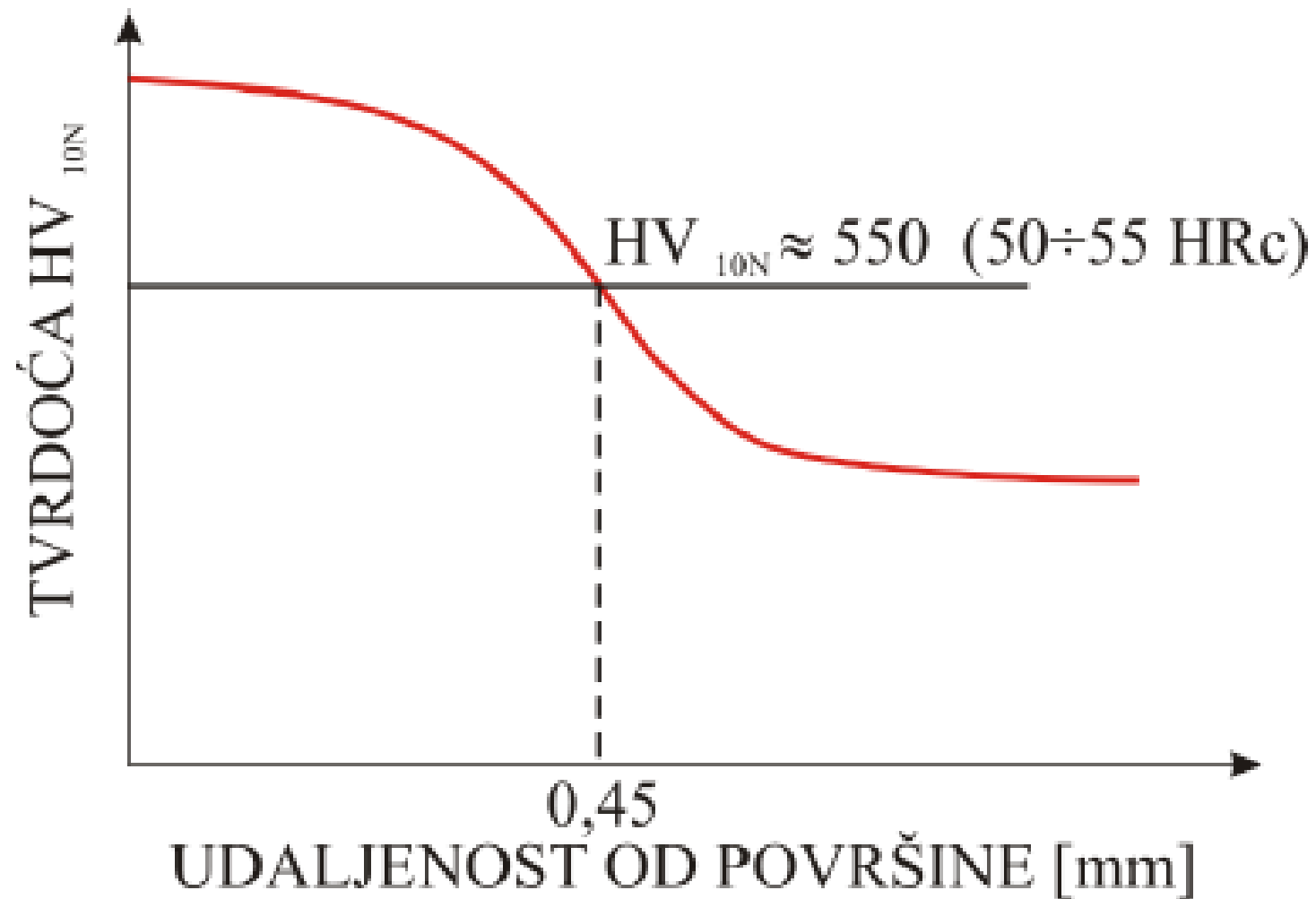
Za vreme naugljeničavanja dešavaju se tri fizičko - hemijska procesa:

- disocijacija ugljenika,
- adsorbcija ugljenika na površini komada i
- difuzija ugljenika od površine ka unutrašnjosti komada.

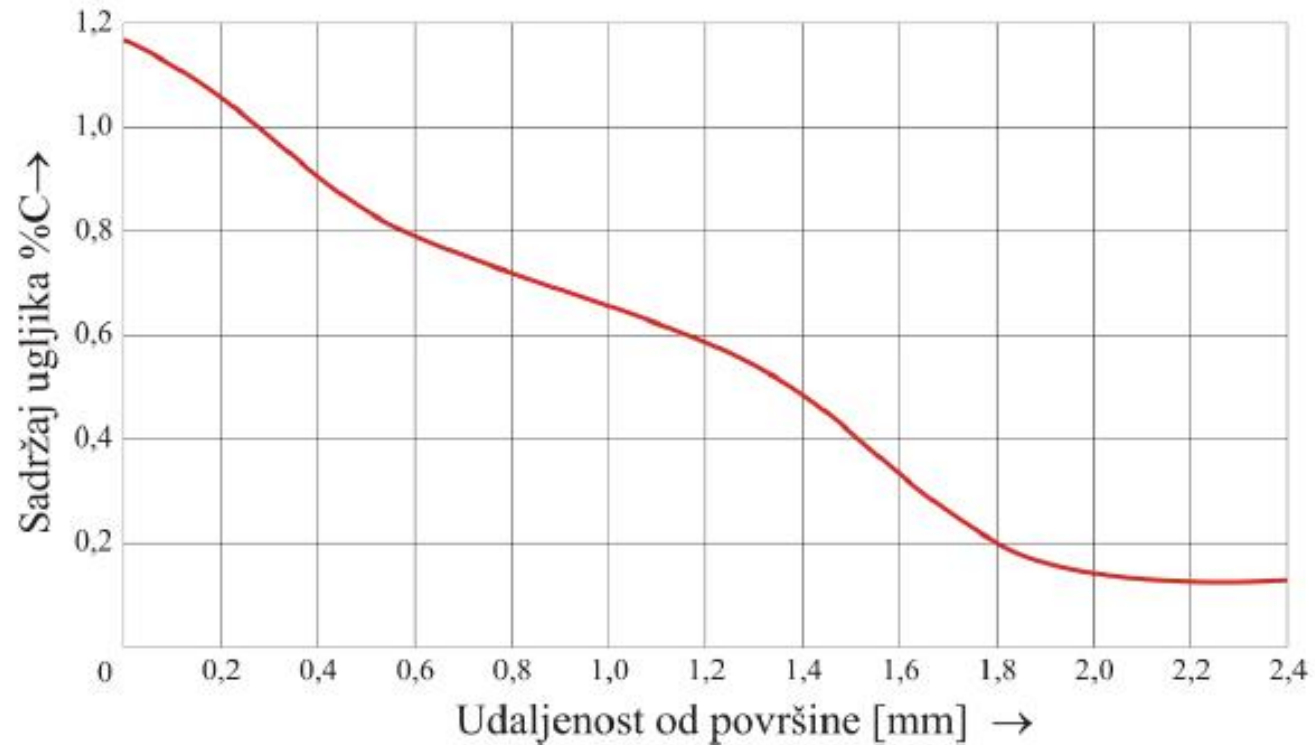
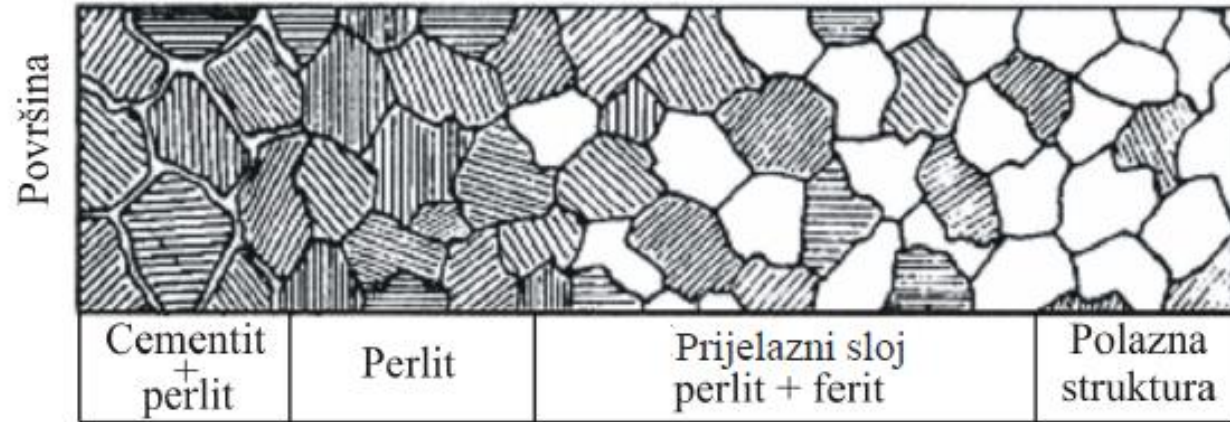
Cementacija



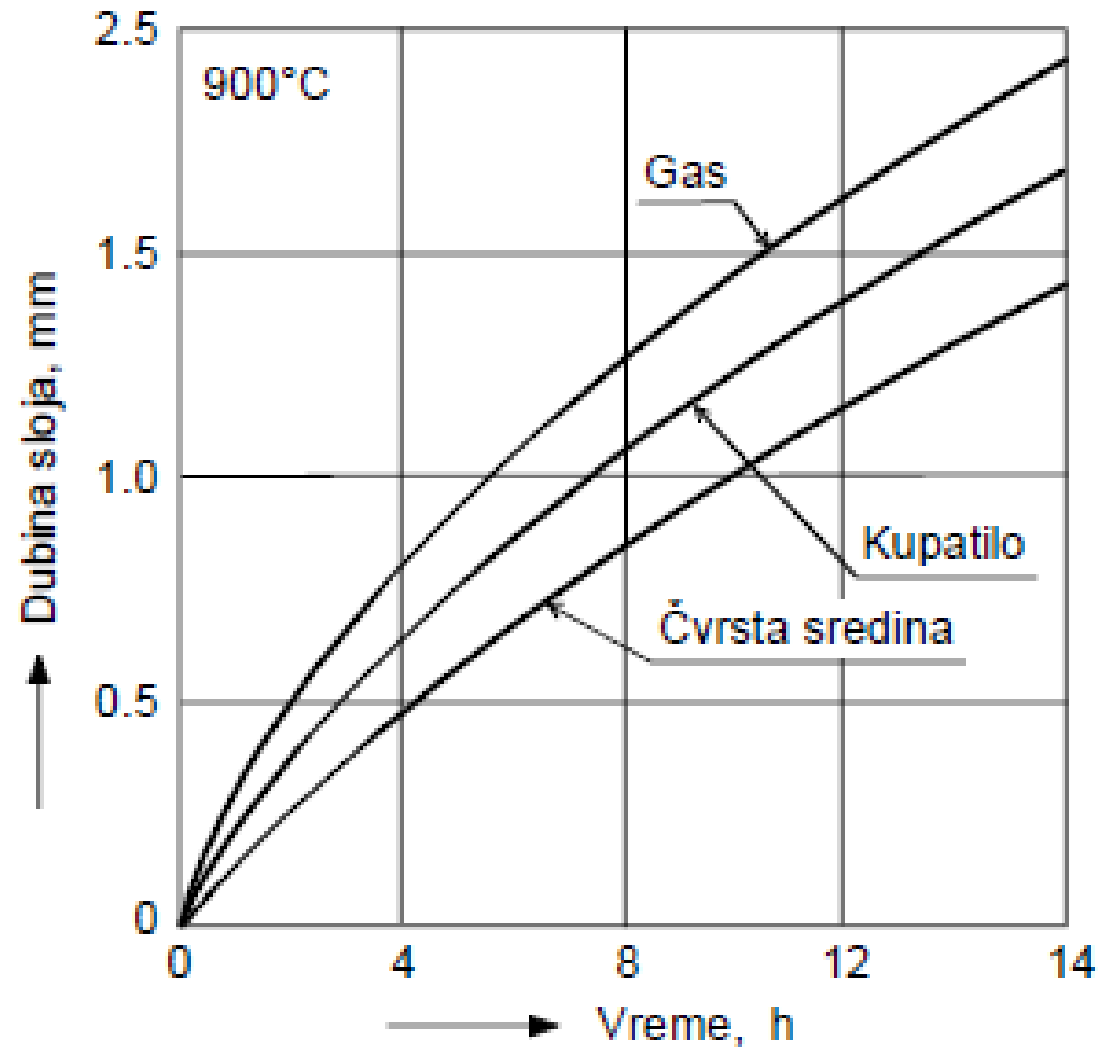
Zavisnost tvrdoće nakon kaljenja naugličenog dela od udaljenosti od površine



Struktura i sadržaj ugljenika naugljeničenog sloja



Uticaj vremena držanja na dubinu naugljeničenog sloja za različita sredstva



Teorija procesa

Odvijaju se tri fizičko-hemijska procesa:

1. disocijacija sredstva za naugljeničenje

Razlaganje hemijskih jedinjenja sa ciljem da se dobiju takve komponente koje će omogućiti adsorpciju ugljenika na površinu čelika

2. adsorpcija ugljenika na površinu komada

Ulaženje atoma ugljenika u rastvor mešovitog kristala:

$$m=f(t, C_A)=\beta(C_A-C_I) \text{ (gr/cm}^2\text{sec)}$$

β -koeficijent adsorpcije (cm/sec)

3. difuzija ugljenika od površine ka unutrašnjosti

Proces kretanja atoma kroz metalnu rešetku metala:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} .$$

C-sadržaj ugljenika (%)

D-koeficijent difuzije (cm^2/sec), $D = D_0 \cdot e^{-Q/RT}$

Cementacija u čvrstom sredstvu

Prednosti pougljeničavanja u čvrstom sredstvu:

- Nije potrebna sofisticirana oprema
- Pogodan za velike i složene predmete i dobijanje dubokih slojeva
- Sporo hlađenje osigurava da predmeti budu mekani

Nedostaci pougljeničavanja u čvrstom sredstvu:

- Radno intenzivan proces
- Nije pogodan za veliku proizvodnju
- Neprilagodljiv u radu i slaba kontrola procesa

Cementacija u rastopima soli

Prednost pougljeničavanja u solima su:

- Jednostavan rad
- Jeftinije investicije
- Brzo zagrevanje čelika na temperaturu soli
- Manje deformacije proizvoda

Nedostaci pougljeničavanja u solima:

- Postupak je radno brz
- Pravilno zbrinjavanje cijanidnog otpada
- Otežano čišćenje složenih predmeta u aktivnim solima
- Otežan transport, čuvanje i upravljanje s otrovnim solima

Cementacija u gasovitom sredstvu

Prednosti naugljeničavanja u gasu:

- Optimizacija procesa naugljeničavanja
- Bolji kvalitet i jednolikost pougljičavanja
- Fleksibilnost kod izbora različitih programa rada
- Mali toplotni naponi
- Mogućnost direktnog kaljenja

Nedostaci naugljeničavanja u gasu:

- Velika investicija u opremu – preporučljiv za visokoserijsku proizvodnju
- Školovani kadar
- Tehnička zaštita
- Održavanje postrojenja

Cementacija u čvrstoj sredini

Proces se sastoji od tri sledeća koraka:

1. Čelik se žari u takvoj sredini u kojoj se oslobađaju atomi ugljenika,
2. Atomi ugljenika dolaze u dodir sa površinom čelika,
3. Atomi ugljenika putem difuzije prodiru u čelik i nastaje sloj bogat ugljenikom.

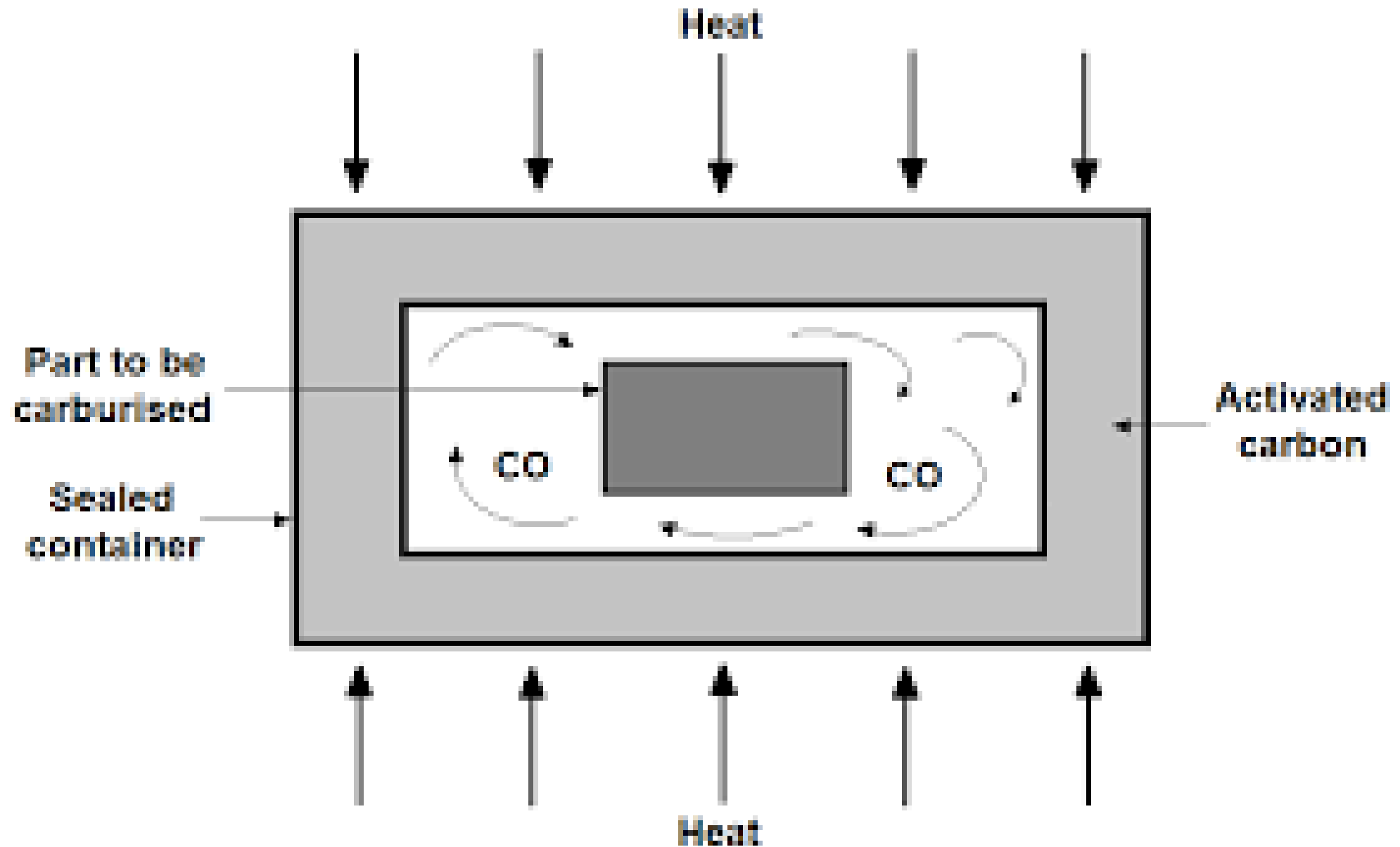
Zbog prisustva uglja ugljen dioksid se redukuje u ugljen monoksid:



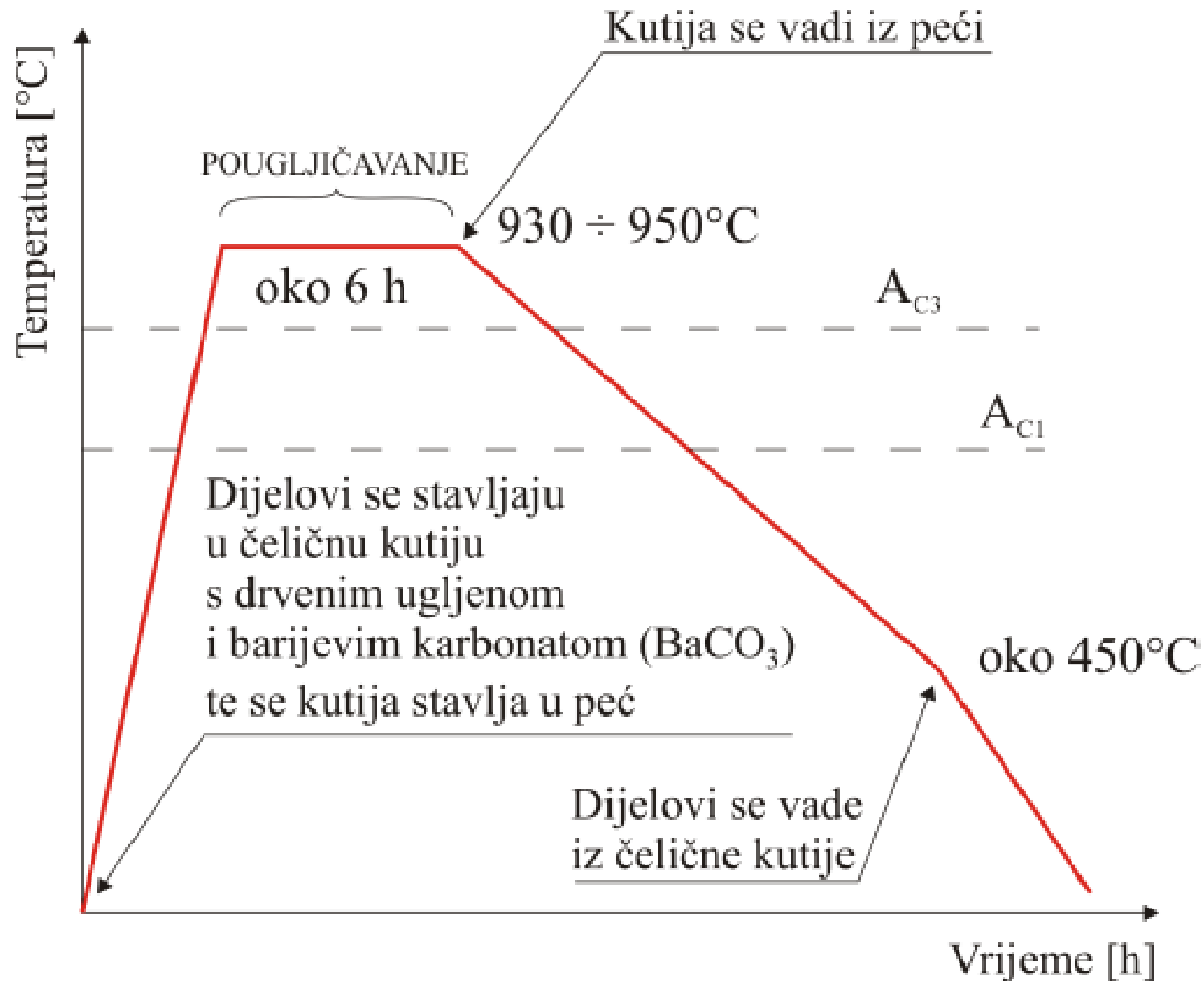
Ugljen monoksid se u dodiru sa površinom čelika razlaže:



Cementacija u čvrstoj sredini



Cementacija u čvrstom sredstvu



Cementacija u rastopima soli (u sonoj kupki)

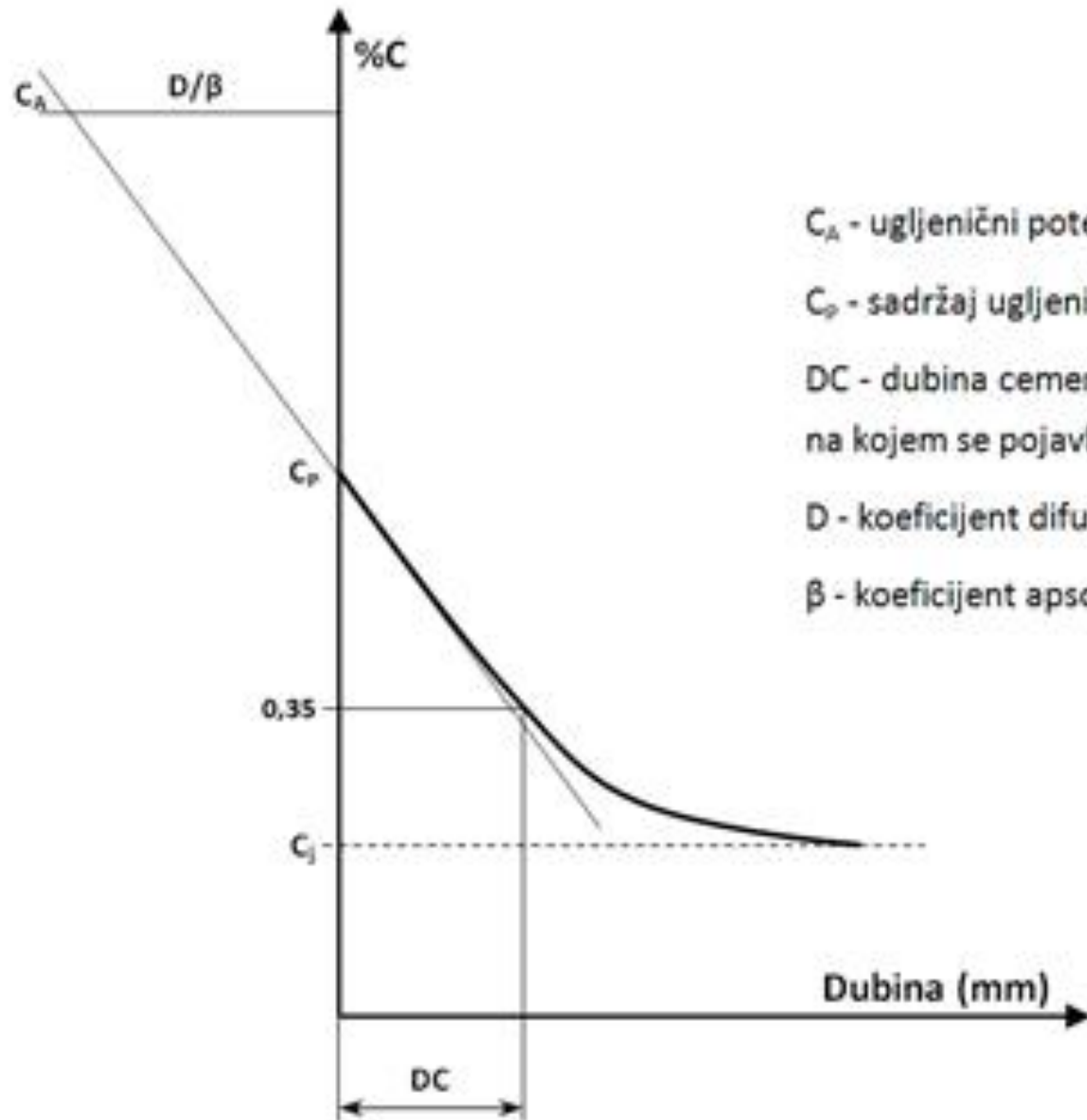
Ovaj postupak ima više prednosti:

1. predmete ne treba upakovati što zahteva mnogo vremena i zbog toga cementacija može da se obavlja u loncu postavljenom u peć. Proces je znatno brži od cementacije u čvrstoj sredini, jer je u soli prenos toplote bolji,
2. vreme zagrevanja u sonoj kupki se može zanemariti u odnosu na potrebno vreme držanja predmeta na temperaturi. Cementacija počinje skoro istovremeno na svim površinama čak i kod složenih oblika, a debljina cementiranog sloja biće jednaka.

Cementacija u gasovitoj sredini

- Glavni sastojci gasa za naugljeničavanje su ugljenmonoksid (CO), zasićeni i nezasićeni ugljovodonici (metan, propan, butan); pri visokoj temperaturi i usled katalitičkog delovanja gvoždja, CO i CH₄ stupaju u reakcije date jednačinama.
- Povišenje temperature potpomaže tok reakcija udesno, tj. naugljeničavanje komada a snižavanje deluje suprotno tj. komad se razugljeničava.
- Sadržaj ugljenika u austenitu koji je u ravnoteži sa gasovitom smesom pri datoj temperaturi, daje tzv. naugljenisavajući potencijal atmosfere ili ugljenični potencijal atmosfere. Što je viši naugljenišući potencijal atmosfere, tim će veći biti sadržaj ugljenika i obrnuto. Pošto površinski slojevi posle cementacije treba da imaju približno eutektoidni sastav, neophodno je kontrolisati atmosferu. Najbrža je kontrola pomoću tzv. tačke orošavanja

Raspored sadržaja ugljenika



C_A - ugljenični potencijal atmosfere

C_p - sadržaj ugljenika na površini cementiranog uzorka

DC - dubina cementacije - rastojanje od površine u mm
na kojem se pojavljuje sadržaj C jednak 0.35

D - koeficijent difuzije cm^2/s

β - koeficijent apsorpcije cm/s

- Na osnovu sličnosti trouglova može se napisati:

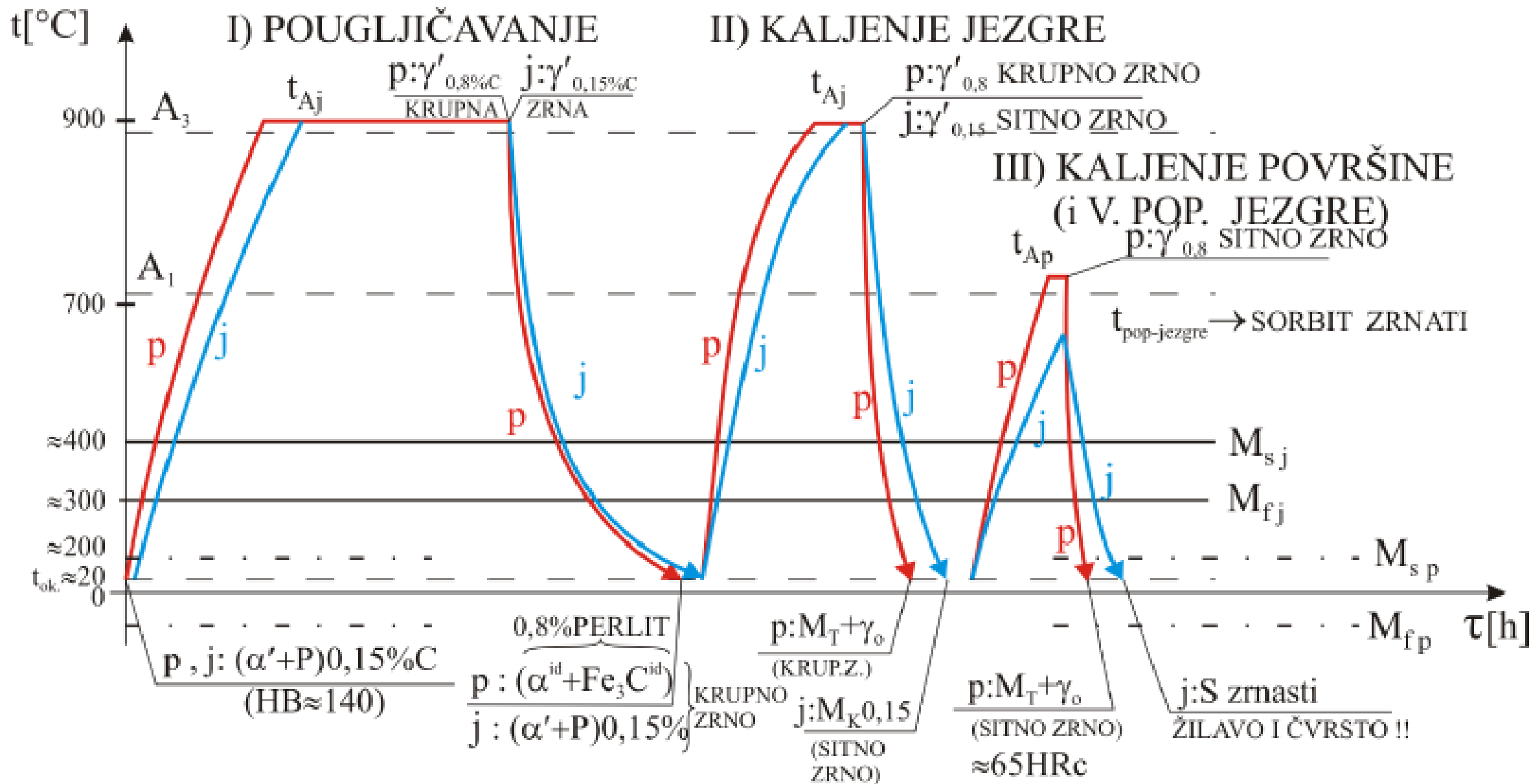
$$\frac{C_A - C_P}{\frac{D}{\beta}} = \frac{C_P - 0.35}{DC \rightarrow \max 5mm}$$

- Dubina cementacije DC definiše se kao rastojanje od površine komada do mesta na kojem počinje osetan porast tvrdoće u odnosu na tvrdoću jezgra. Prema raznim autorima ovo mesto se najčešće nalazi na rastojanjima na kojima sadržaj ugljenika ima vrednosti 0.3 do 0.4%. Za analitičko i grafičko rešavanje zadatka može se približno usvojiti da je DC ono rastojanje na kome je sadržaj ugljenika jednak 0.35%.
- Posle procesa cementacije potrebno je izvršiti termičku obradu. Koja vrsta termičke obrade će se primeniti zavisi od željenih osobina, odnosno od funkcije radnog predmeta.

Termičke obrade posle cementacije

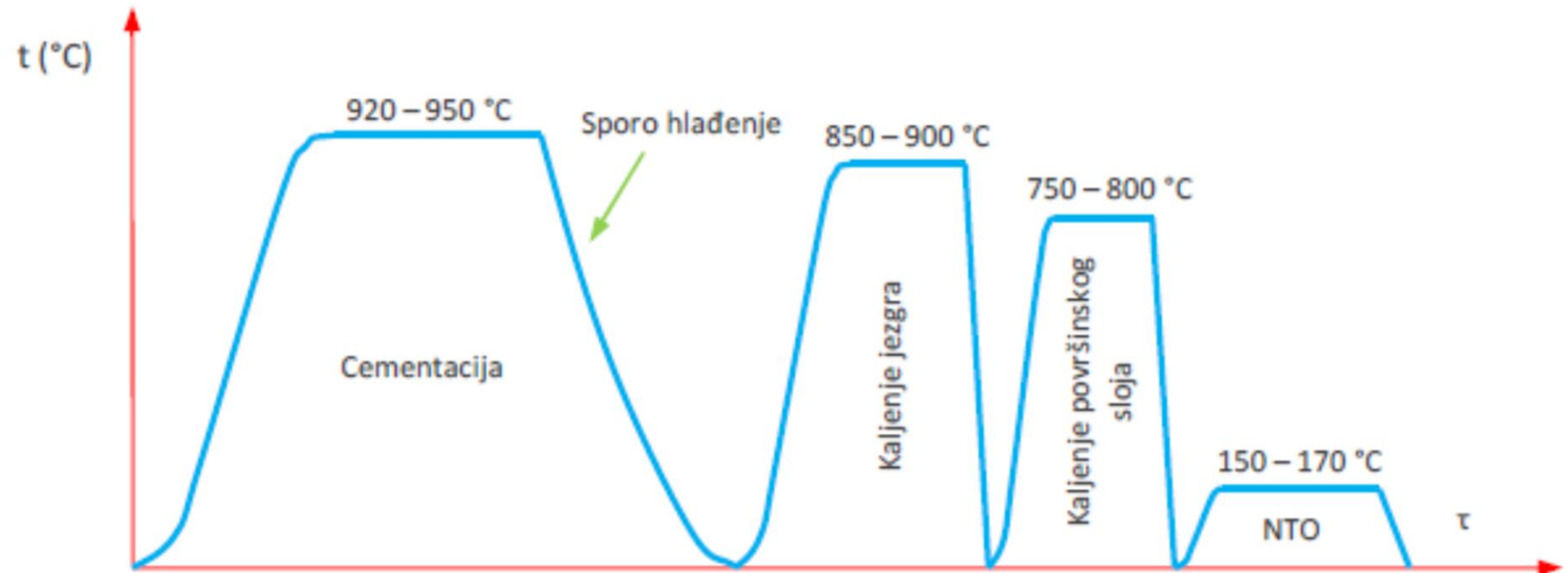
- Redosled i parametri postupka termičke obrade utiču na završnu strukturu i osobine cementiranih delova.
- Ako se struktura na temperaturi cementacije, po završetku naugljeničavanja, sastoji od nezasićenog austenita, dobiće se nakon kaljenja struktura M+Az. Što je veći %C, biće više Az.
- Nakon cementacije obavezno se vrši kaljenje. Način i broj kaljenja zavise od zahtevanih osobina. Ukoliko se zahtevaju visoke mehaničke osobine jezgra uz visoku otpornost površine na habanje vrše se dva kaljenja
- Prvo kaljenje obavlja se sa temperature koja odgovara jezgru, a drugo sa temperature koja odgovara površini. Kako se u jezgru nalazi manji procenat ugljenika (oko 0.2 %C, zavisno do konkretnog čelika) to je temperatura kaljenja viša nego za površinu u kojoj je povećan udeo ugljenika.

Kaljenje nakon naugljeničavanja



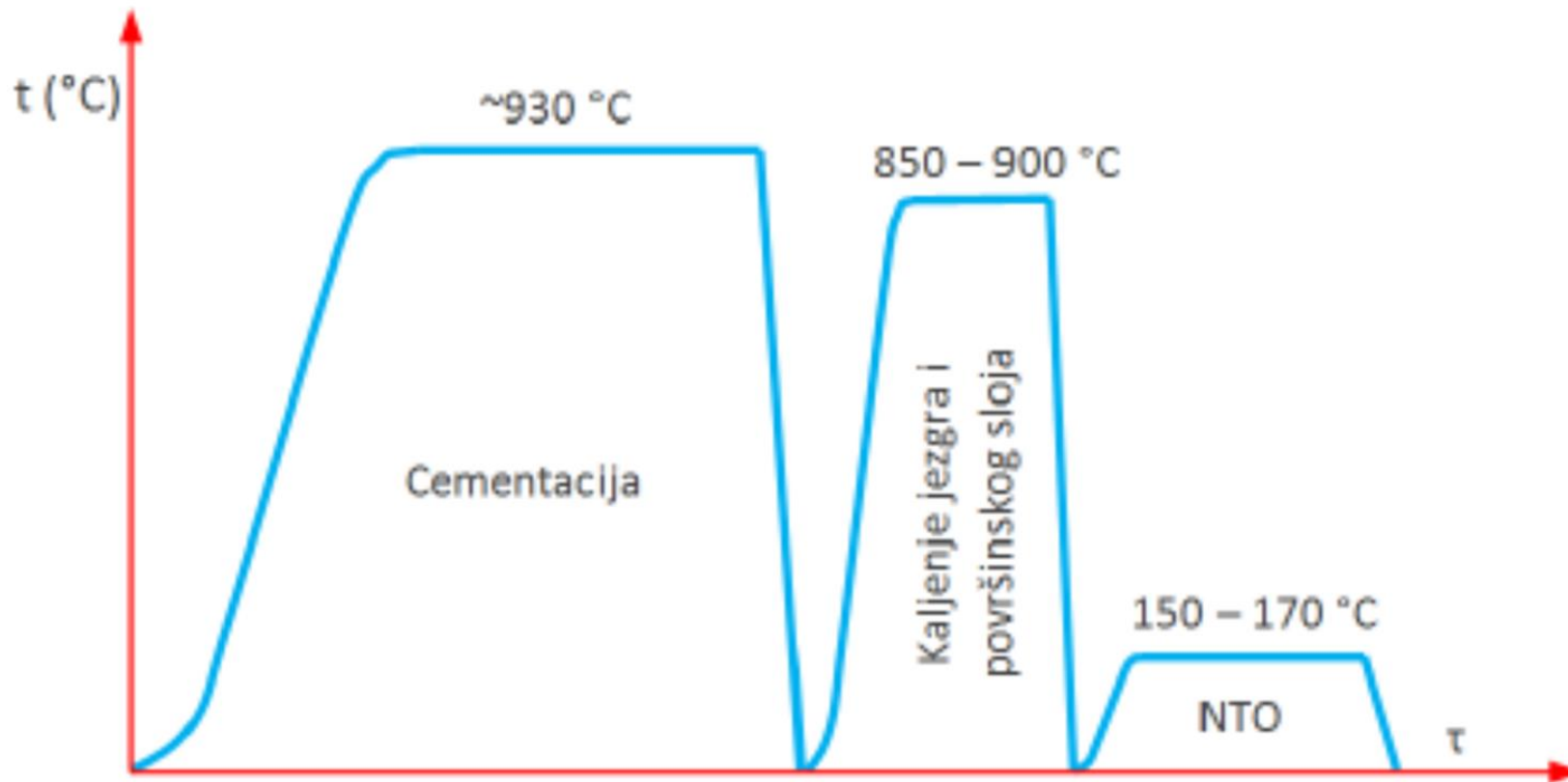
Grafikon T.O. sporo hladjenih komada posle cementacije sa dvostrukim kaljenjem

- Nakon cementacije obavezno se vrši kaljenje. Način i broj kaljenja zavise od zahtevanih osobina. Ukoliko se zahtevaju visoke mehaničke osobine jezgra uz visoku otpornost površine na habanje vrše se dva kaljenja. Prvo kaljenje obavlja se sa temperature koja odgovara jezgru, a drugo sa temperature koja odgovara površini. Kako se u jezgru nalazi manji procenat ugljenika (oko 0.2 %C, zavisno do konkretnog čelika) to je temperatura kaljenja viša nego za površinu u kojoj je povećan udeo ugljenika.



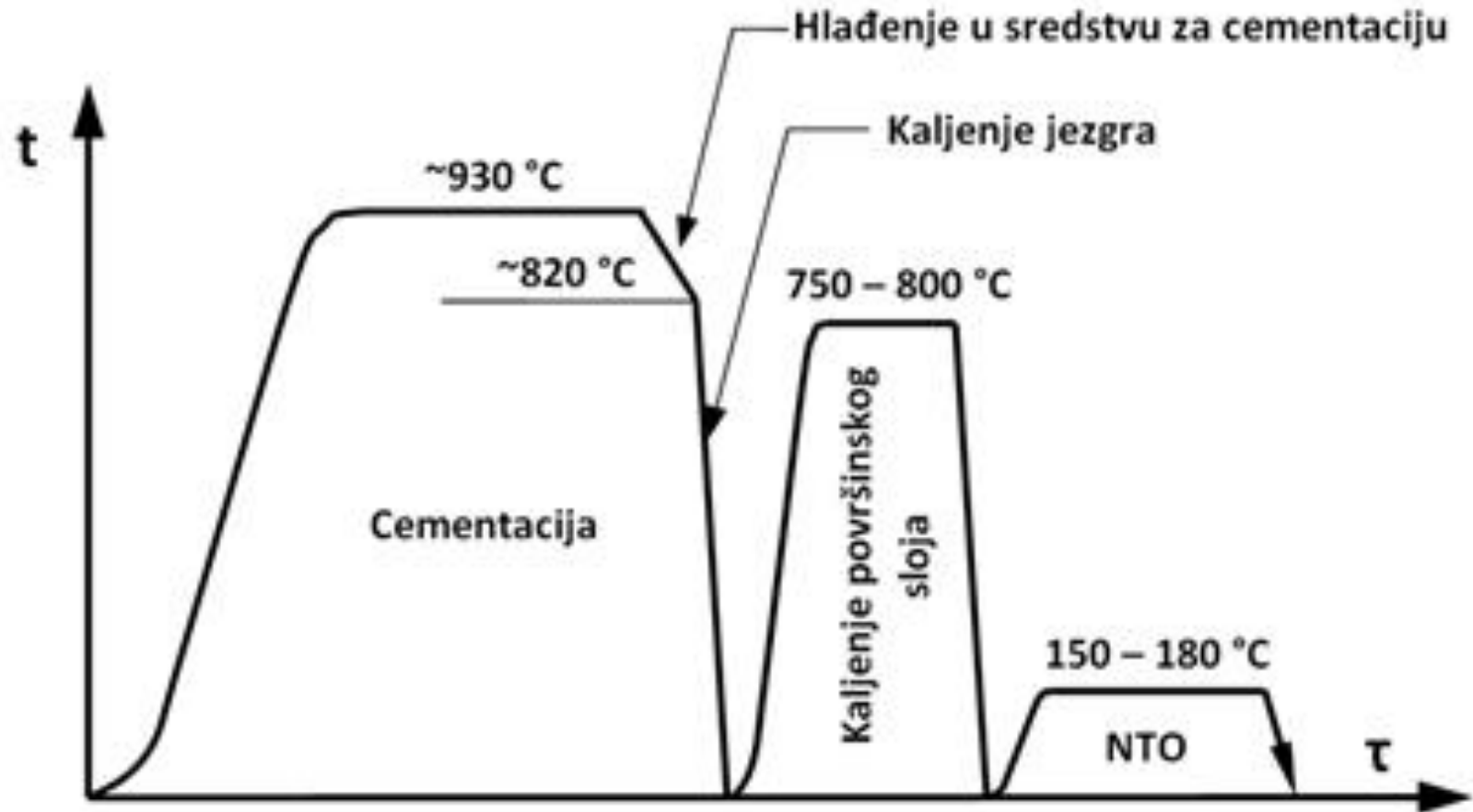
Cementacija u kombinaciji sa jednim kaljenjem, sa temperature koja odgovara jezgru

- Ukoliko se zahtevaju visoke mehaničke osobine jezgra uz nešto manje strože zahteve za površinu, radi se samo jedno kaljenje koje više odgovara jezgru. U principu kalicе se i površina i jezgro, s tim da se površina tada kalicе sa više temperature, pa se ne postižu najviša tvrdoća i čvrstoća.



Dvostruko kaljenje posle cementacije, pri čemu je prvo kaljenje sa temperatruue cementacije

- moguće je samo ako se tok naugljeničavanja može strogo kontrolisati;
- pored racionalnosti ovom postupku se pripisuje i smanjena količina zaostalog austenita.

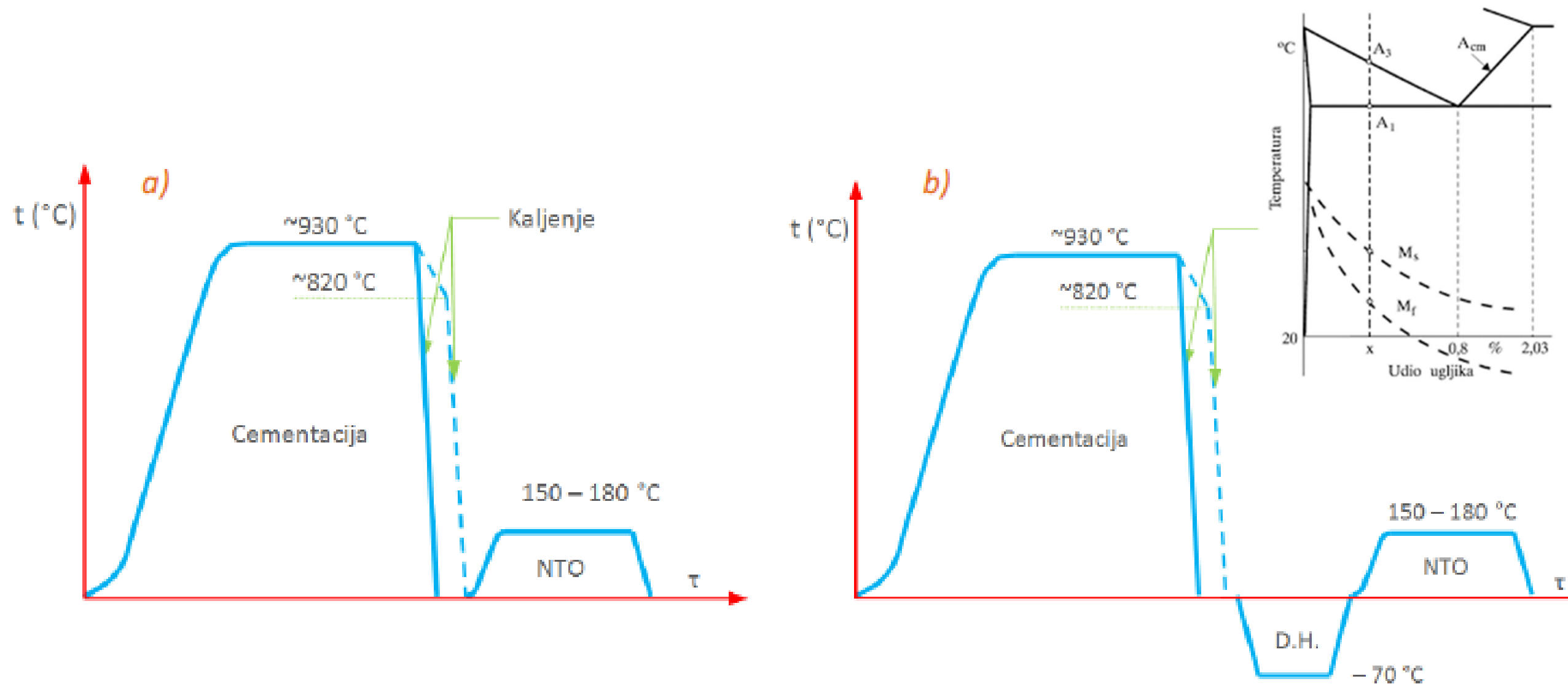


Masovna i velikoserijska proizvodnja

- Ukoliko se radi o masovnoj proizvodnji sitnijih delova, vrši se samo jedno kaljenje. Tada se delovi nakon cementacije ne hlade do sobne temperature, već do temperature kaljenja, nakon čega se odmah kale u odgovarajućem rashladnom sredstvu. Temperatura kaljenja odgovara više površini nego jezgru koga u sitnim radnim predmetima uglavnom kao i da nema.
- Nedostatak prikazanog postupka termičke obrade su krupnozrno jezgro i veća količina zaostalog austenita u tvrdom sloju. Smanjenje količine zaostalog austenita može se postići dubokim hlađenjem (mešavina benzina i suvog leda-CO₂).

Kaljenje neposredno nakon cementacije

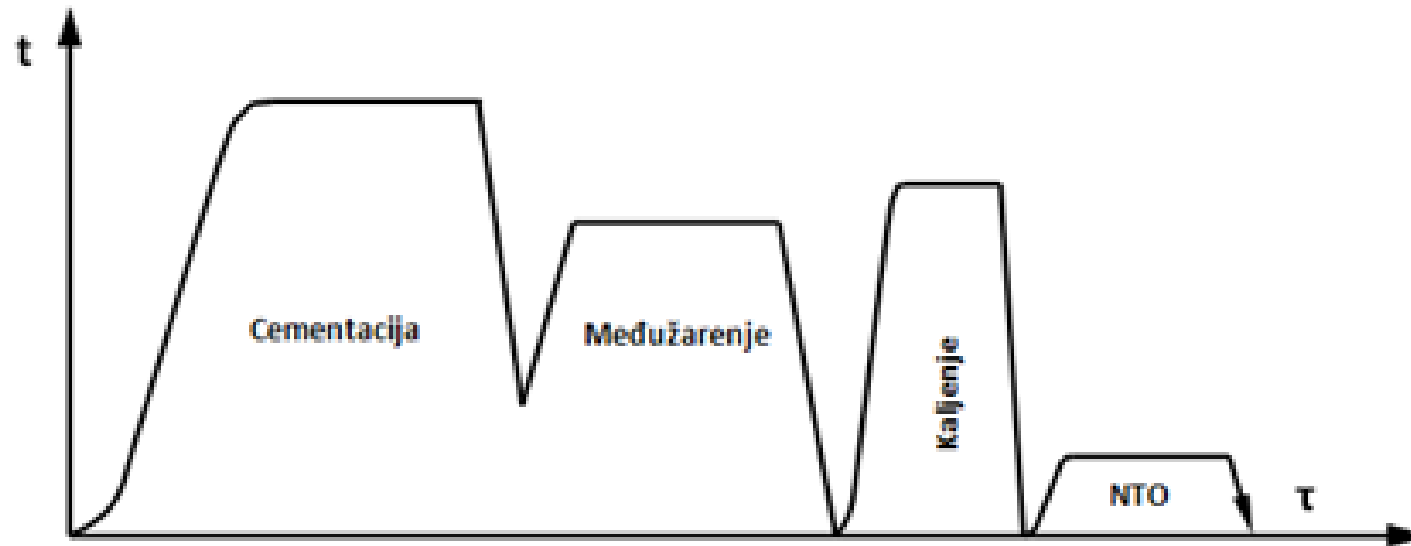
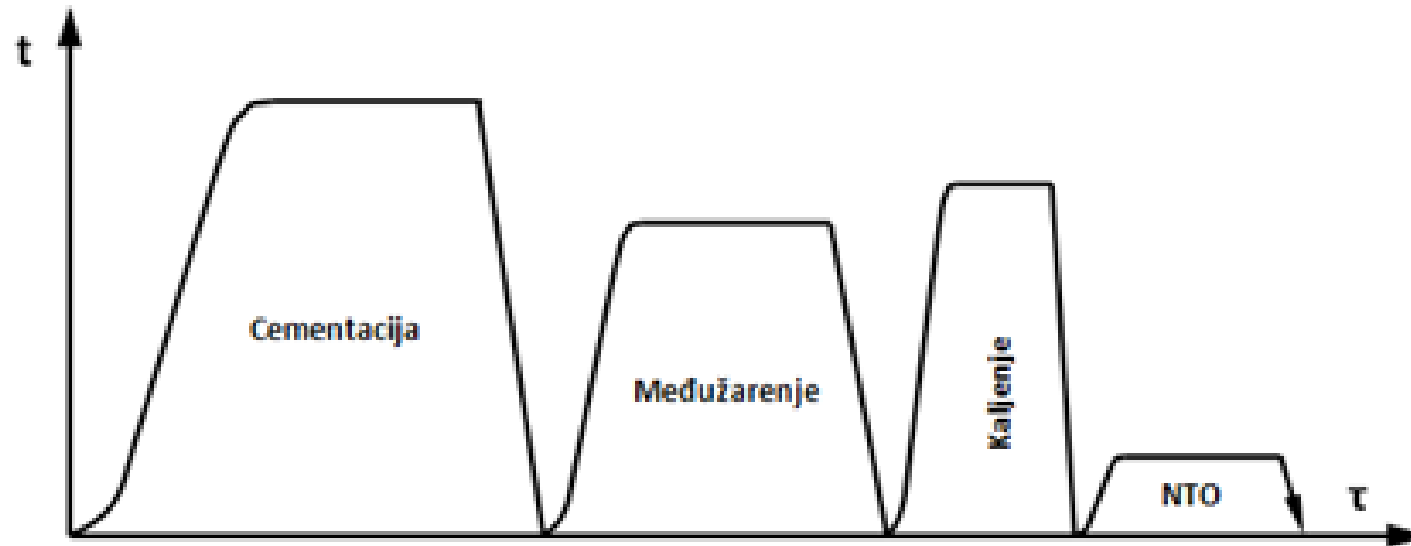
a) običan postupak, b) postupak sa dubokim hlađenjem



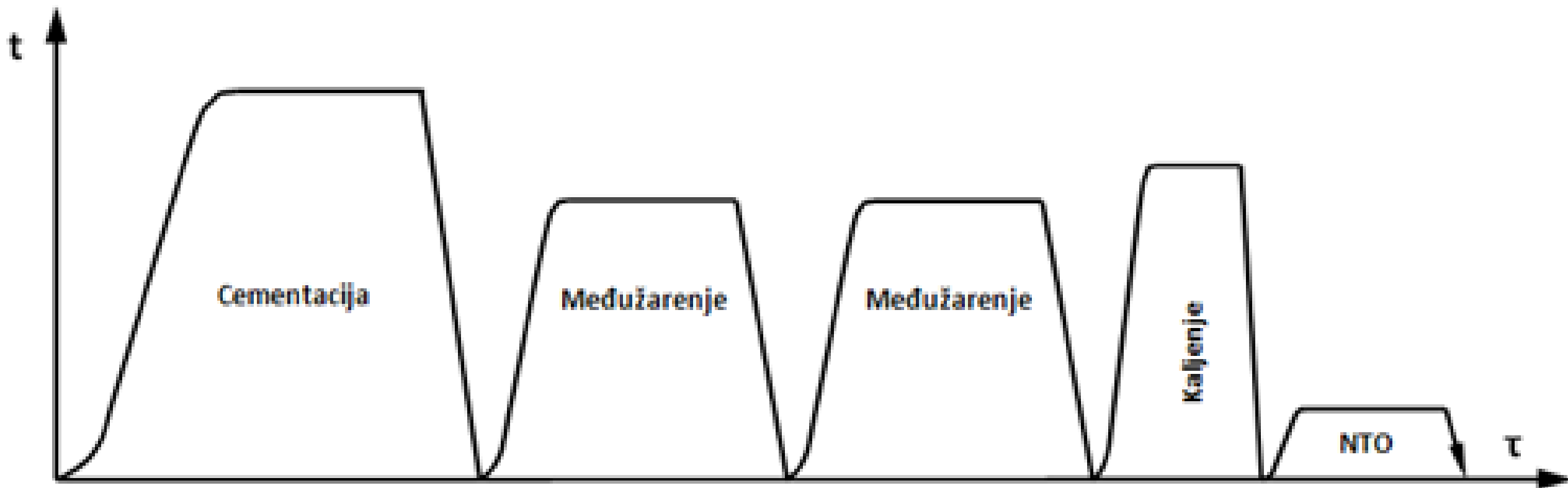
Međužarenja

- Ako legirajući elementi u čeliku **uvećavaju količinu preostalog austenita** posle kaljenja tvrdoća će biti mala (45 do 55 HRC). U ovom slučaju se, umesto dubokog hlađenja, sa većom sigurnošću primenjuje međužarenje koje se obavlja na temperaturi između 600 i 650 °C u trajanju od dva do šest časova. Cilj je izdvajanje fino dispergovanih karbida iz rastvora, čime će rastvor osiromašiti u sadržaju ugljenika i legirajućih elemenata. Naknadnim zagrevanjem za kaljenje nastaje manje legirani austenit, pa je dejstvo legirajućih elemenata na stabilizaciju austenita manje. Ovakvo međužarenje se često obavlja dva puta. Grafikoni tri varijante ovog postupka prikazani su na slici.
- Ovo je kod pojedinačne proizvodnje, velikih, legiranih komada.

Međužarenja



Međužarenja



Zaštita površina

- Površine komada koje neće biti cementirane se moraju zaštititi nekom od metoda.
- Kod čvrstog sredstva: bakarisanje, prekrivanje aluminijumom, metalni oklop, zaštita navoja vijkom, premazi...t
- Kod gasovitog sredstva: premazi

Čelici za cementaciju

- Sadrže od 0.08 do 0.35 %C, a najčešće 0.15 do 0.2 %C. Ugljenik ima presudan uticaj na obrazovanje strukture jezgra komada.

Ugljenični čelici za cementaciju

- Imaju malu prokaljivost pa se mogu primeniti kod delova malih dimenzija. Zbog velike brzine hlađenja deformacije pri kaljenju su najveće. Jezgro ima malu čvrstoću pa se ugljenični čelici za cementaciju mogu primenjivati samo za manje opterećene delove. U ovu grupu spadaju čelici: Č 1120, Č 1121, Č 1220, Č 1221.
- Tvrdća posle cementacije i kaljenja kreće se od 60 do 65 HRC, stin da se za tvrdoće veće od 60 HRC smanjuje otpornost na habanje. Tvrdće su postojane do 200 °C.
- Najvažnija osobina je otpornost na habanje, dok su mehaničke osobine jezgra relativno niske, a zbog male prokaljivosti čelika, veoma zavise od dimenzija.

Čelici za cementaciju

- Legirani čelici za cementaciju dele se na: hromne, niklove, hromno – manganske, hrom – mangan – molibdenske, hrom – niklove, hrom – mangan – titanove i hrom – mangan – borne.

Hromni čelici (Č 4120)

- Veća prokaljivost uz manju kritičnu brzinu hlađenja pri kaljenju što omogućuje primenu blažeg sredstva za kaljenje (ulje) - pogodan za komade komplikovanih ili nepogodnih oblika za kaljenje kod kojih treba umanjiti deformisanje. Prisustvo Cr i karbida Cr u površinskom sloju daje povećanu otpornost na habanje, a omogućena je i veća dubina cementiranog sloja. Visoke mehaničke osobine jezgra samo kod komada manjih preseka. Primena za tankozide komade i komade malih dimenzija: osovinice, bregaste ploče, merne instrumente, tvrde čaure itd.

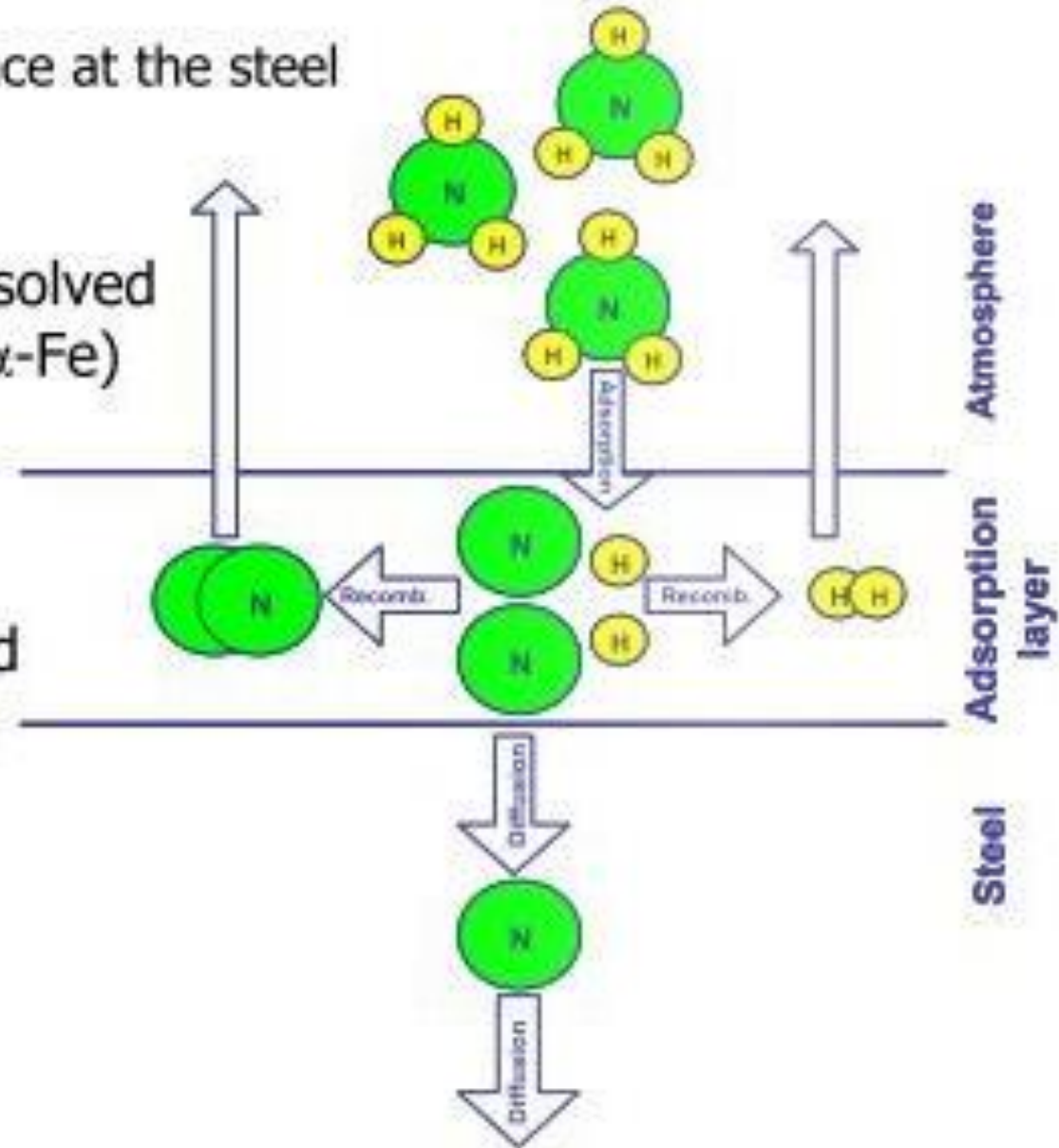
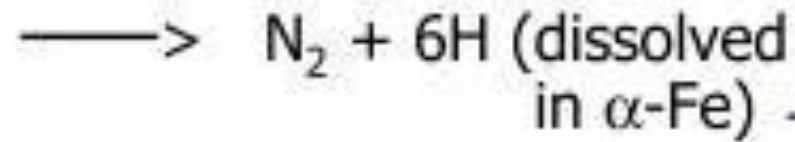
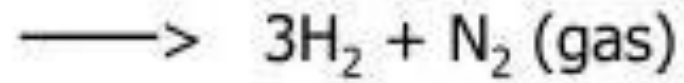
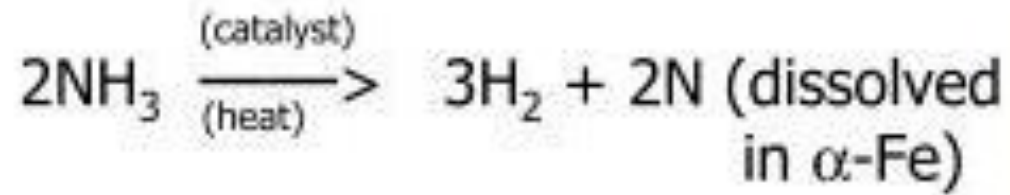
Nitriranje

Nitriranje

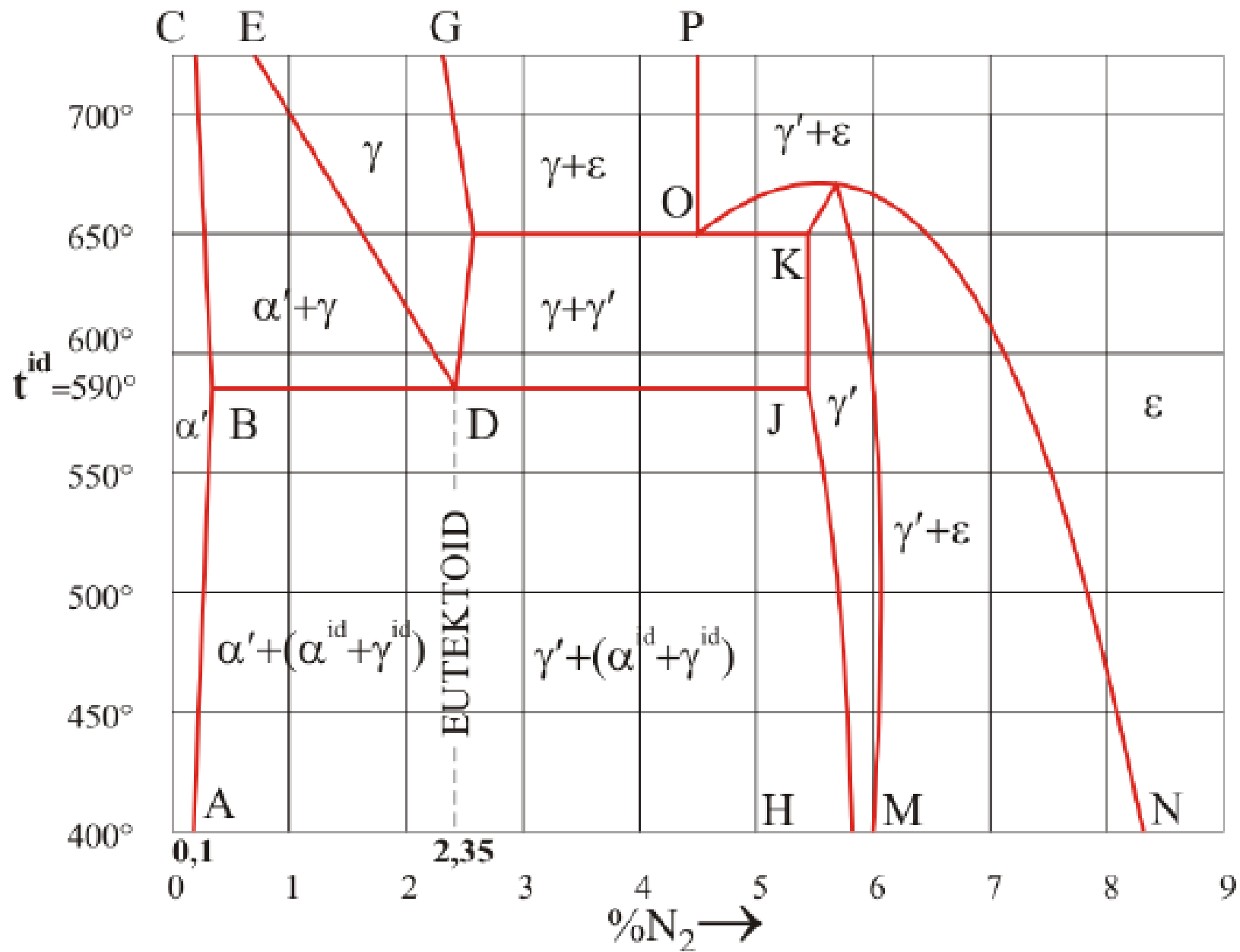
- Uvođenje azota (N) u površinski sloj čelika ili odlivaka od SL, naziva se nitriranje. Azot kao legirajući element u čeliku se veoma slično ponaša kao ugljenik. Razlike su pre svega u nižoj temperaturi A1, kod Fe-N sistema, i većoj rastvorljivosti azota u α -željezu (feritu). U principu pri nitriranju se dobija α -faza, azota u željezu tj. čvrst rastvor azota u feritu, koji pri 591°C, rastvara 0.42%N.
- Nitriranje se može provoditi u prašku, solnim kupkama (npr. postupak TENIFER), gasu i u plazmi ionizovanih gasova.
- Postoje tri nitrida u sistemu Fe-N:
 1. Fe₄N - γ' faza (PCK)
 2. Fe₂₋₃N - ϵ faza, (Heksagonalna rešetka)
 3. Fe₂N – ξ faza (nitriranje u čistom amonijakau)
- $N \rightarrow (\epsilon)(\gamma' + \epsilon)(\gamma')(E + \gamma')(\alpha + E)(\alpha) \leftarrow$ jezgro

Nitriranje

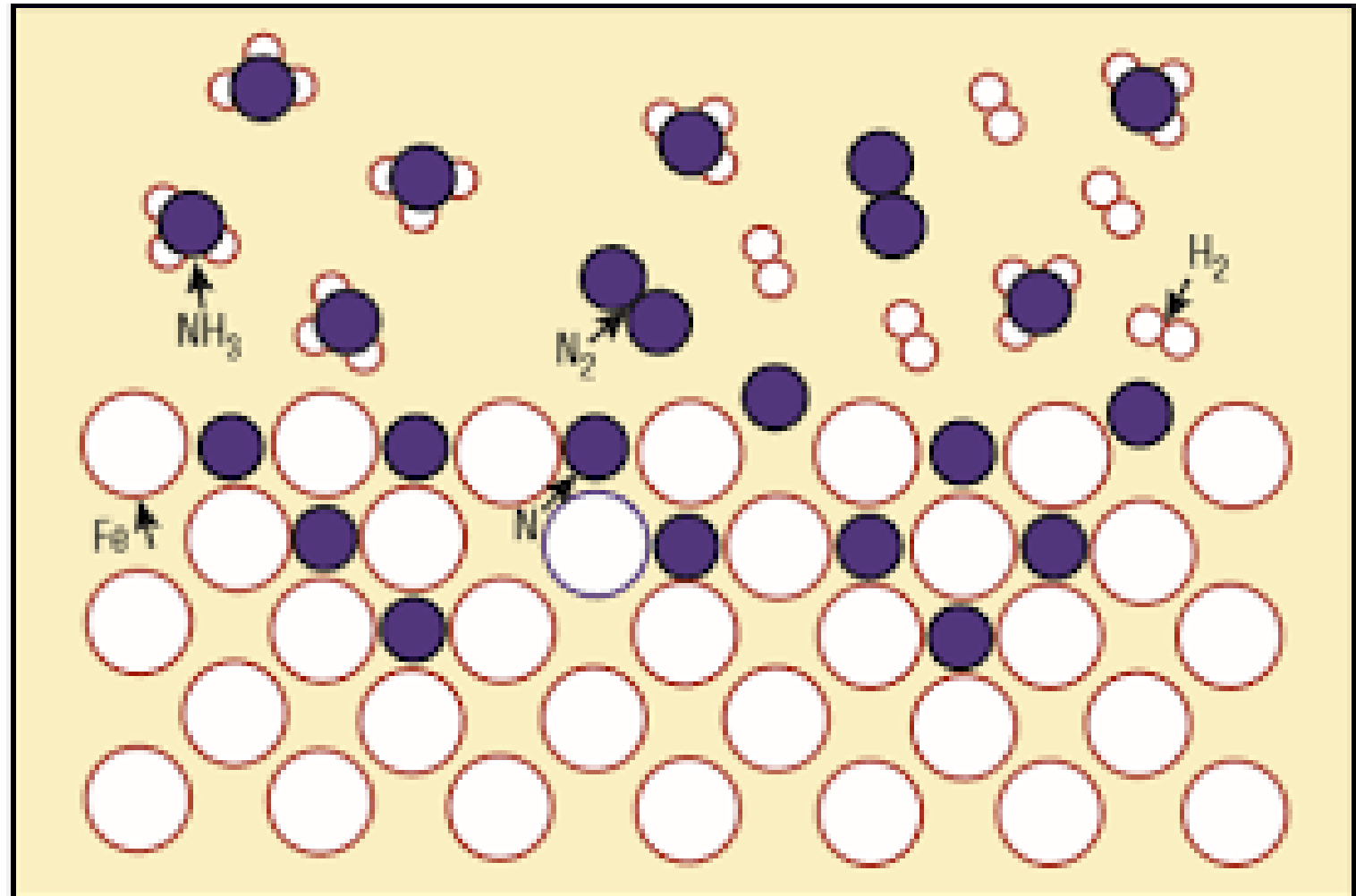
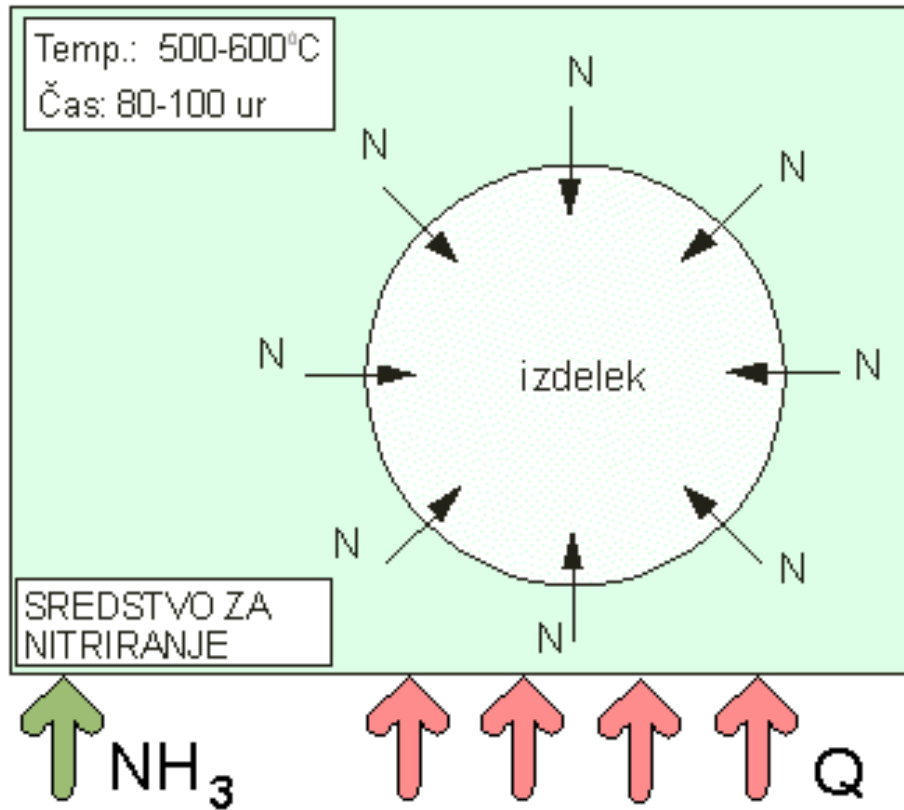
Possible reactions taking place at the steel surface:



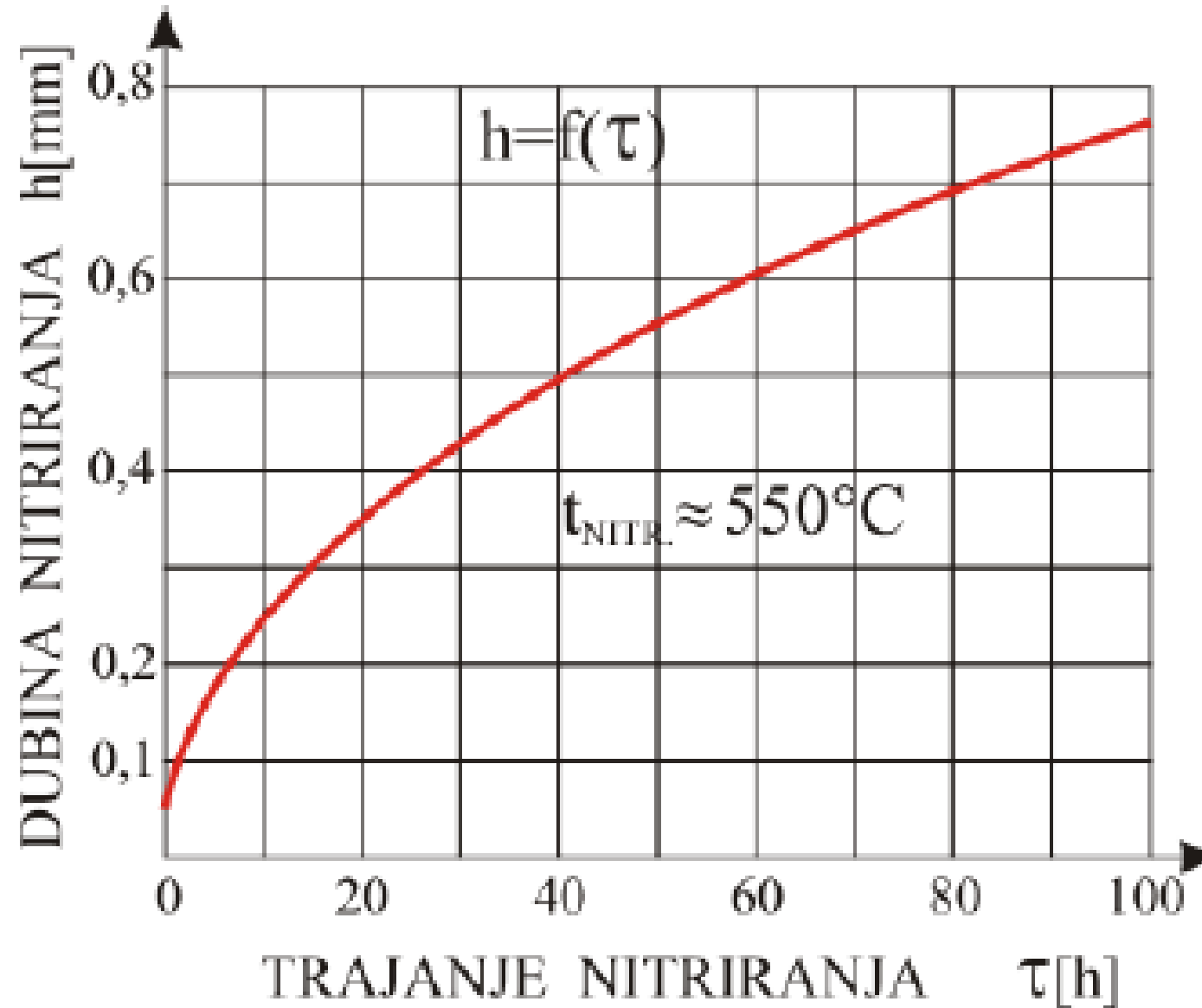
Dijagram stanja Fe-N₂



Nitriranje



Dijagram trajanja procesa nitriranja

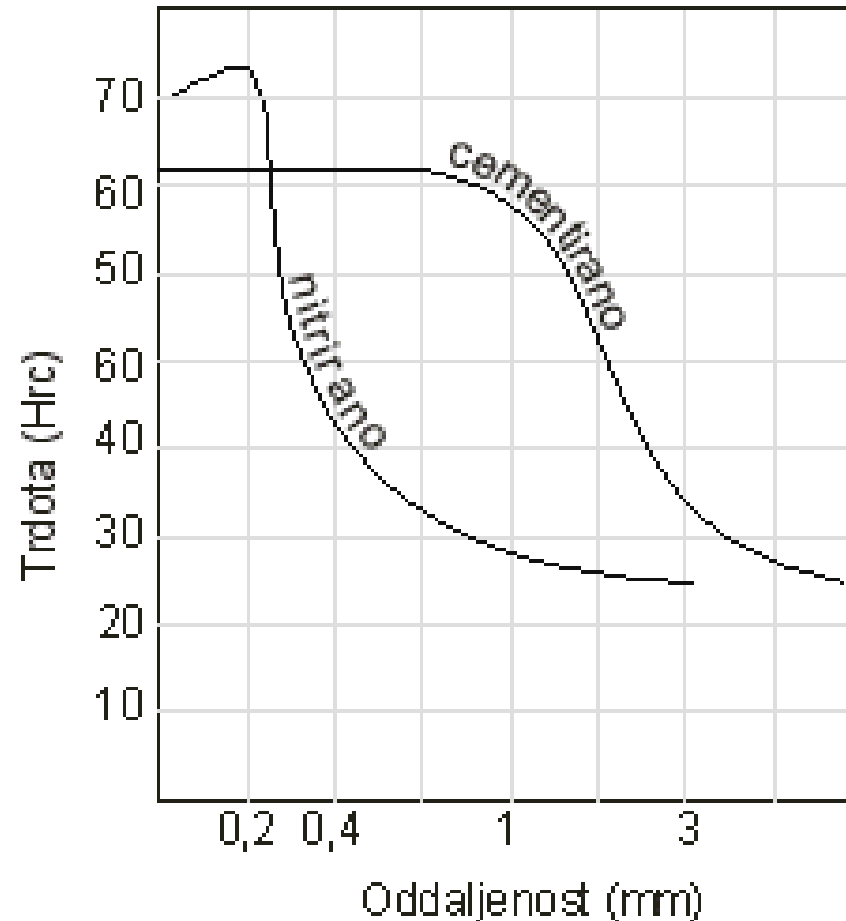


Osnovne karakteristike:

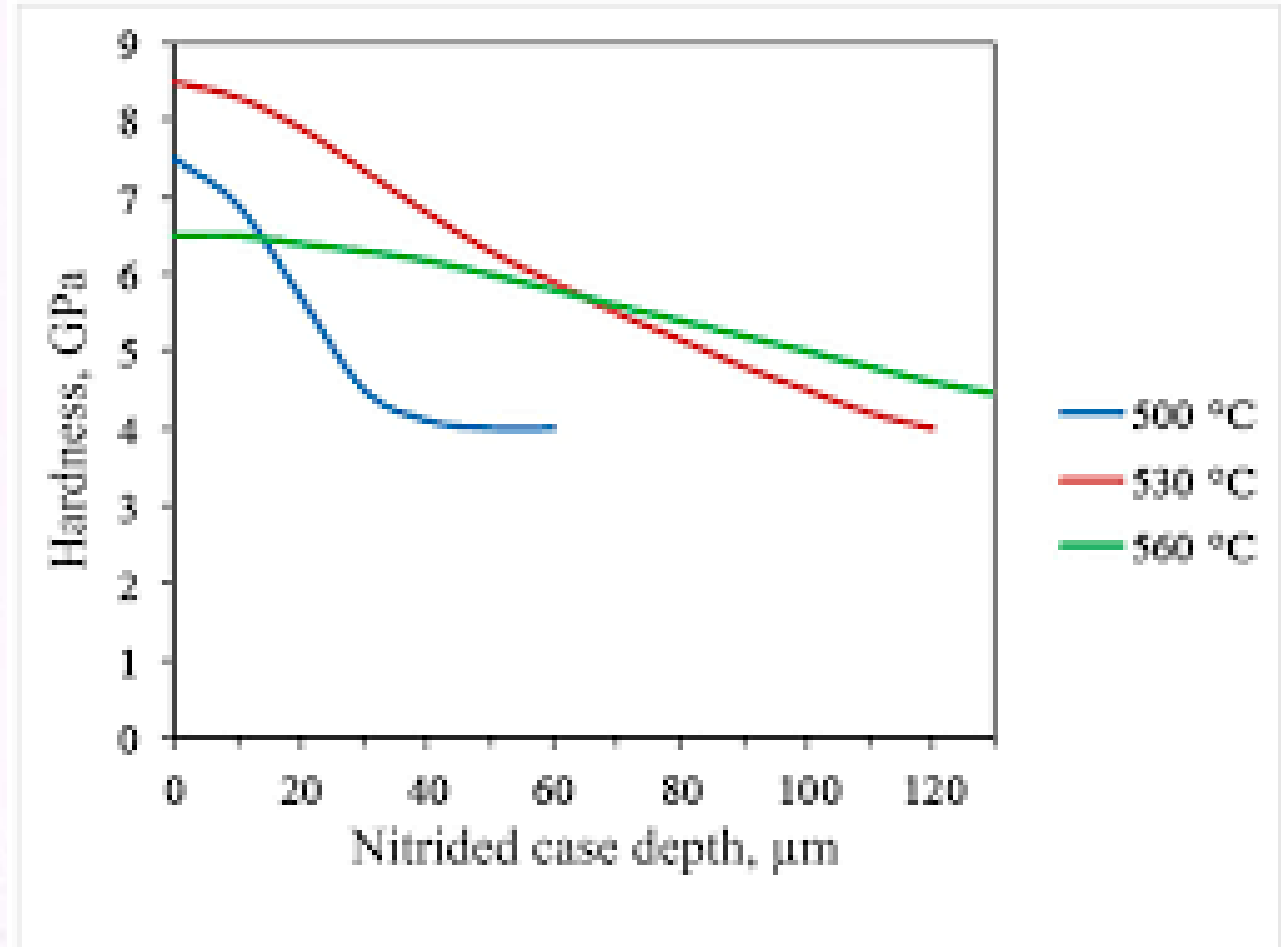
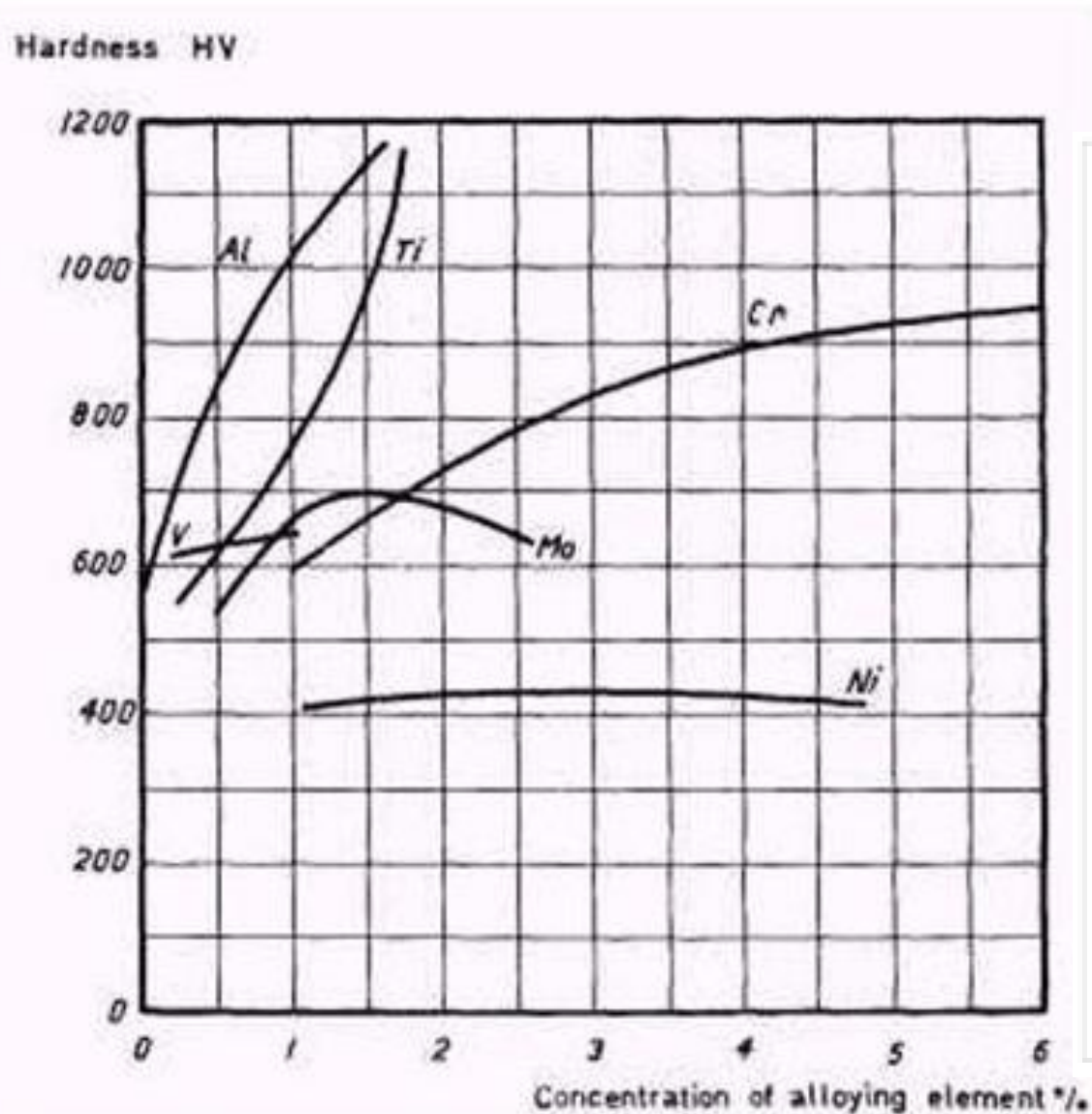
- visoka tvrdoća (znatno veća nego kod martenzita) i odlična otpornost na habanje;
- za razliku od tvrdoće ostvarene martenzitnom strukturom, tvrdoća nitriranog sloja postojana je i na višim temperaturama (500-550°C);
- proces se obavlja na niskim temperaturama (500-600°C), nema potrebe za brzim hlađenjem,
- dolazi do porasta debljine komada za 0.01-0.07mm;
- komadi za nitriranje se pre nitriranja definitivno obrađuju, posle nitriranja nema obrade;
- znatno se povećava dinamička čvrstoća, naročito kod delova sa efektom zareza;
- povećava se koroziona otpornost površinskog sloja;
- temperature procesa su dovoljno niske tako da ne utiču na strukturu prethodno poboljšanog čelika;
- proces nitriranja je veoma dug, zato se u praksi ide na dubine sloja do 0.4mm;
- specijalan čelik za nitriranje č4739.

Osobine nitriranog sloja

- **Tvrdoća:** Najvažnija osobina nitriranih delova, znatno je veća nego kod martenzita. Dobija se veća otpornost na habanje, i utom slučaju se biraju legirani čelici sa Al, Cr, MO, W, tj. sa legirajućim elementima koji i sami mogu da obrazuju nitride. I tako povećavaju tvrdoću površinskog sloja.



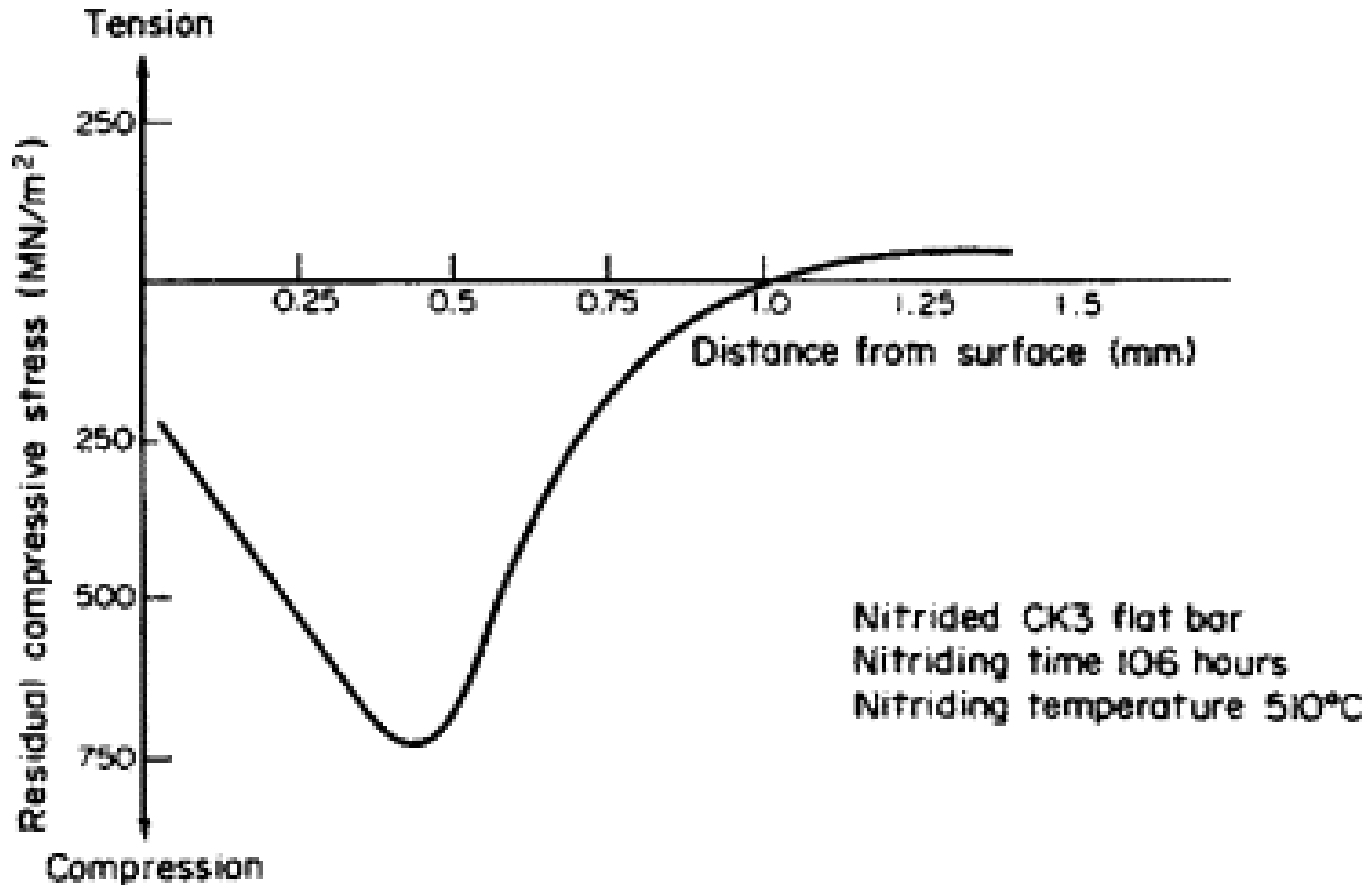
Tvrdoća nitriranog sloja



- Ovo se može objasniti disperznošću nitrida :
- Fino dispergovanii pravilno raspoređeni povećavaju tvrdoću.
- Porast temperature povećava koagulaciju nitrida i smanjuje tvrdoću.
- Najveća tvrdoća za temperature od 500-520°C.

- Nitiranje treba predvideti u slučaju kada dobra otpornost na habanje treba da bude postojana i na povišenim temperaturama (500-650°C) i to bez obzira kolikom puta se zagreja na tu temperaturu. Zagrevanje iznad toga dovodi do pada tvrdoće ali potpuno ne opada ni na 900-1000°C.
- Maksimalna tvrdoća se može postići sa 3-4%N. Povećanje %N na 10-11%, izaziva porast krtosti, bez povećanja tvrdoće i otpornosti na habanje.

Povečanje dinamične čvrstoće - σ_D



Hemijska (koroziorna) postojanost

- Koroziorna postojanost se može postići na svim konstrukcionim čelicima i SL, a efekat će biti veći ukoliko je veći sadržaj azota u površinskom sloju (ϵ -faza). Sroga delovi koji treba da su koroziorno postojani, ne treba da budu brušeni posle nitriranja.
- Koroziorna postojanost je na blaga sredstva. Dubina nitriranog sloja u ovom slučaju su male: 0.015-0.040 mm.

Parametri procesa

Izbor parametara proces: temperature, trajanja i stepana disocijacije amonijaka, zavisi od postavljenog cilja:

- Povećanje otpornosti na habanje
- Povećanje σ_D
- Povećanja hemijske postojanosti

Nedostaci nitriranja:

- Skuplji čelik zbog legiranja
- Dugotrajan proces
- Potrebna specijalna postrojenja.

Materijali za nitriranje

Mogu se nitrirati čelici i livovi ali su najbolji rezultati na čelicima za nitriranje, koji su uvek legirani, i zato je velika tvrdoća nitriranog sloja. Ovi čelici se mogu poboljšati.

Ovi čelici imaju 0.2-0.4% ugljenika, jer su visoke temperature otpuštanja pri poboljšavanju.

U Srbiji, čelik za nitriranje: Č4739 (0.3%C, 1%Cr, 0.25%Mn, 1.1%Al)

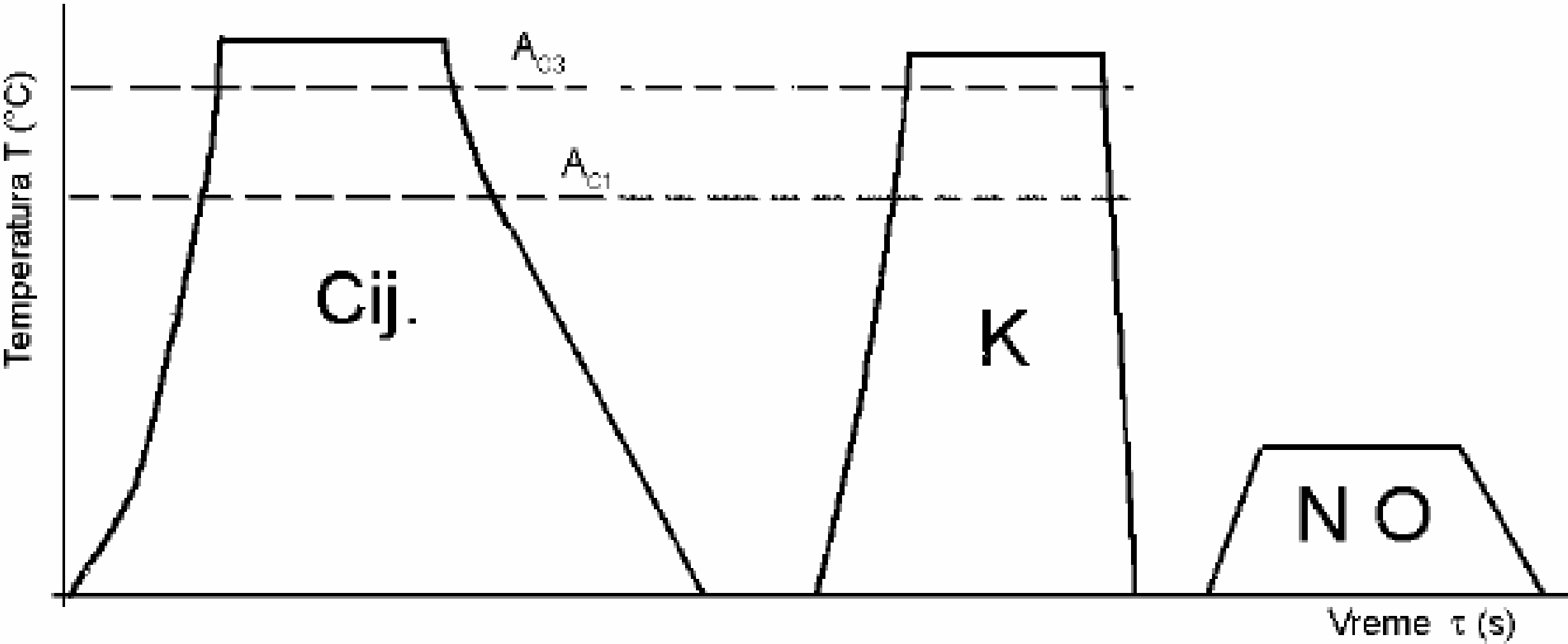
T_k=870-900°C

T_o=580-650°C

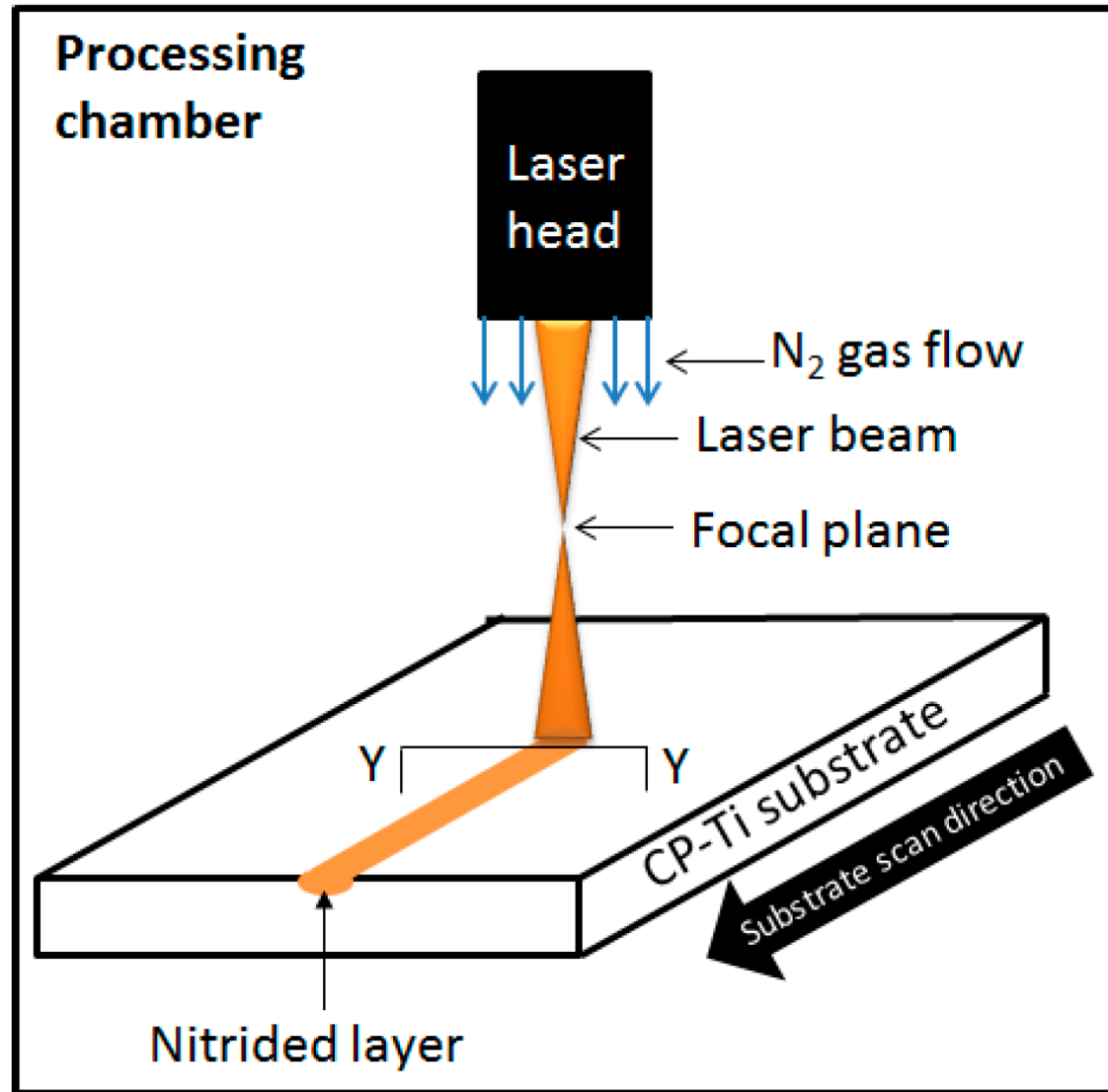
Karbonitriranje

- Karbonitriranje je proces u kome se površinski sloj čelika difuzijom obogaćuje atomima ugljenika i azota istovremeno. Osnovni cilj ove obrade je povećanje površinske tvrdoće 55–65 HRC i otpornosti na habanje.
- Temperatura procesa je 850–860°C i traje oko 2–10 časova. Izvodi se u gasovitoj sredini koja se sastoji iz gasa koji sadrži ugljenik i amonijak. Posle sledi kaljenje i nisko otpuštanje. Pri optimalnim uslovima procesa struktura karbonitriranog sloja sastoji se iz sitnih kristala martenzita i male količine sitnih pravilno raspoređenih karbonitrida i oko 25–30% zaostalog austenita. Dubina karbonitriranog sloja je 0,2–0,8 mm, ali ne veća od 1 mm, jer pri većim dubinama obrazuje se sloj sa defektima i smanjenim mehaničkim svojstvima.
- Karbonitriranje se primenjuje kod delova složenog oblika koji su skloni savijanju. Proces ima izvesne prednosti nad cementacijom zbog nižih temperatura.

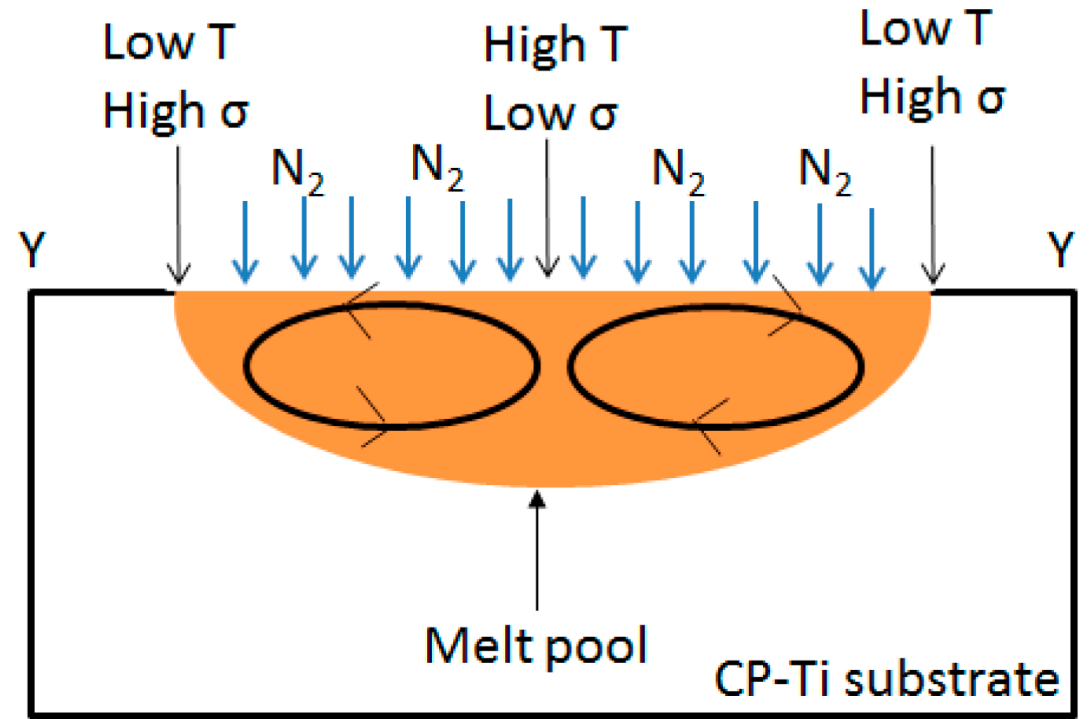
Režim karbonitriranja sa kaljenjem i otpuštanjem



Lasersko nitriranje



(a)



(b)

POVRŠINSKO KALJENJE

Površinsko kaljenje

- Proces termičke obrade u kojem se zagreva samo površinski sloj do temperature iznad tačke A_{c3} za podeutektoidne, i iznad tačke A_{c1} za nadeutektoidne čelike, a zatim hladi brzinom većom od kritične brzine, sa ciljem da se u površinskom sloju dobije martenzitna struktura, naziva se površinsko kaljenje. Ovim načinom kali se samo površinski sloj, dok jezgro mašinskog dela zadržava svoju polaznu strukturu. Osnovna namena površinskog kaljenja je povećanje: površinske tvrdoće, otpornosti na habanje, otpornosti na koroziju i dinamičke čvrstoće.
- U industrijskoj praksi najviše se koristi postupak površinskog **kaljenja indukcijom zagrevanjem**, a ređe površinsko **kaljenje zagrevanjem gasnim plamenom**. Za oba postupka površinskog kaljenja zajedničko je da se čelik zagreva snažnim toplotnim izvorom, a zatim odmah hladi da bi se sprečilo dublje prodiranje toplote, a time i veće prokaljivanje

KALJENJE GORIONIKOM

- Ovaj način površinskog kaljenja kao toplotni izvor za zagrevanje površina delova koristi toplotu nastalu sagorevanjem mešavine acetilena i kiseonika ($C_2H_2 + O_2$). Plamen mešavine acetilena i kiseonika ima vrlo visoku temperaturu $\sim 3150^\circ C$ usled čega se površinski sloj brzo zagreva do potrebne temperature kaljenja za kratko vreme, dok unutrašnji slojevi – jezgro, ostaju nezagrejani. Posle zagrevanja odmah sledi hlađenje mlazom vode. Posle površinskog kaljenja delovi se otpuštaju na temperaturi $160\text{--}180^\circ C$, u cilju smanjenja unutrašnjih napona. Struktura u tankom površinskom sloju je martenzitna, a u dubljim slojevima trustitno–martenzitna.
- Pogodno za primenu u maloserijskoj proizvodnji (naročito za velike komade) i reparaturne radove.
- Zagrevanje se vrši plamenom velike toplotne snage ($\sim 2000\text{ J/cm}^3\text{s}$) koji su proizvod sagorevanja gorivog gasa u kiseoniku.

Prednost :

- Ciklus je znatno kraći (3-10 sec) i ne zavisi od dubine kaljenog sloja.
- Zagreva se samo mesto P.K. (uštedu toploti)
- Može se koristiti čelik veće čvrstoće (zbog \nearrow %C)
- Nema potrebe da se zaštite delovi površina koje ne treba kaliti.
- Mogu se kaliti veoma veliki komadi uz srazmerno male troškove.
- Proces je lako ponovljiv i pogodan za automatizaciju.

• Nedostaci:

- Potrebno je prilagoditi oblike gorionika obliku površine komada, što je teško kod nesimetričnih komada.
- Potrebne su mere protiv požarne zaštite.

- Dubina zakaljenog sloja može biti od 2–6 mm, što zavisi od snage gorionika i brzine njegovog kretanja i rastojanja između gorionika i mlaznica za hlađenje. Sa povećanjem brzine kretanja gorionika smanjuje se vreme dejstva plamena, što smanjuje dubinu prokaljivanja. Smanjivanjem brzine kretanja gorionika dobija se veća dubina prokaljivanja, ali može doći do pregrevanja materijala sa svim negativnim posledicama. Tvrdća zakaljenog sloja kod čelika sa 0,4–0,5% C može dostići vrednost HRC=50–56. Nedostatak ovog načina površinskog kaljenja je mogućnost pregrevanja površinskog sloja i teško ostvarivanje zadate dubine prokaljivanja. Ovaj način površinskog kaljenja koristi se za delove velikih dimenzija kao što su: valjaonički valjci za hladno valjanje metala, velika vratila, zubi velikih zupčanika i dr.
- Postupak se uglavnom koristi kod čelika za poboljšavanje sa $\%C < 0,8$. Mogu se koristiti za dubine od 2 do 30 mm. Za male dubine kaljenja su pogodni čelici sa malim λ .
- Odnos kaljene površine prema F_k , prema celokupnoj površini F_c , može biti kriterijum za izbor postupka između cementacije i P.K.

↘ $F_k / F_c \rightarrow$ P.K.

↗ $F_k / F_c \rightarrow$ cementacija

OPREMA

- Rezervoar gasa
- Mešač
- Gorionik
- Hladilica

Parametri

- Brzina isticanja gasa
- Brzina plamena
- Dubina zagrevanja
- Hlađenje
- Vreme izjednačavanja
- Postupci

Gas za zagrevanje

- Mogu se koristiti samo gasovi sa velikom kaloričnom moći.

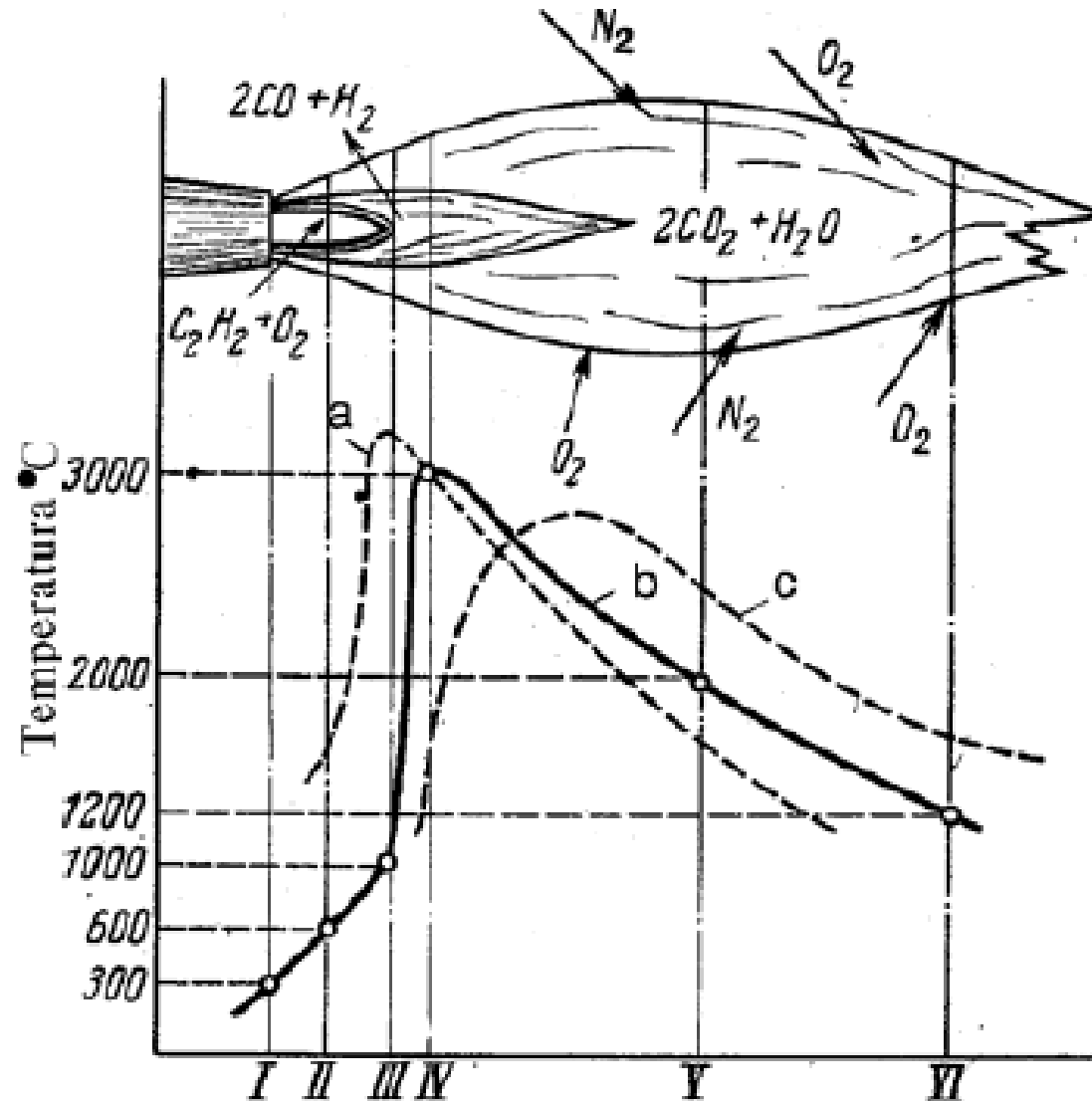
Osnovne osobine najčešće korišćenih gasova

		acetilen	propan	butan	metan	propilen	MAPP	vodonik
t_{\max}	(°C)	3087	2526	2300	2538	2865	2927	2655
Q_{prim}	(MJ/m ³)	18,9	9,5	–	0,4	16,3	19,3	–
Q_{sek}	(MJ/m ³)	35,9	83,6	–	37	71,9	70,4	–
Q_{vol}	(MJ/m ³)	54,8	93,1	130	37	88,3	89,6	12
Q_{mas}	(MJ/kg)	50	51	–	56	49	49	120
O ₂ (ukupno)	(mol)	2,5	5	–	2	4,5	4	0,5
O ₂ (boca)	(mol)	1÷1,3	3,5	–	1,5	2,6	2,5	0,3÷0,4
ρ/ρ_{vaz}	(–)	0,91	1,52	2,10	0,62	1,48	1,48	0,074
M	(g/mol)	26,0	44,0	58,1	–	–	–	–
$\nu=V/m$	(m ³ /kg)	0,91	0,54	0,39	1,44	0,55	0,55	11,77
ν_{zag}	(m/s)	5,7	3,9	–	5,5	–	–	11

Acetilen ima najveću brzinu paljenja (ν), toplotnu snagu (Q), temperaturu plamena (t).

Šematski izgled plamena

(a – oksidišući, b – neutralni, c – redukujući)



a) oksidišući

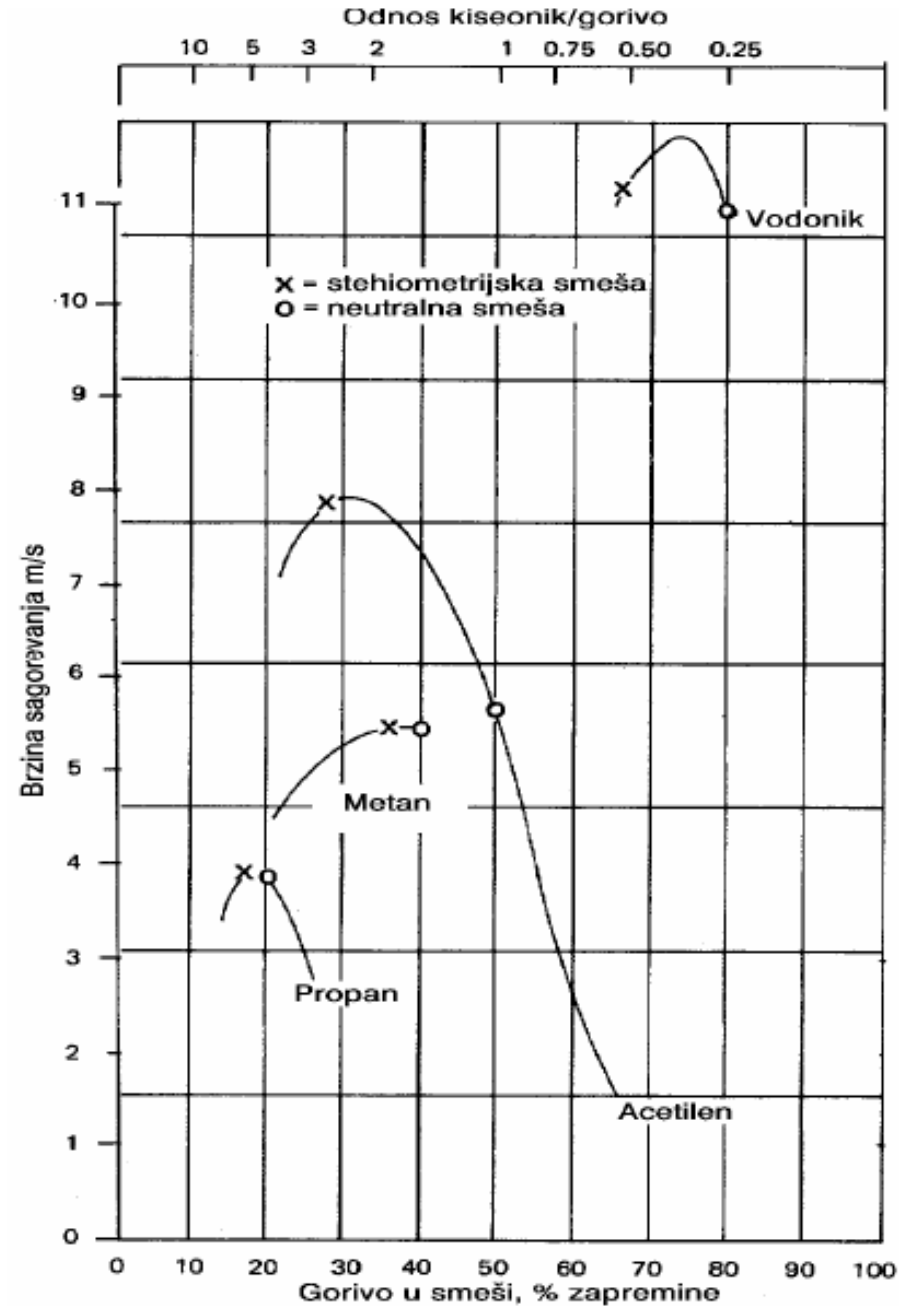


b) neutralni

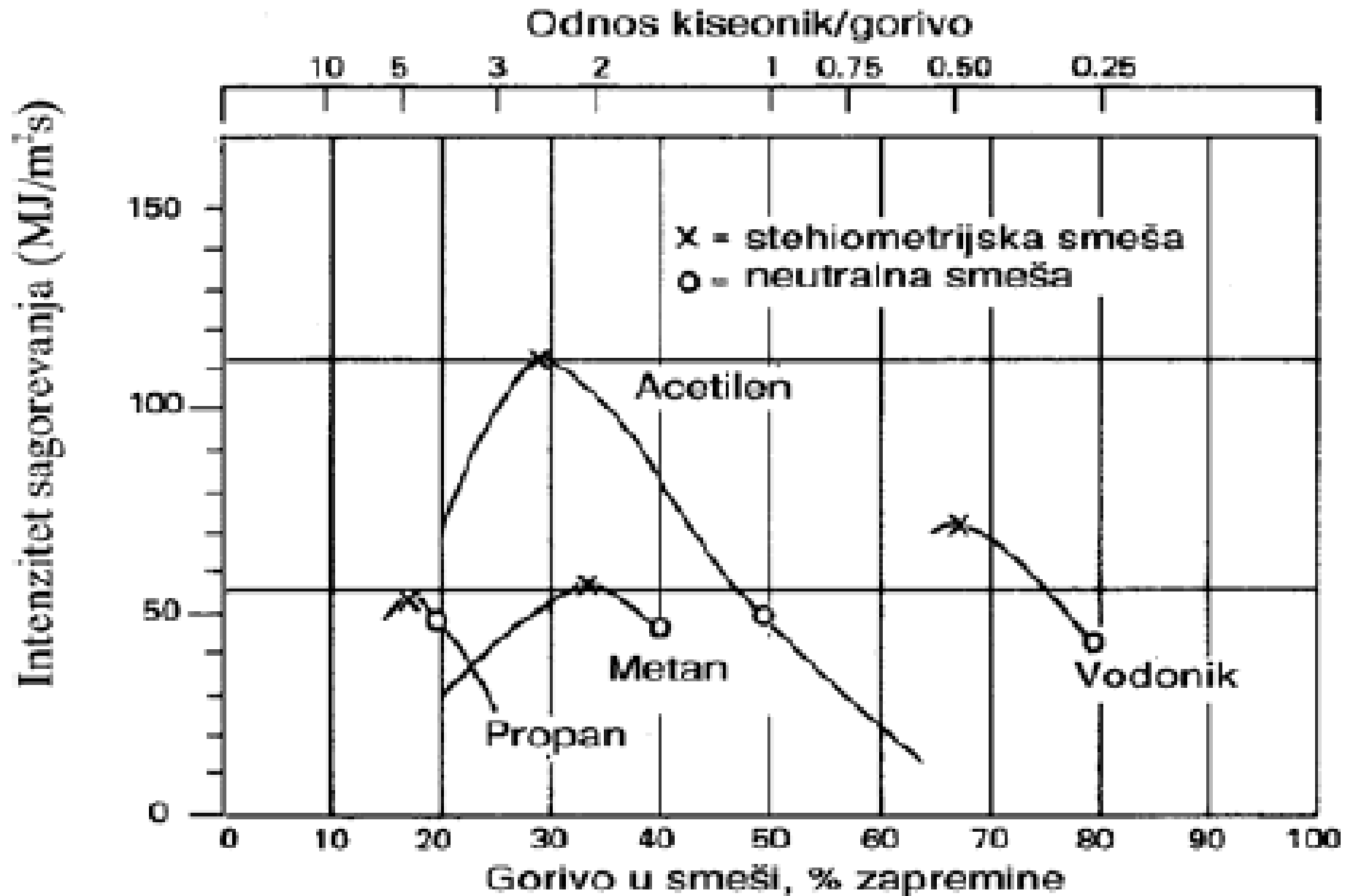


c) redukujući

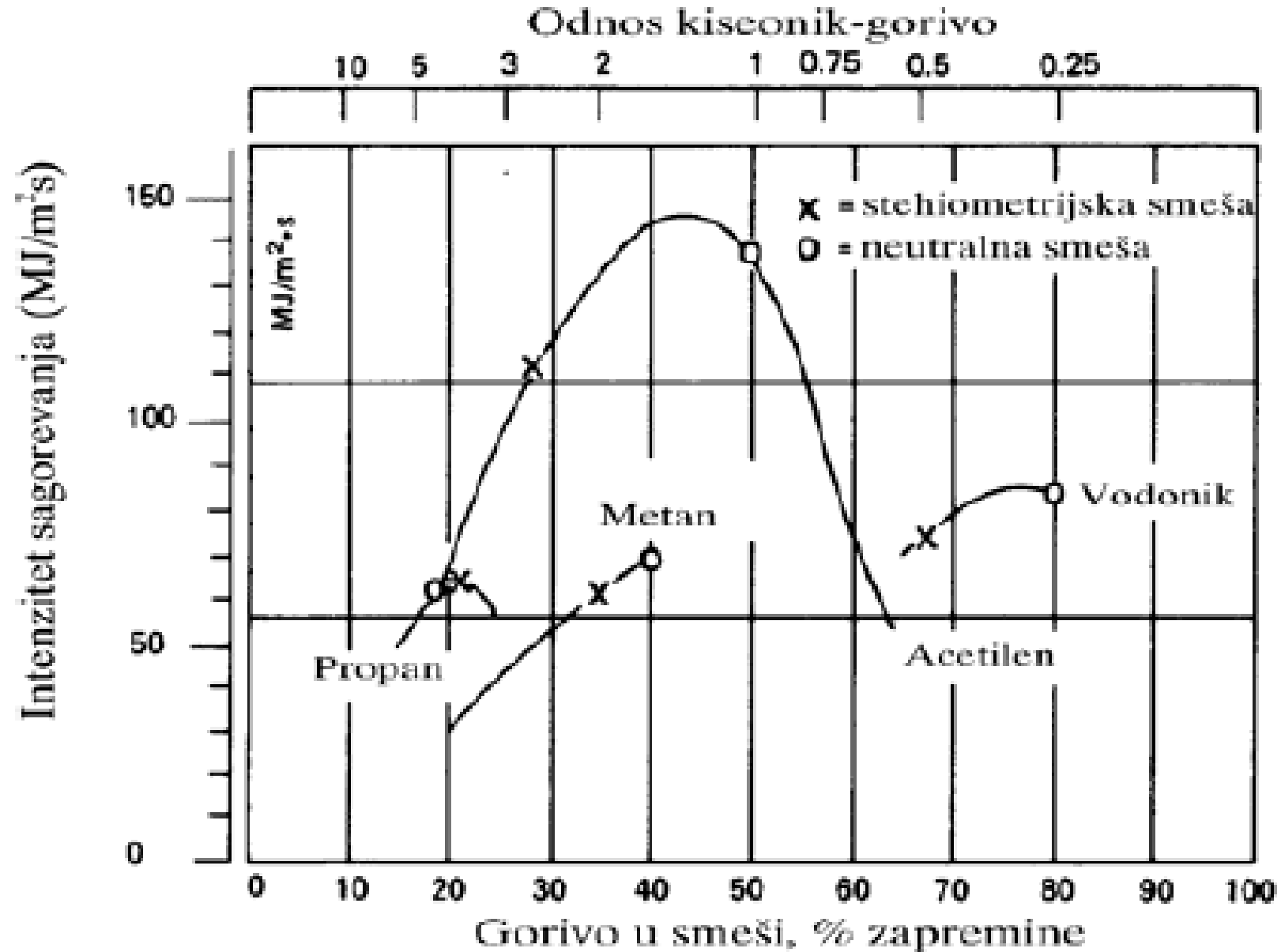
Brzina sagorevanja nekih gorivih gasova



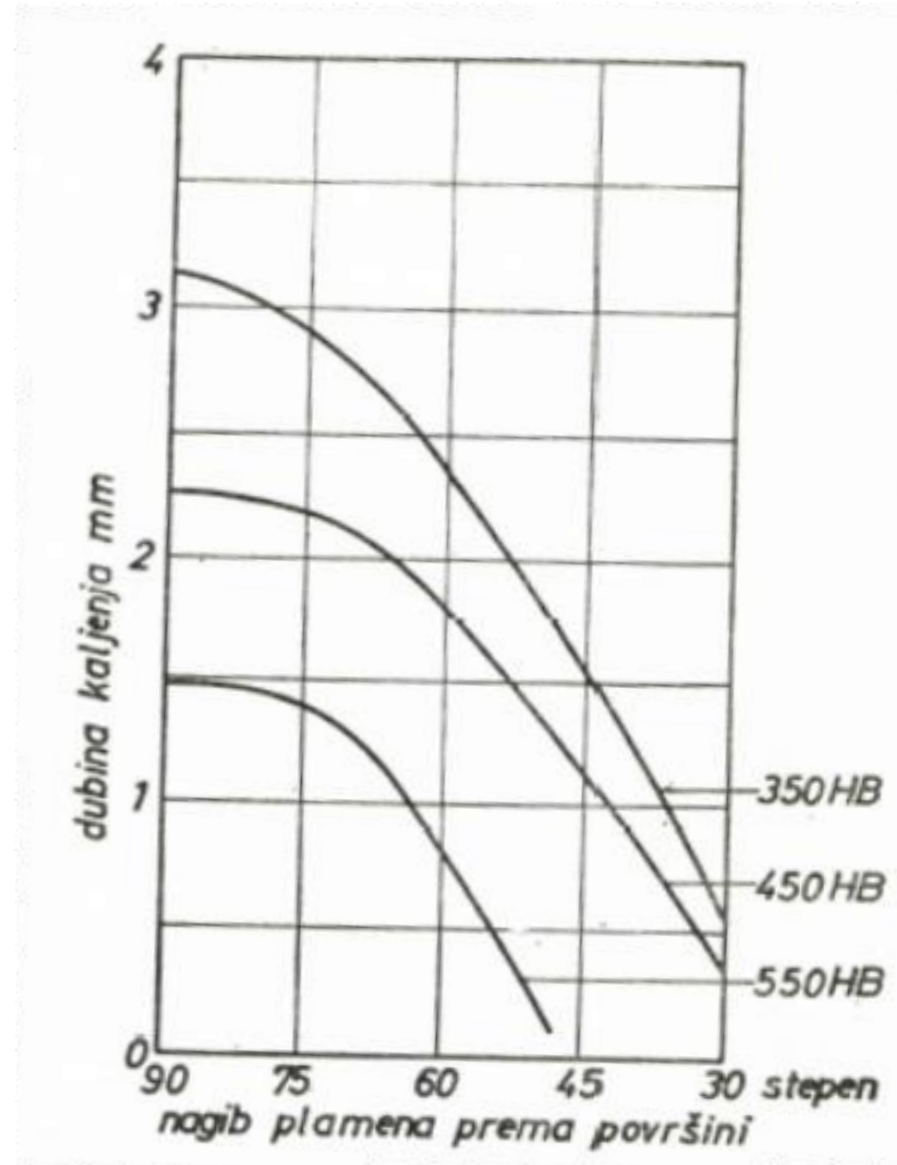
Intenzitet primarnog sagorevanja nekih gorivih gasova



Intenzitet ukupnog sagorevanja nekih gorivih gasova



Uticaj ugla nagiba gorionika na dubinu kaljenja



Sagorevanje gasa, vrši se pomoću gorionika, u mešavini sa kisonikom.

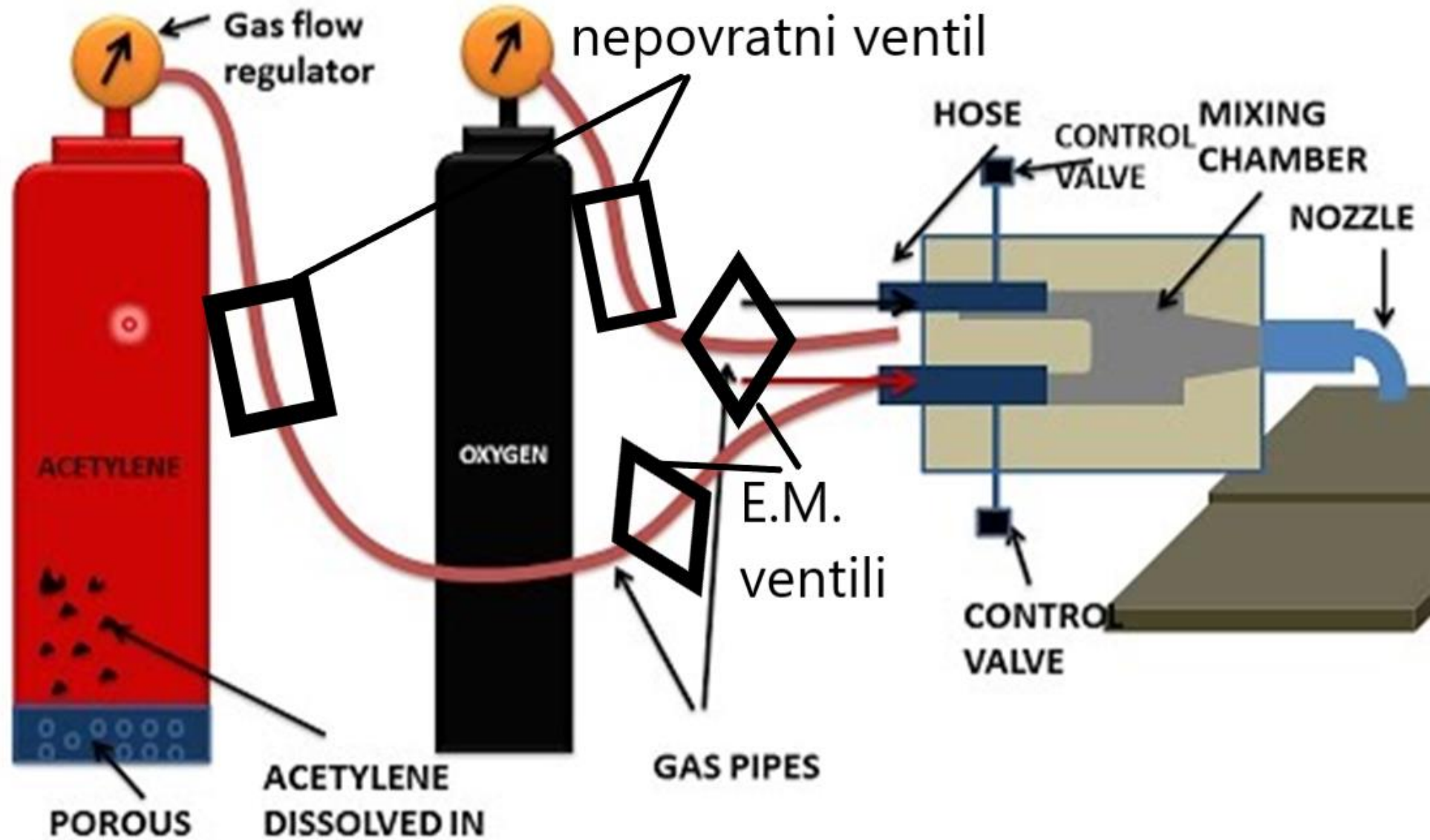
Gorionik

- Mlaznica
- Injektorski mešač(O_2 i C_2H_2)
- Ventili za regulisanje mešavine (regulacija uređaja)
- Elektromagnetni ventili (uključuje i isključuje uređaj)
- Nepovratni ventili (sprečava povratak plamena u cevovod)

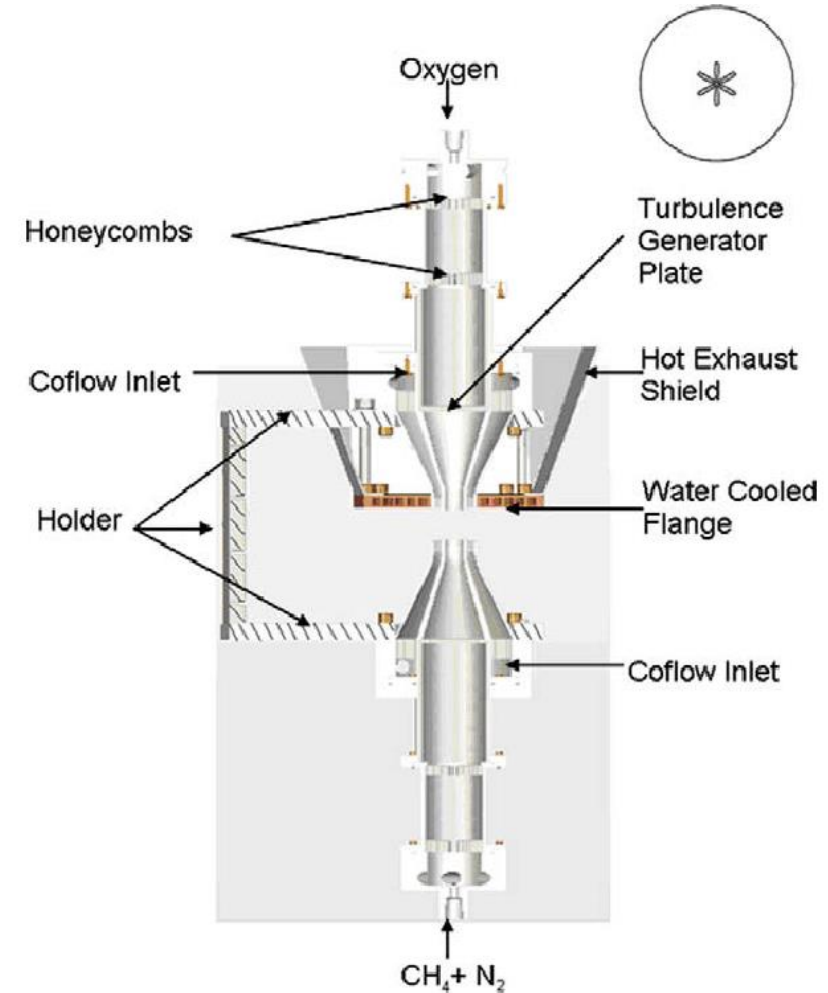
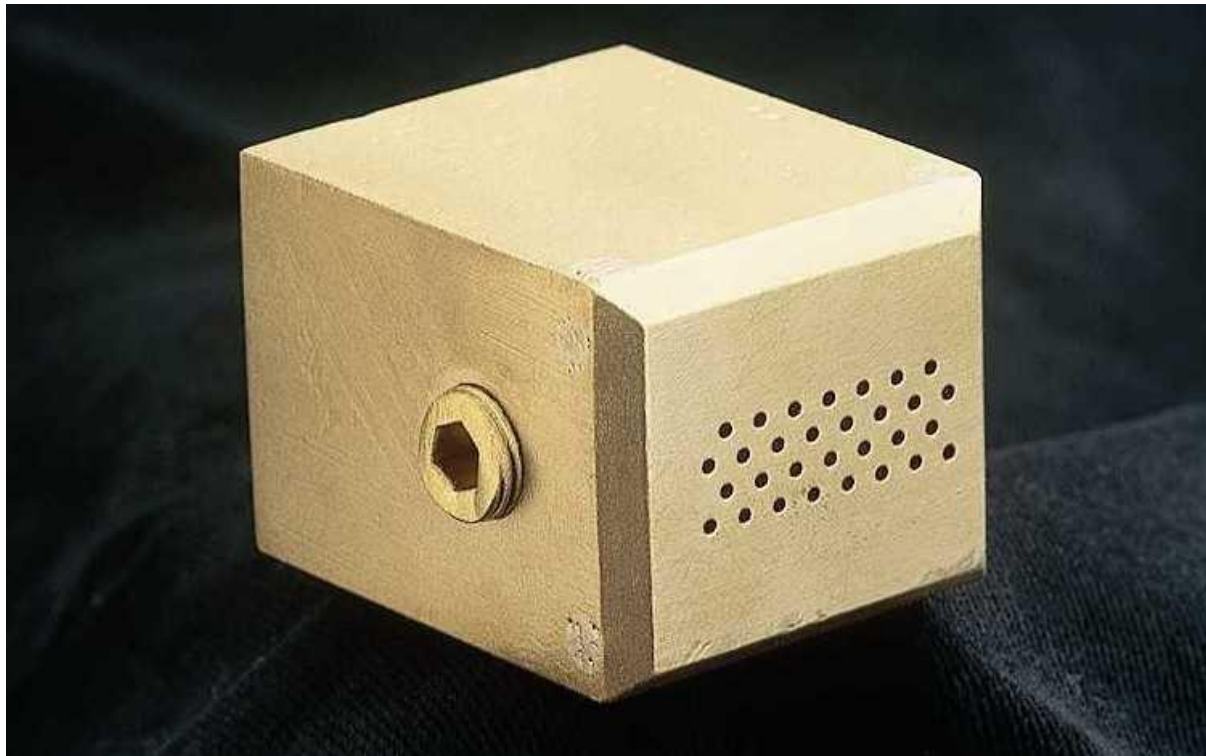
- Merenje temperature je pirometrom.

- Gorionik se smešta na uređaj za kaljenje u položaj koji omogućava zauzimanje potrebnog položaja prema komadu i ostvaruje relativno kretanje.

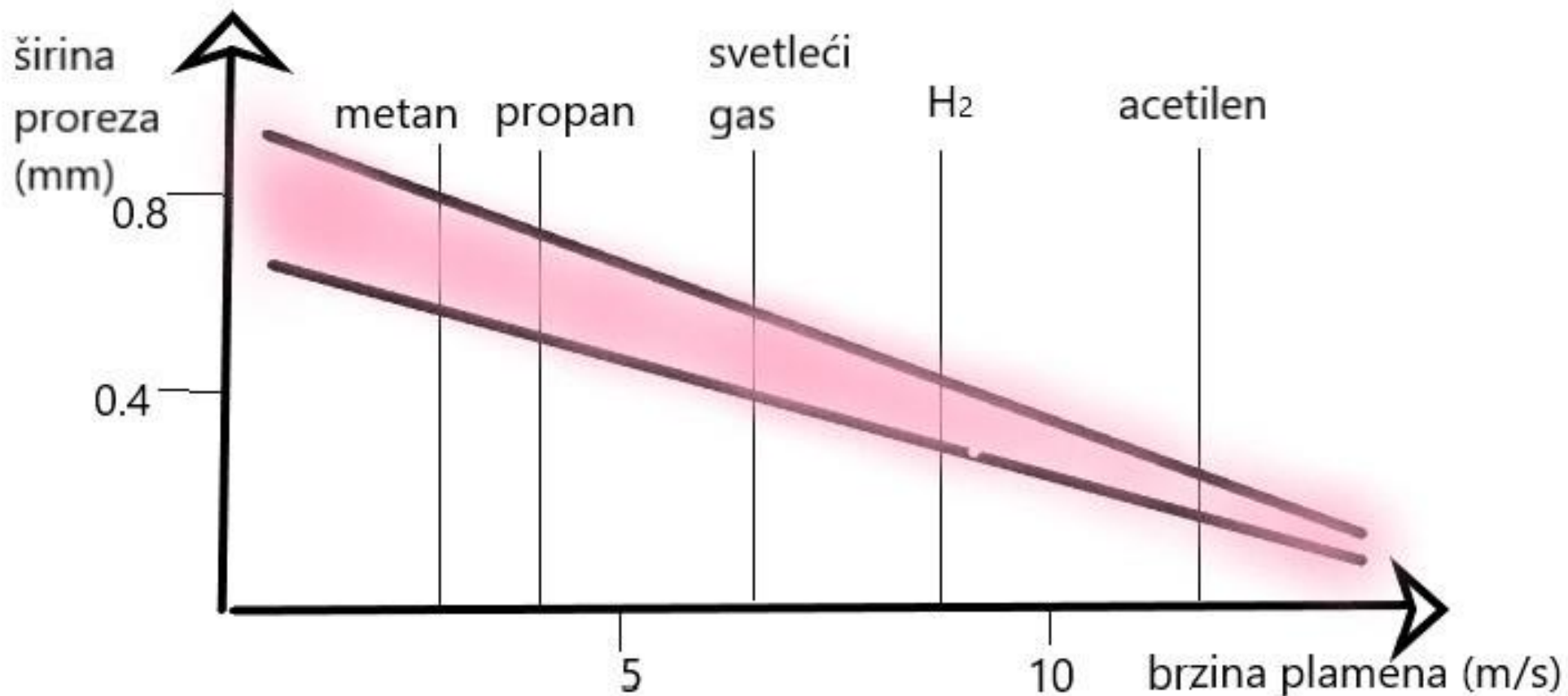
Šema uređaja za kaljenje gorionikom



- Oblik gorionika zavisi od vrste gorivog gasa i oblika površine koja se kali. Gorionici mogu biti sa prorezima i rupama.
- Gorionici sa prorezima su ekonomični .
- Dužina prpreza kod acetilena i propana, ne sme biti velika zbog povratnog plamena.
- Širina zavisi od brzine paljenja.



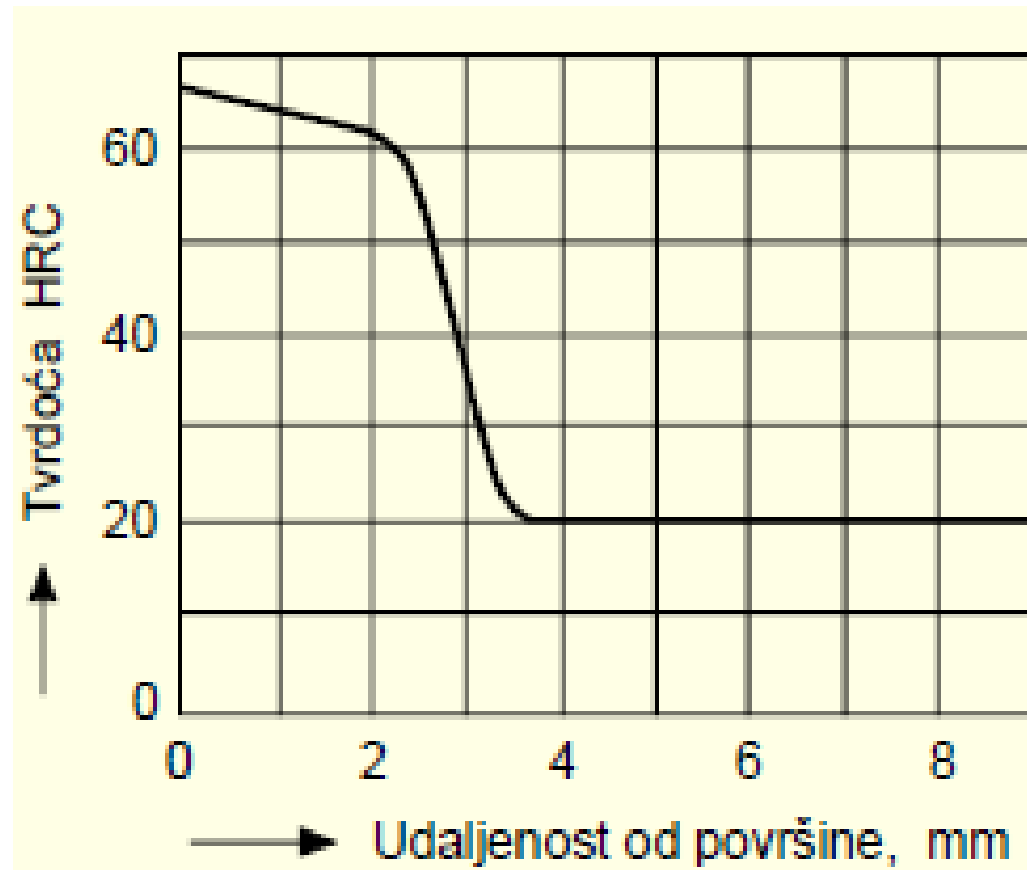
Širina otvora proreza



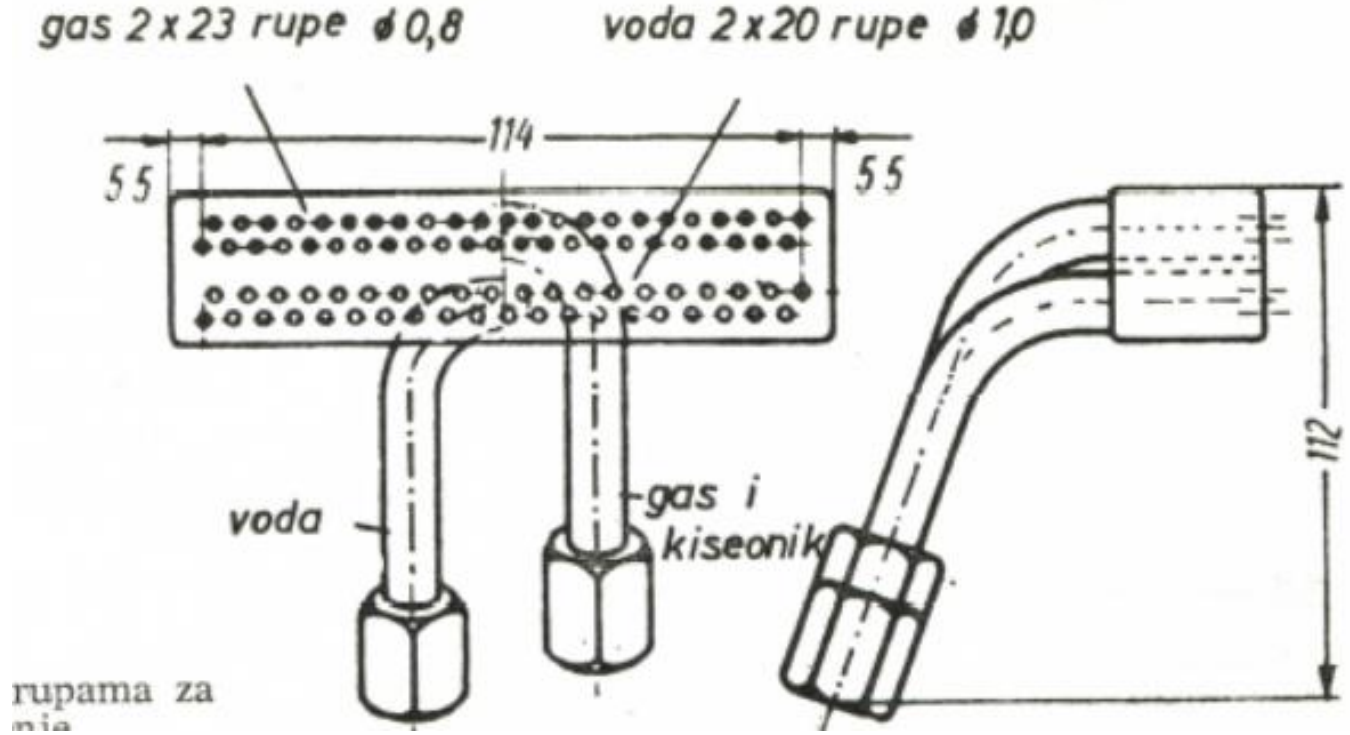
- Za veće snage gorionici su sa rupama. Pogodnim rasporedom rupa se može regulisati snaga. Više redova rupa, snaga raste ali se ekonomičnost smanjuje.
- Ako je rastojanje između rupa malo, može se povećati brzina P.K.
- Ako se plameni seku u jednoj tački (osi), gorionik ima veliku brzinu zagrevanja.
- Brzina isticanja gasa ima uticaj na prenos toplote konvekcijom na komad.

$V_{opt}=140 \text{ m/s}$

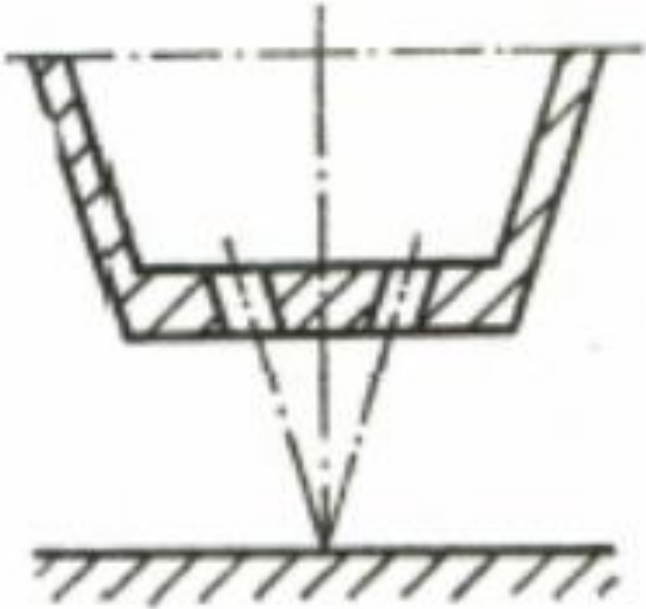
Dubina ojačavanja: $S = \frac{3 \lambda}{7 \alpha}$



Gorionik sa rupama za linijsko kaljenje

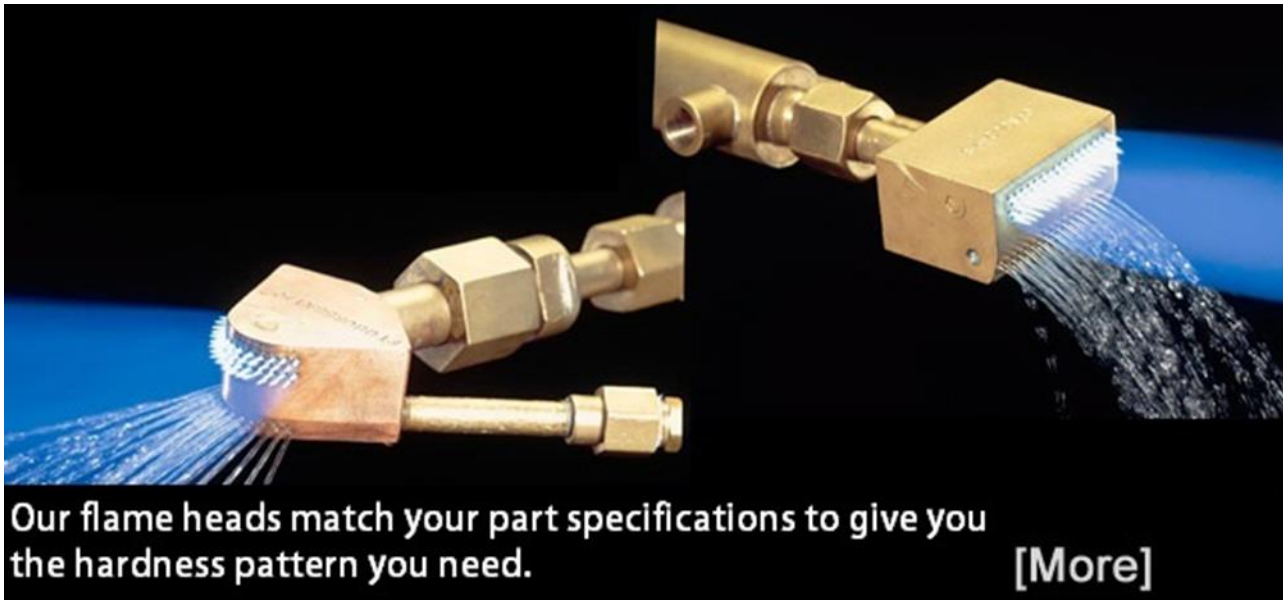


Gorionik sa kosim rupama

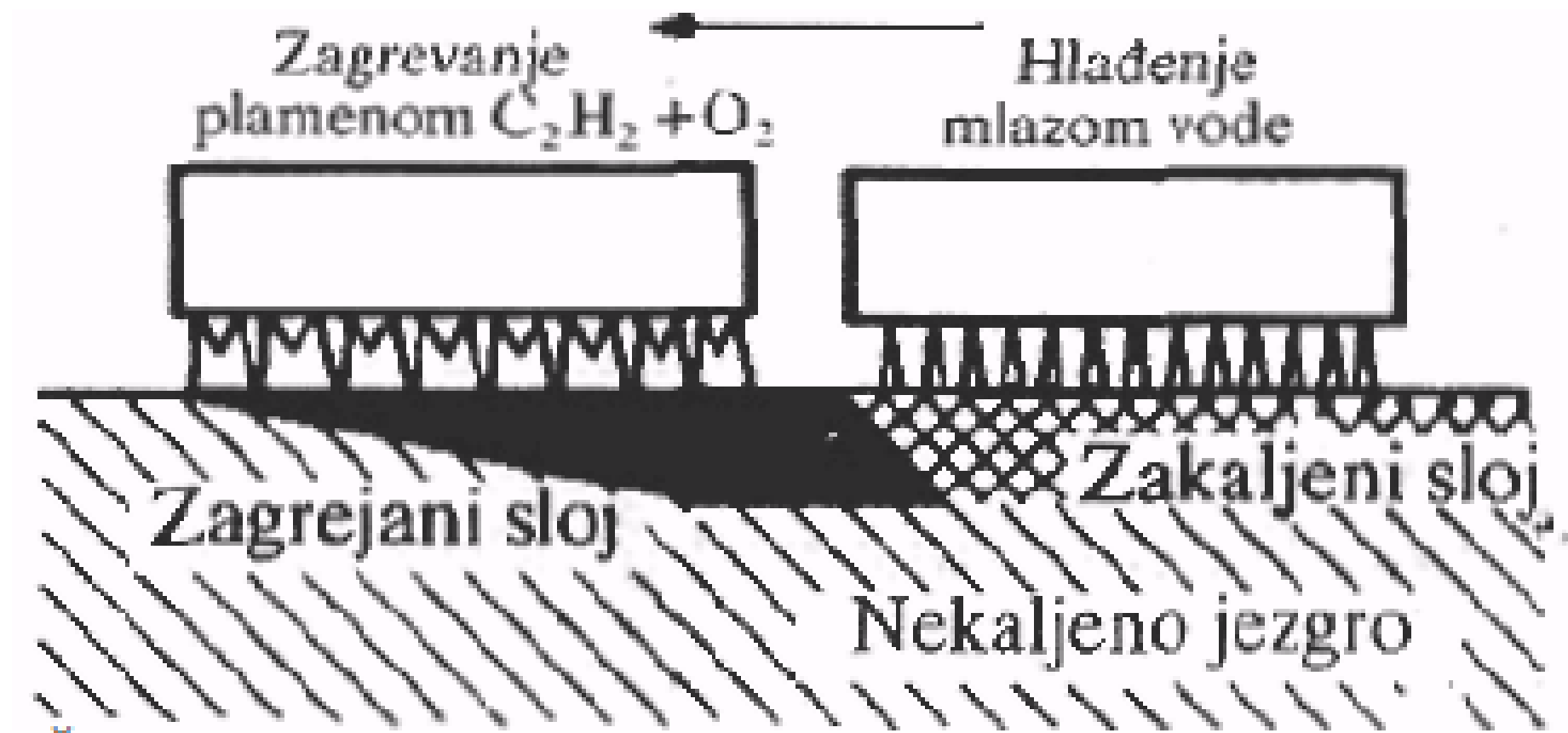


Hladilica i hlađenje

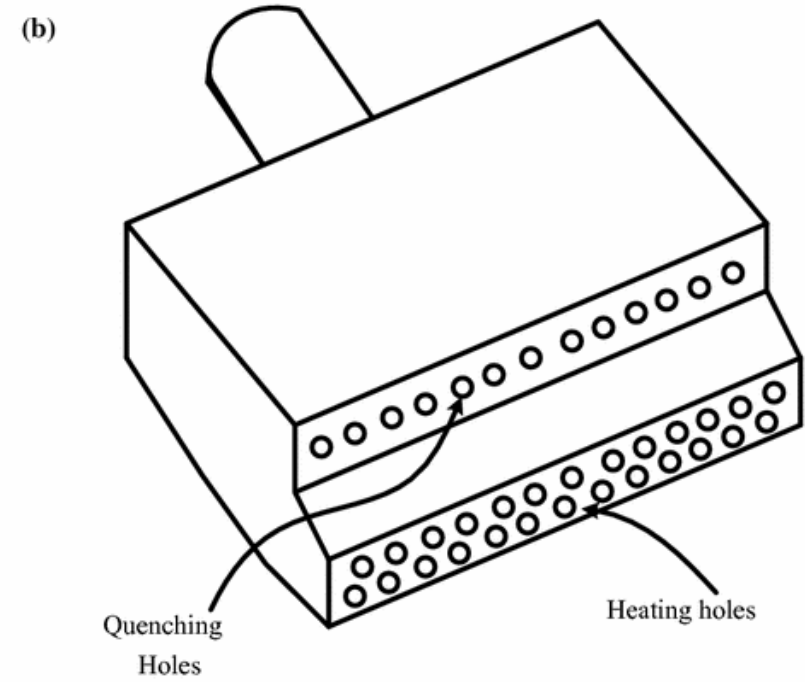
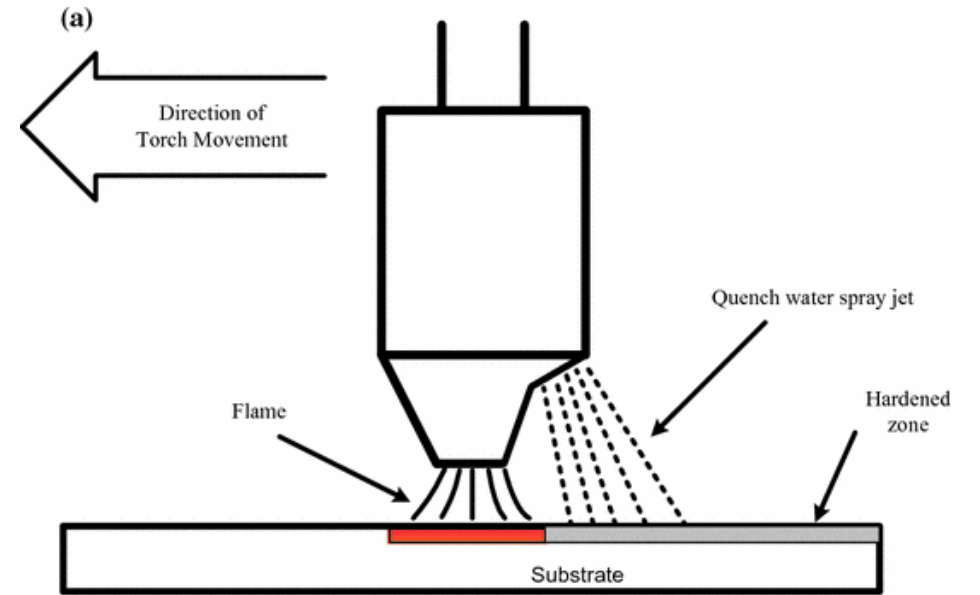
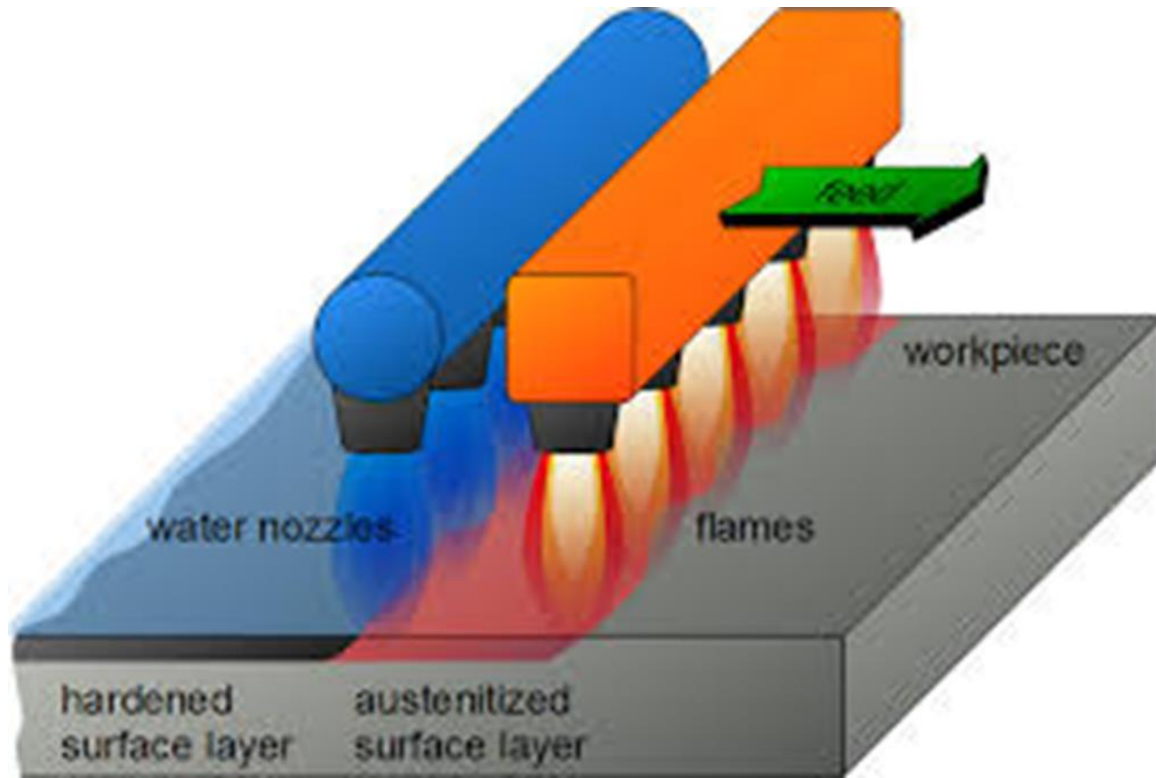
- Zagrejan komad se mora ravnomerno hladiti i to brzinom koja je veća od kritične.
- 1. potapanjem u kadu (sitni komadi)
- 2. hladnim mlazom vode (pomoću pritiska se reguliše)
- Hladilice se prave isto kao i gorionici sa rupama i prorezima. Brzina isticanja treba da bude da nema parnog omotača.
- Koriszi se voda, ulje i vazduh.



Šematski prikaz površinskog kaljenja zagrevanjem gasnim plamenom



Gorionici i hladilice



Postupci kaljenja gorionikom

Postupno kaljenje

- Oprema za zagrevanje i hlađenje je razdvojena. Prvo gorionikom zagrevamo površinu a zatim se vrši hlađenje. Između zagrevanja i hlađenja je vremenska pauza.
- Postoji vreme izjednačavanja

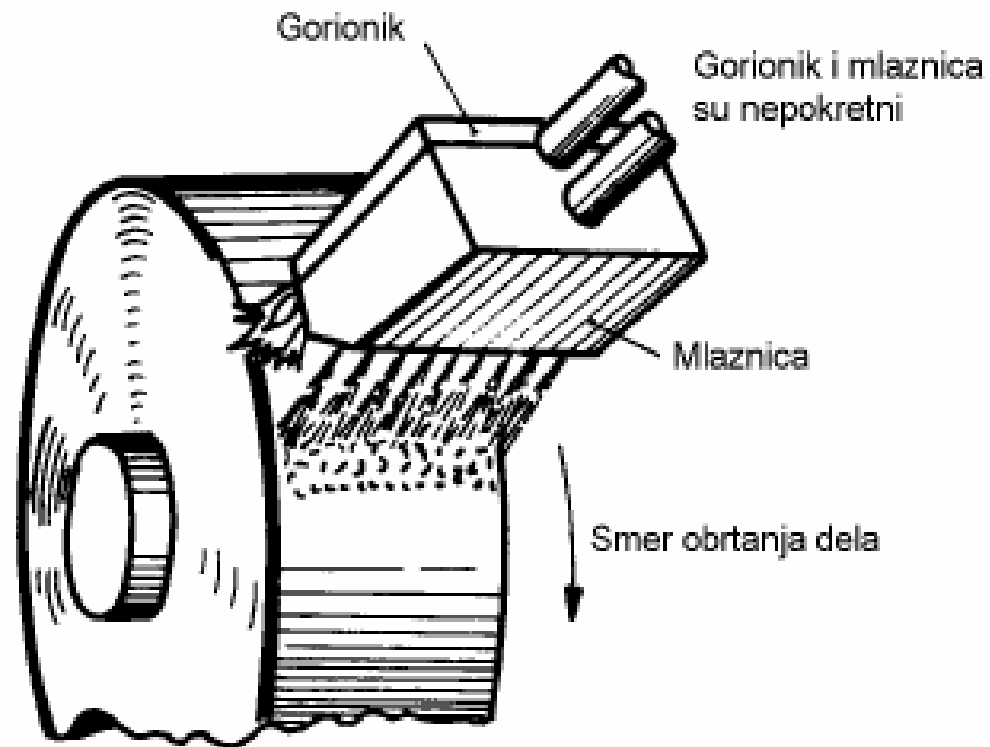
Linijsko kaljenje

- Najčešće se kale ravne površine. Gorionik treba da je nešto uži od širine površine, koja se kali, da se ivice ne pregreju. Proces zagrevanja i hlađenja teče istovremeno. Gorionik i hladilica imaju relativnu brzinu u odnosu na površinu komada. Zona zagrevanja je uska traka (linija).

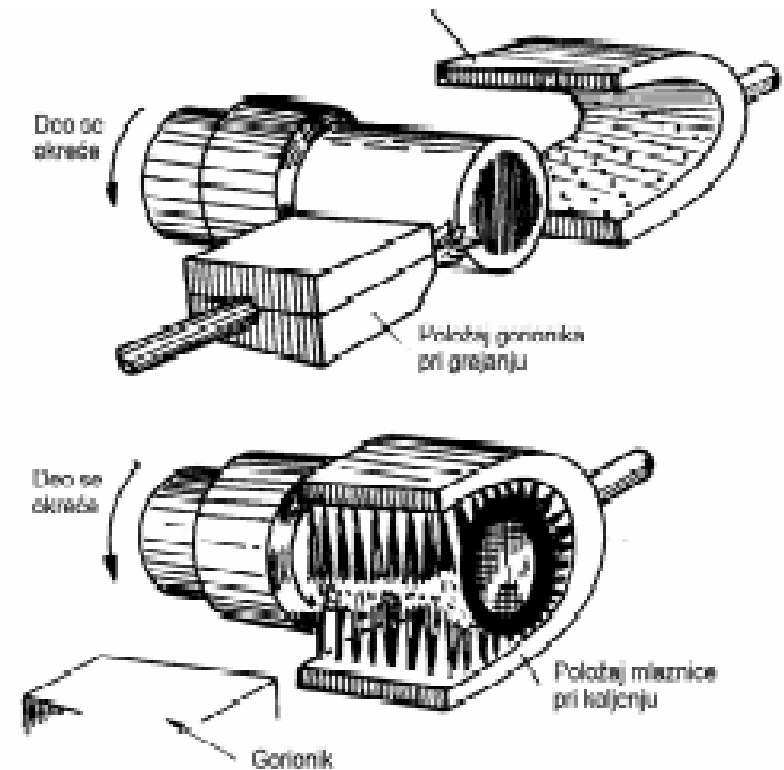
$$T=s/v \quad s\text{-rastojanje G i H, } v\text{-brzina G i H.}$$

Postupci kaljenja gorionikom

Primeri površinskog kaljenja cilindričnih površina:
a) kaljenje izjedna (linijsko) , b) postupno kaljenje



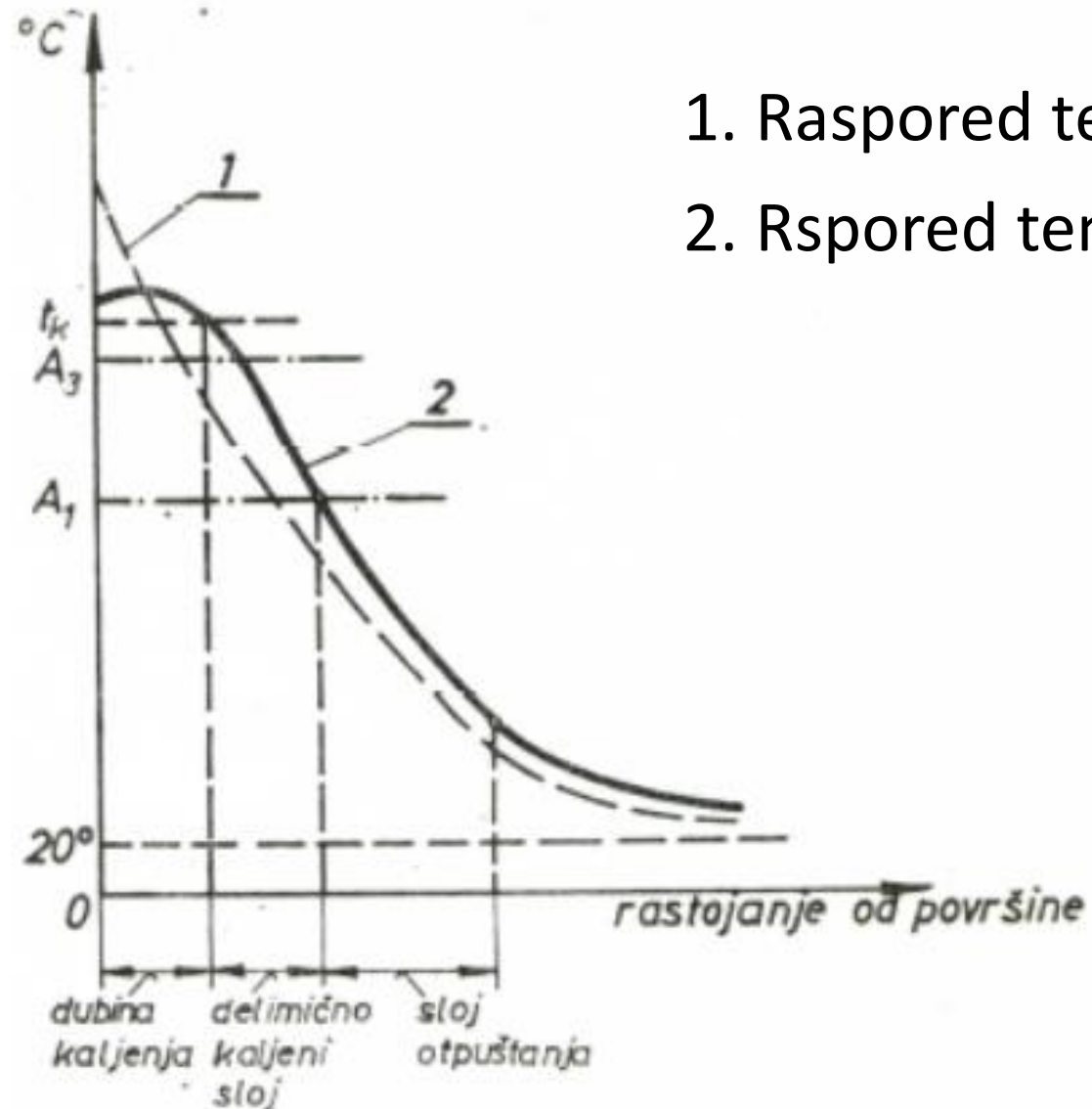
a)



b)

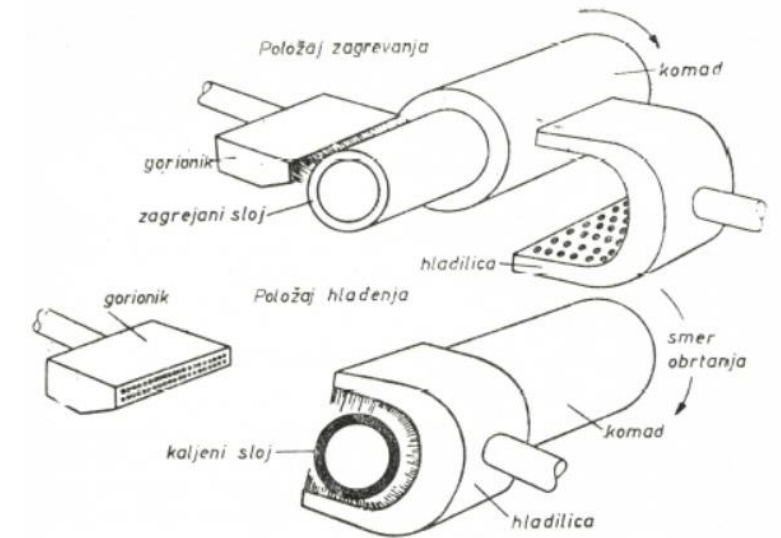
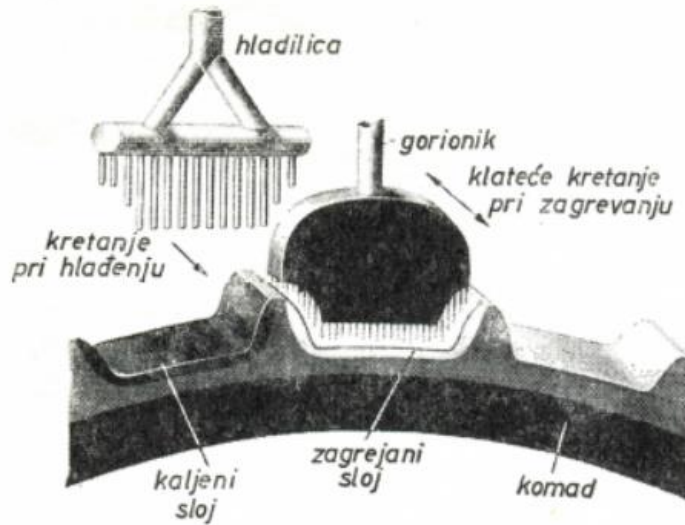
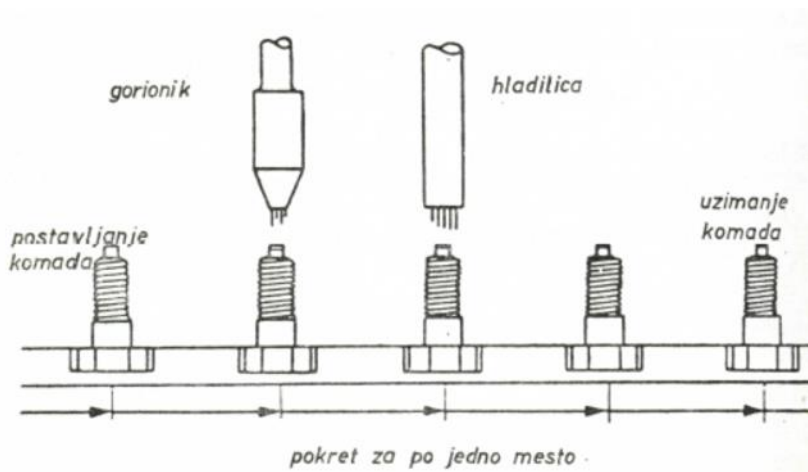
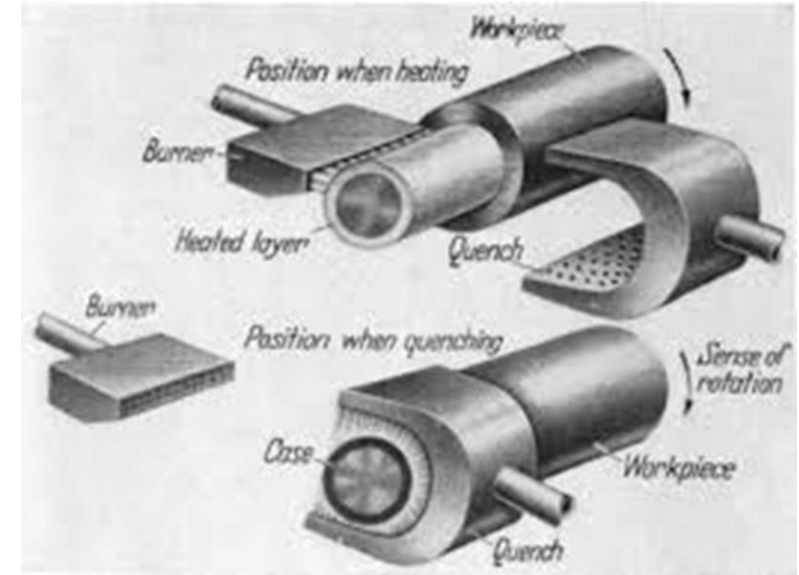
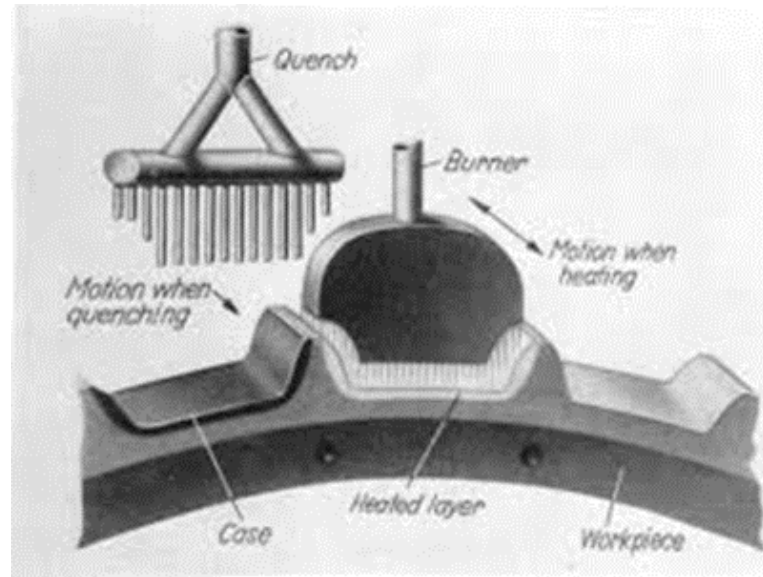
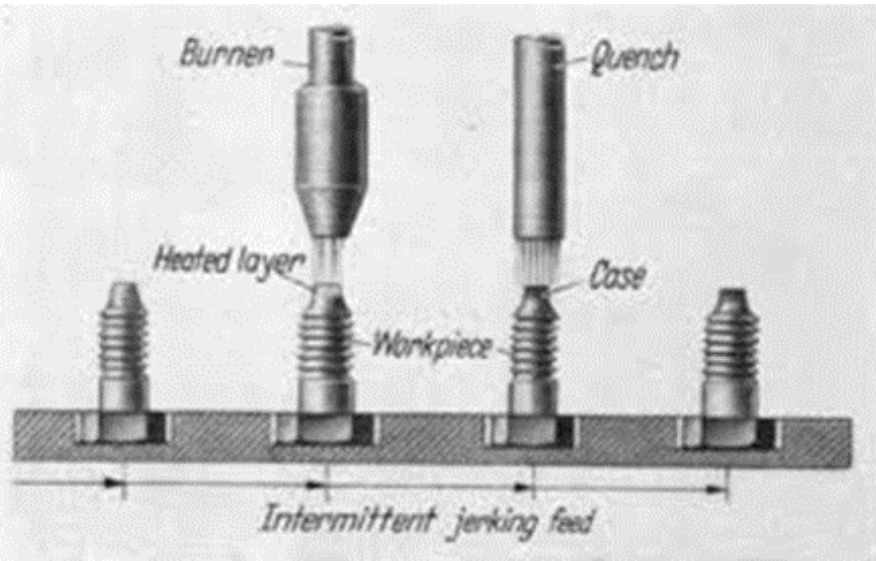
Postupno kaljenje

- Raspored temperatura od početka zagrevanja (vreme izjednačavanja)



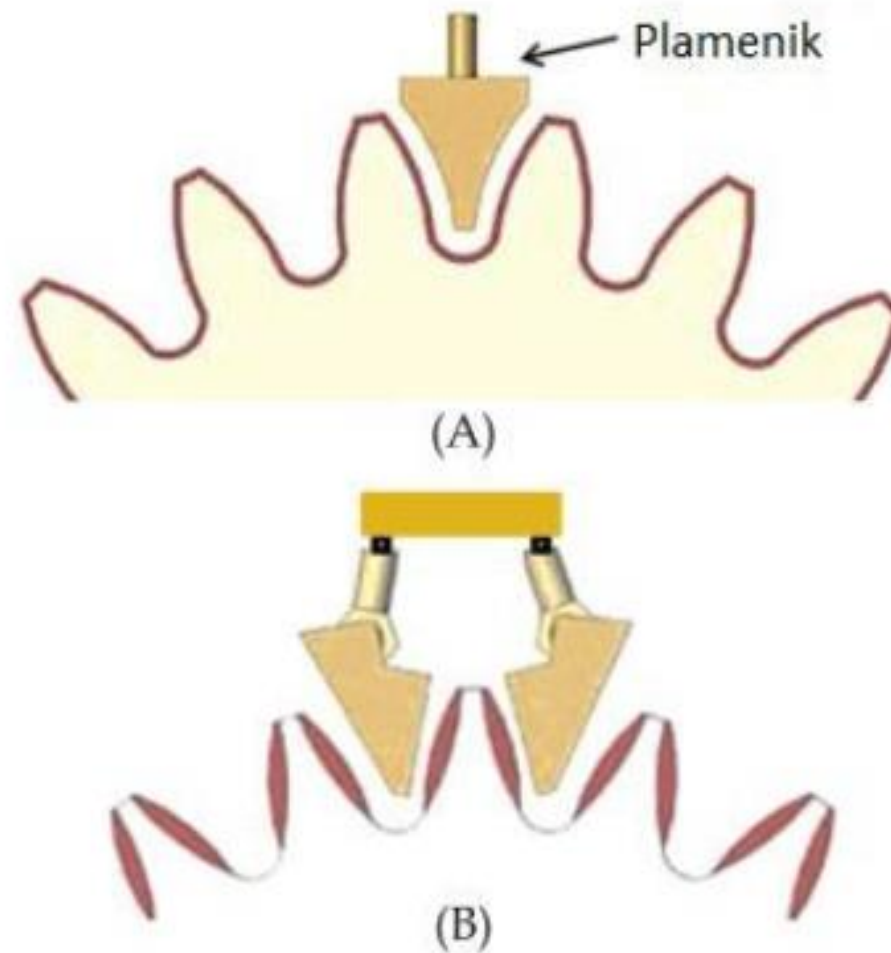
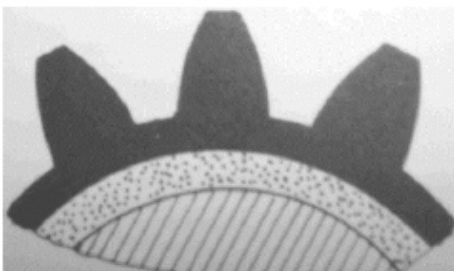
1. Raspored temp. na kraju zagrevanja
2. Raspored temp. posle izjednačavanja

Postupno kaljenje

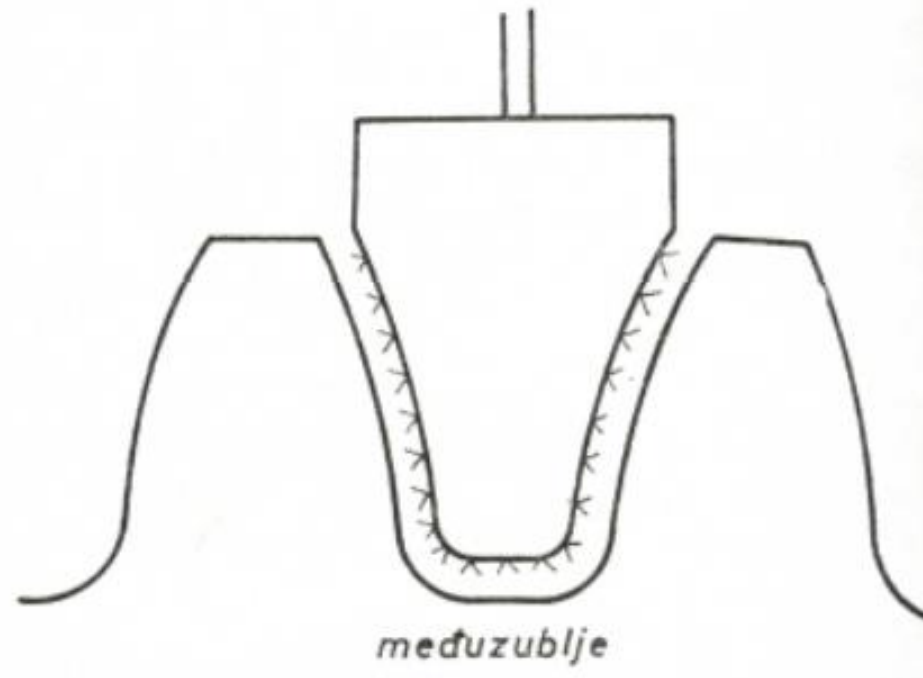
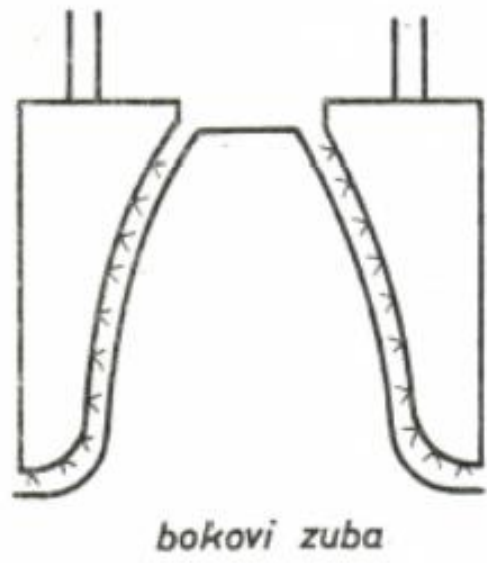
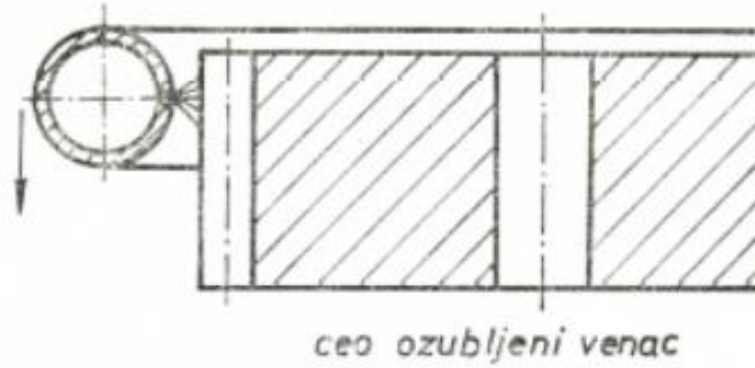


Plameno kaljenje zuba zupčanika

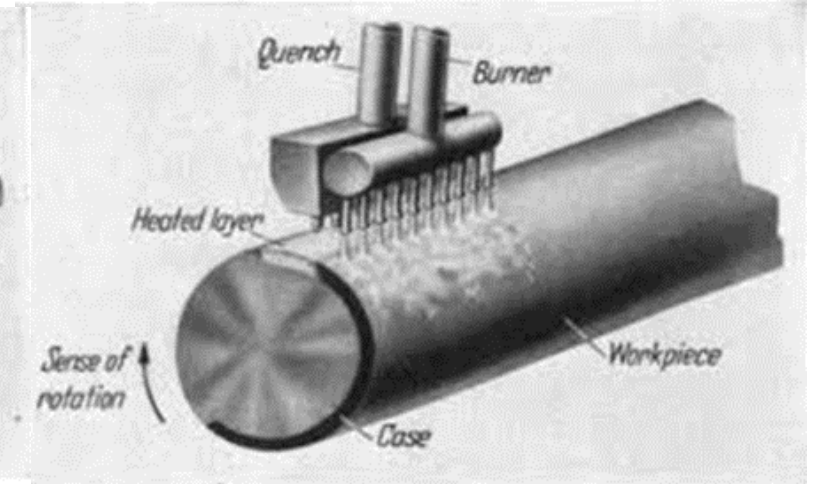
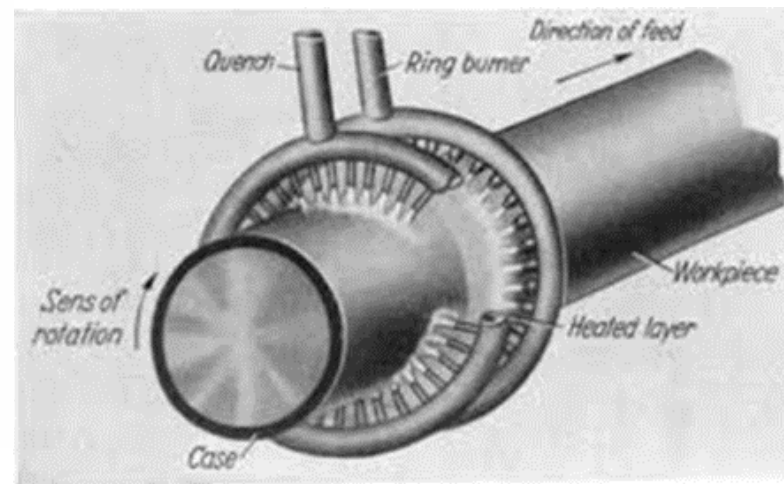
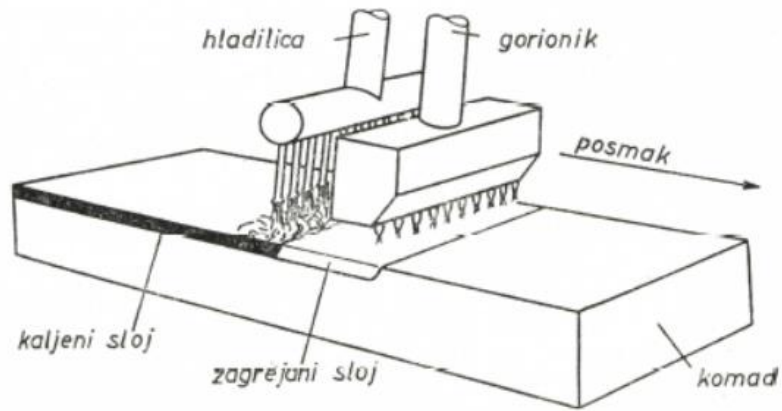
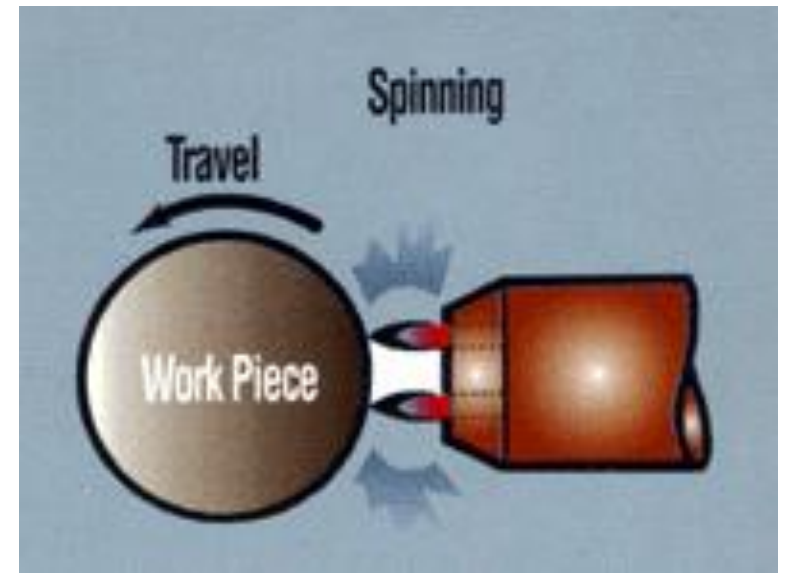
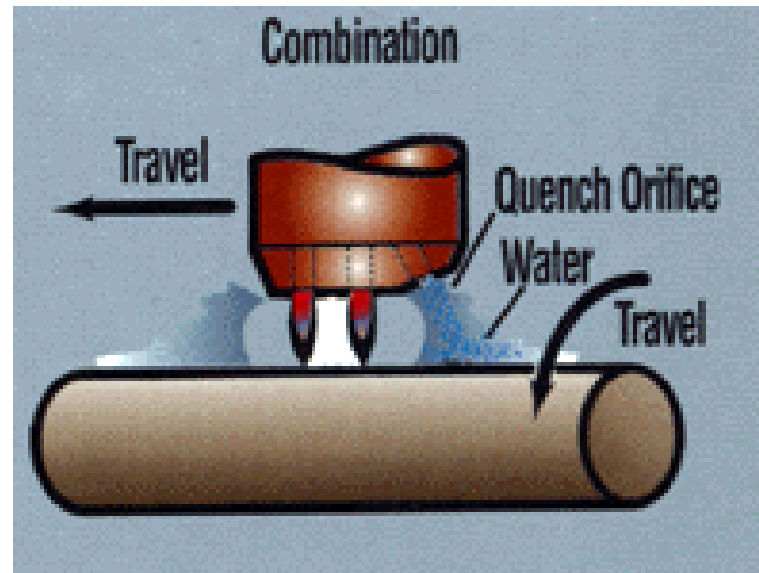
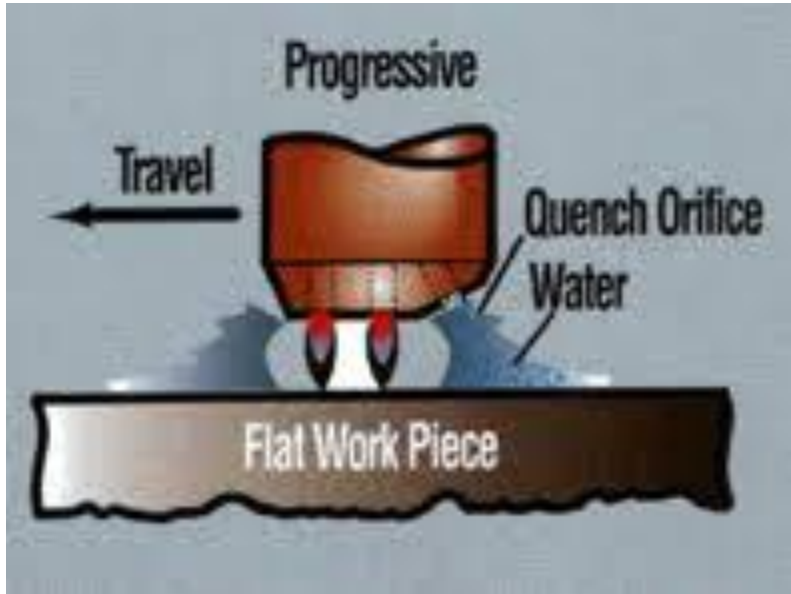
1. **Kaljenje dva boka zuba.** Profilisan gorionik za module $m > 6$. Mala deformacija zuba i velika otpornost na habanje. Koren zuba velika čvrstoća.
2. **Kaljenje međuzublja.** Istovremeno raste otpornost na habanje i dinamička čvrstoća korena zuba (za velike module)
3. **Kaljenje celog zupčanika.** Za male module rotaciono postuno kaljenje



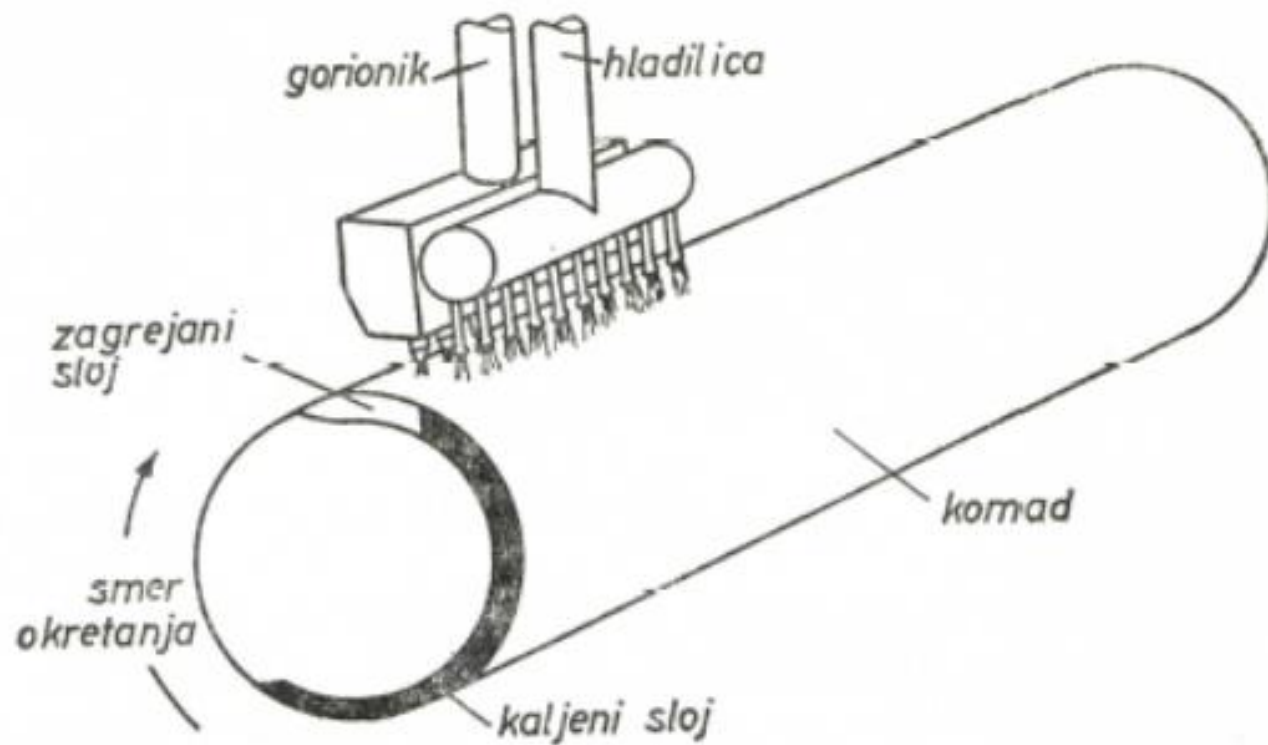
Postupno kaljenje zupčanika



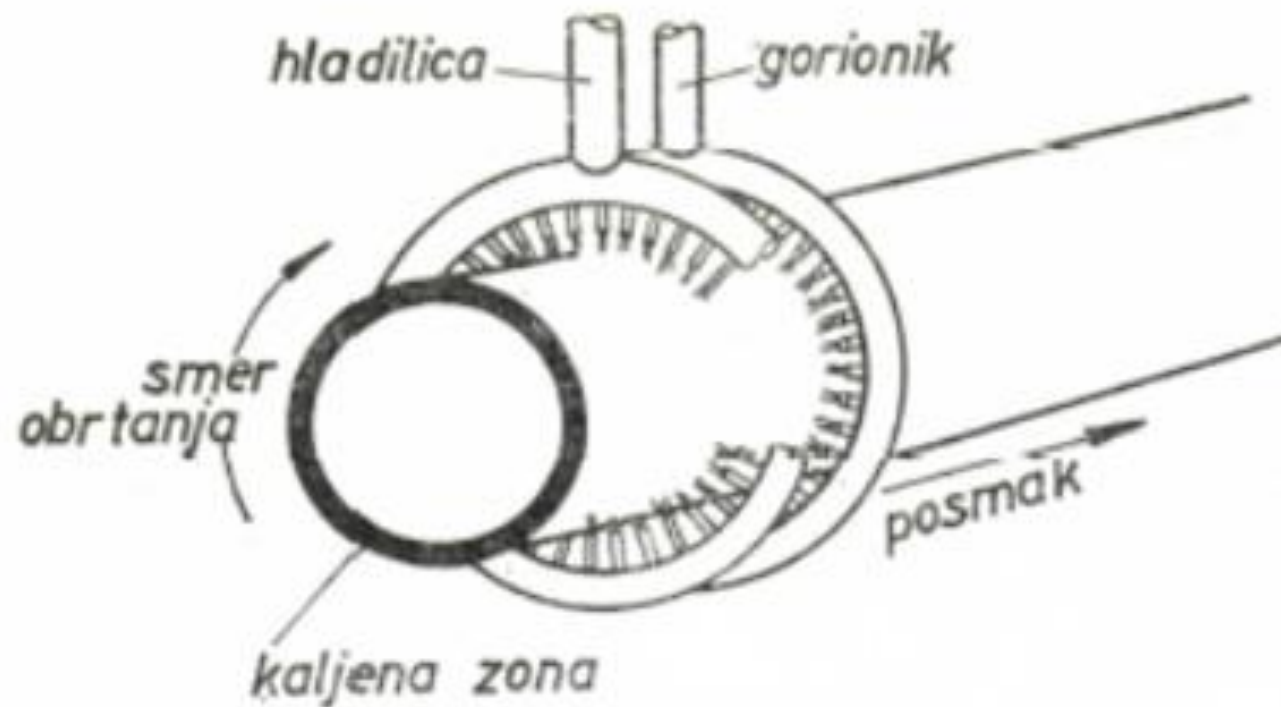
Linijno kaljenje



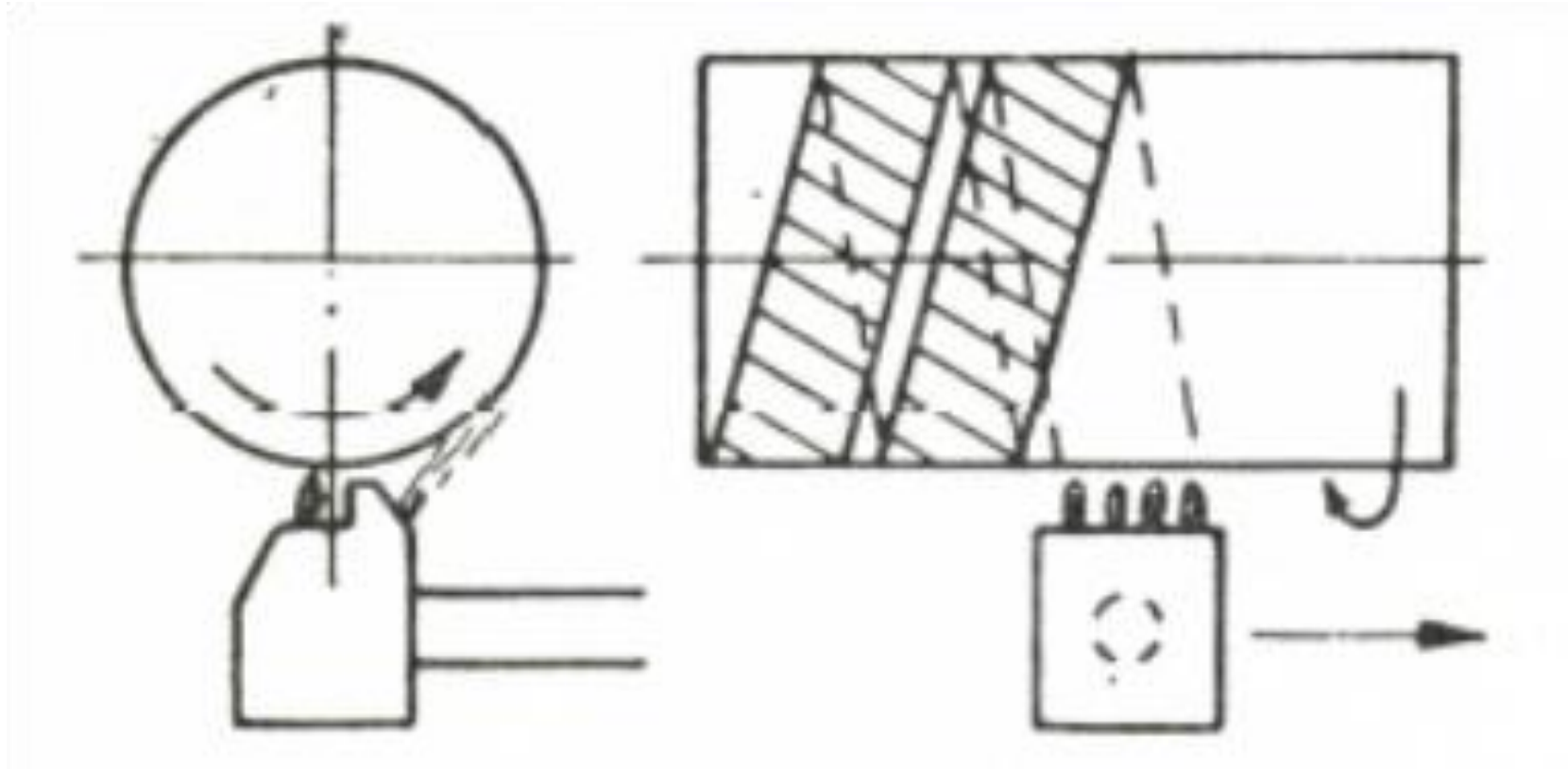
Linijsko kaljenje sa prekidom



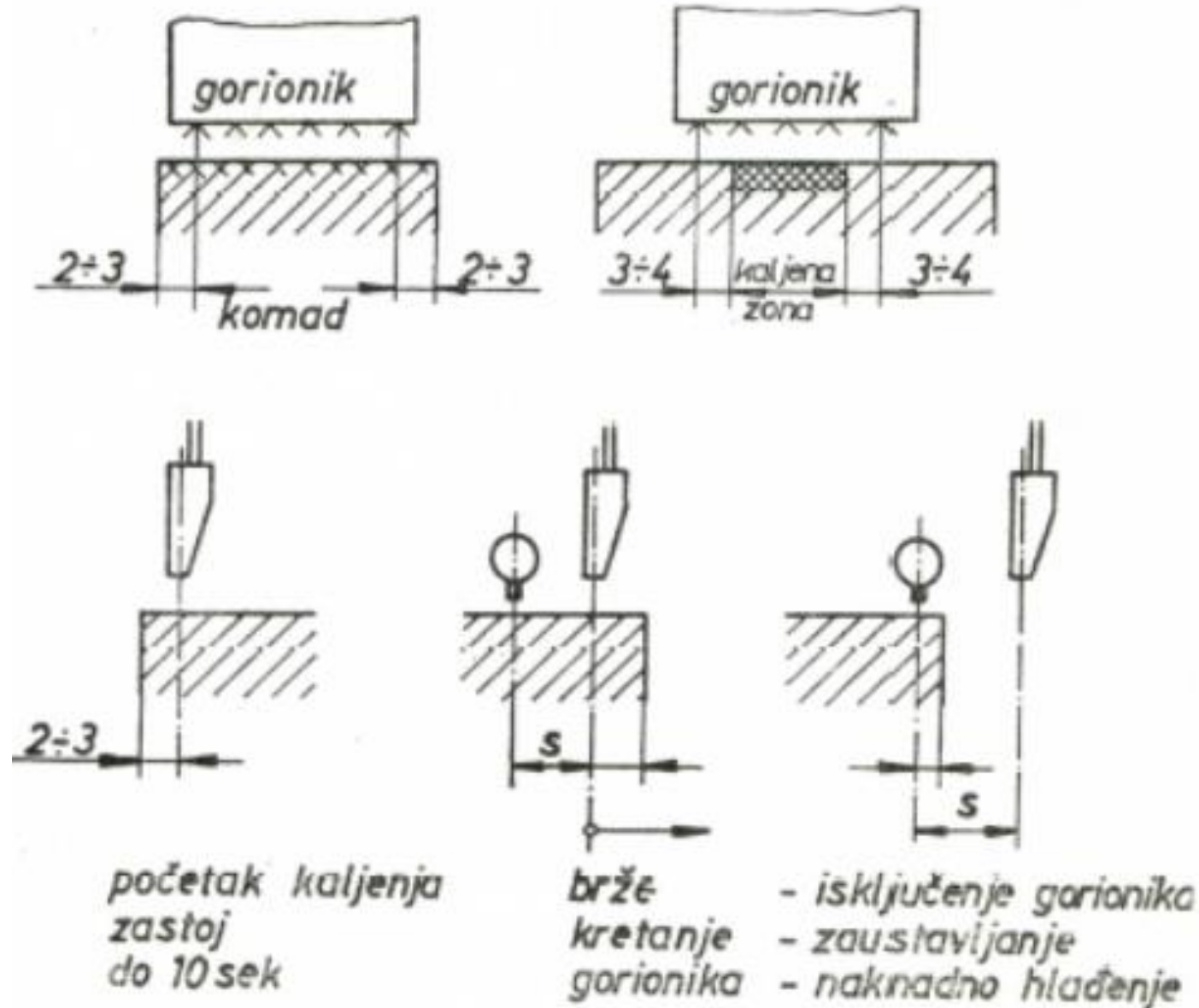
Rotaciono kaljenje sa posmakom



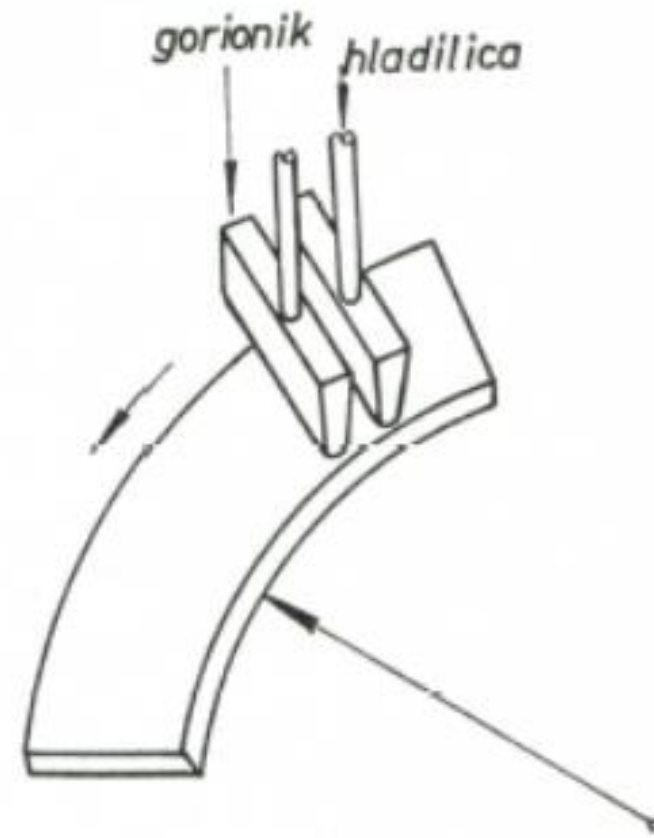
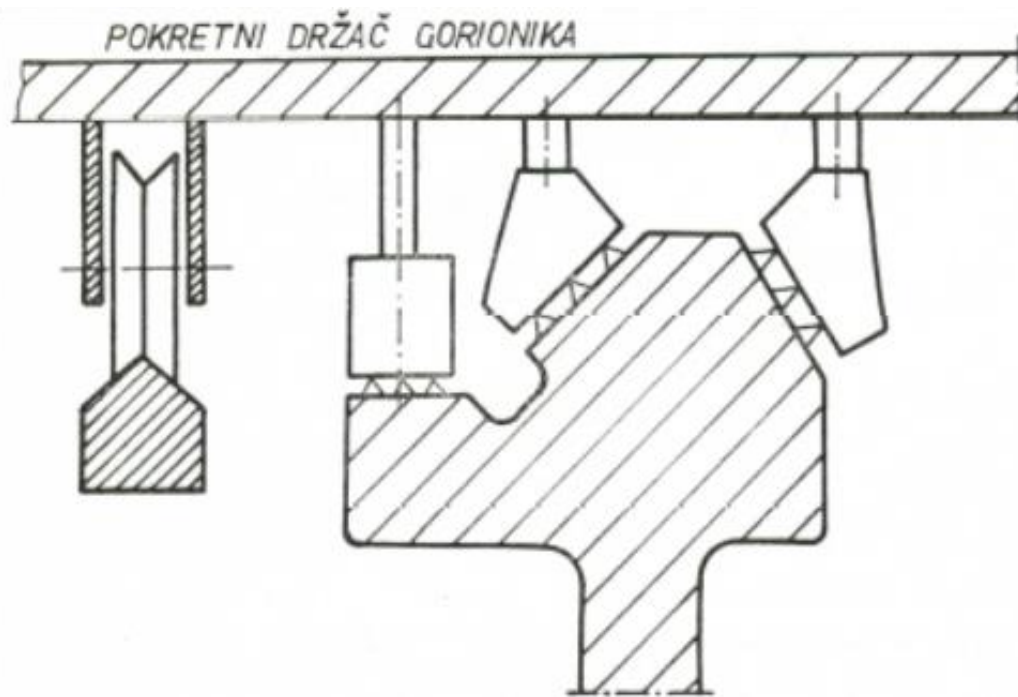
Helikoidno rotaciono linijsko kaljenje (dugi cilindri)



Geometrijski uslovi konstrukcije alata

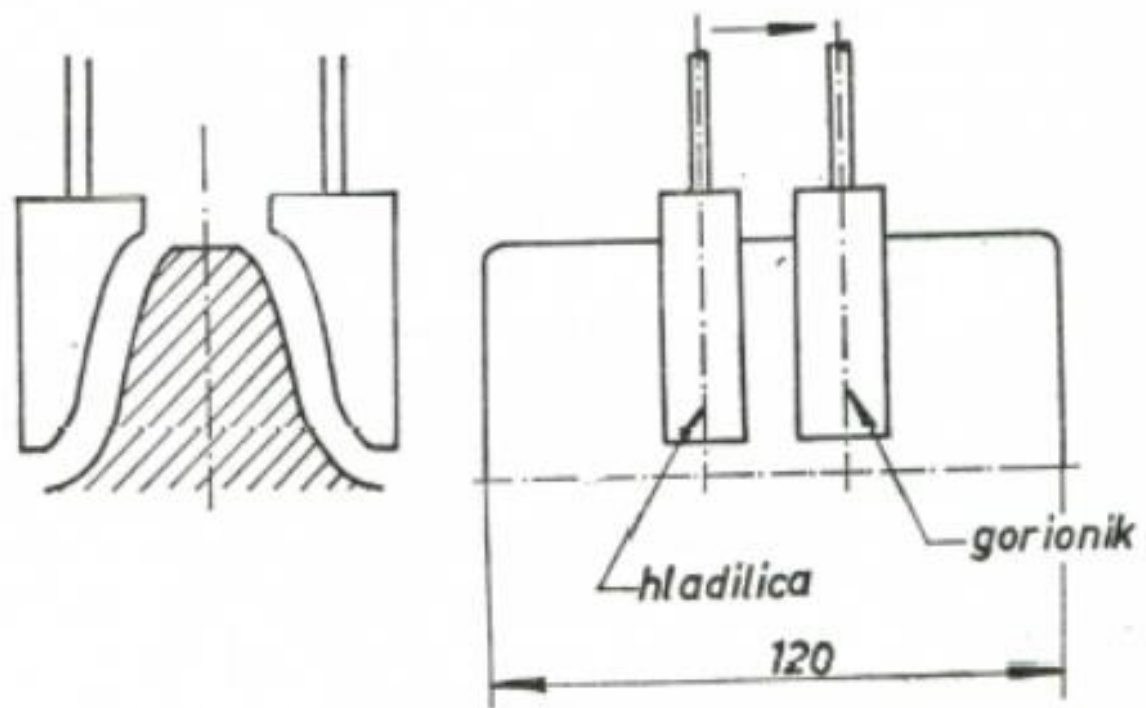


Šema kaljenja vodica struga

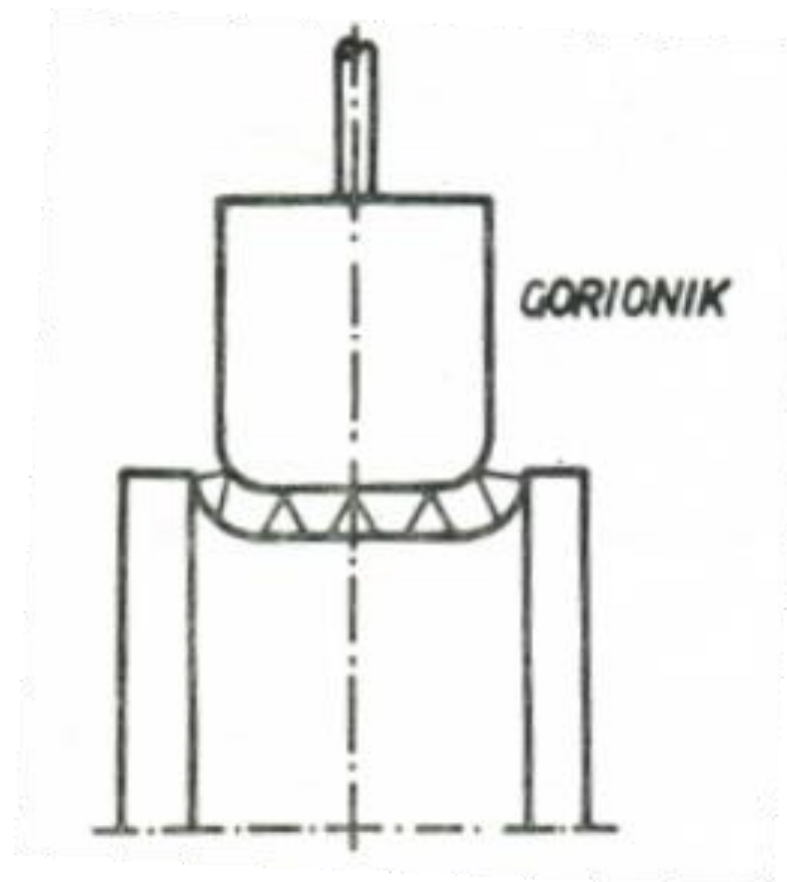


Šema kaljenja lučnog klizača

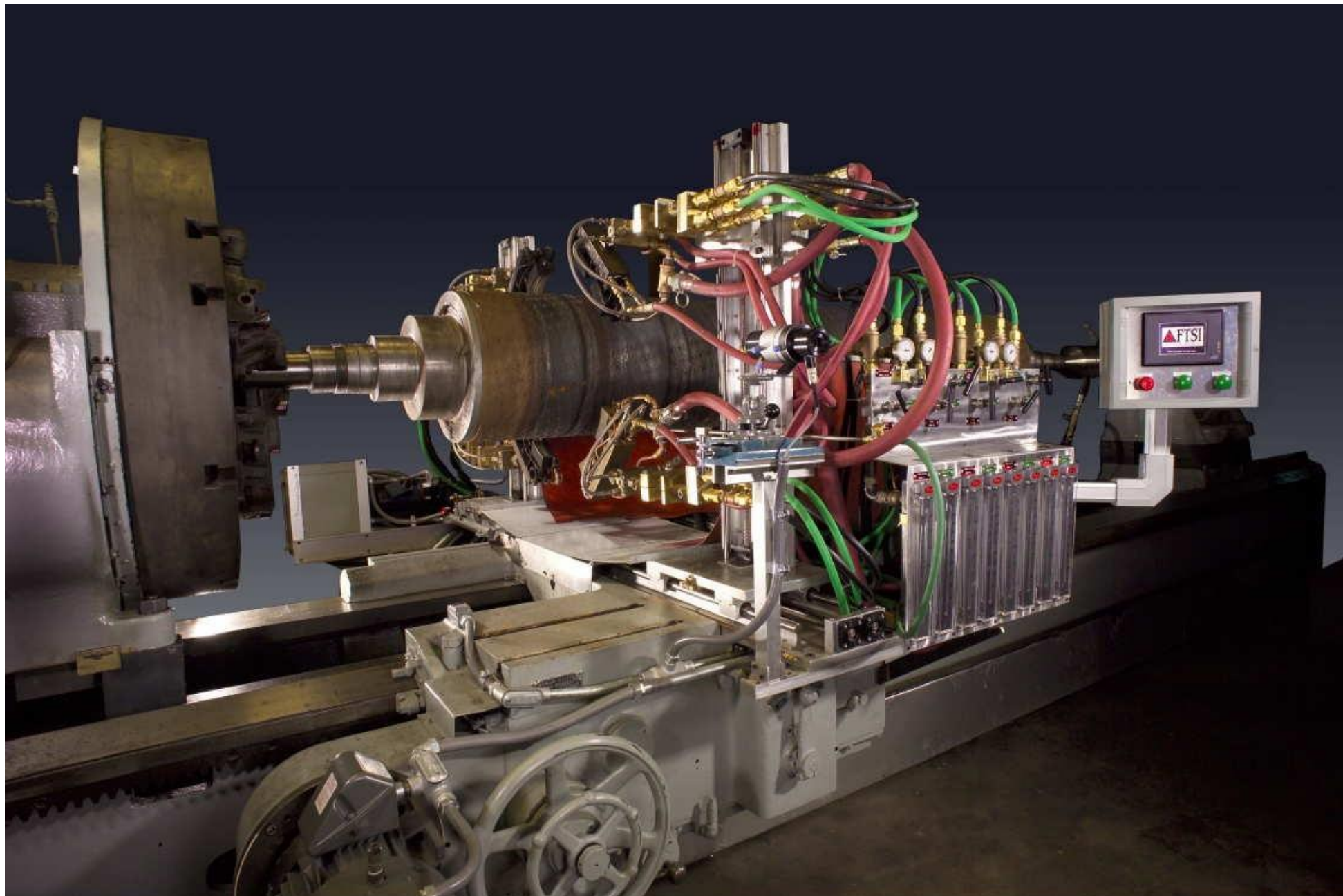
Šema kaljenja velikog zupčanika



Šema kaljenja kranskog točka



KALJENJE GORIONIKOM



INDUKCIONO KALJENJE

- Postavljanjem predmeta u to magnetno polje u njemu se indukuje struja iste frekvencije koja teče površinom čeličnog predmeta (tzv. skin efekt). Površina pruža omski otpor "R" ovoj struji jačine "I". u vremenskom periodu "t", razviće se Jouleova toplota:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad [\text{J}]$$

gdje je:

t – trajanje zagrevanja

I – jačina struje

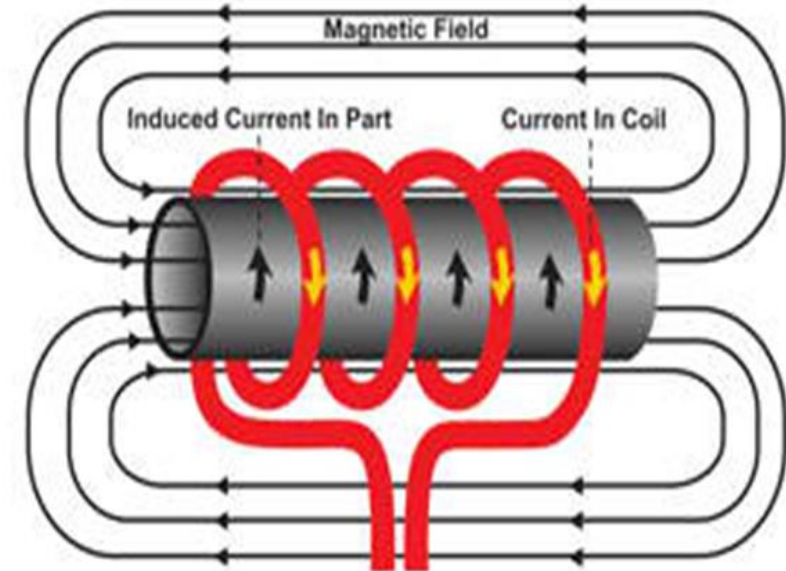
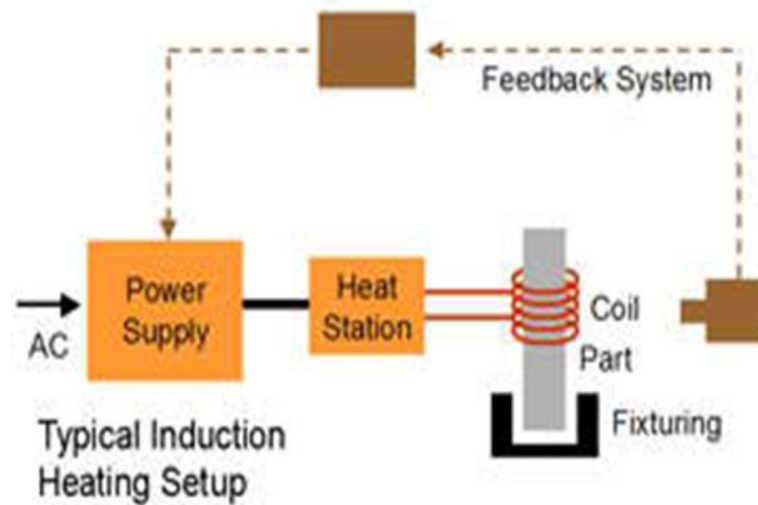
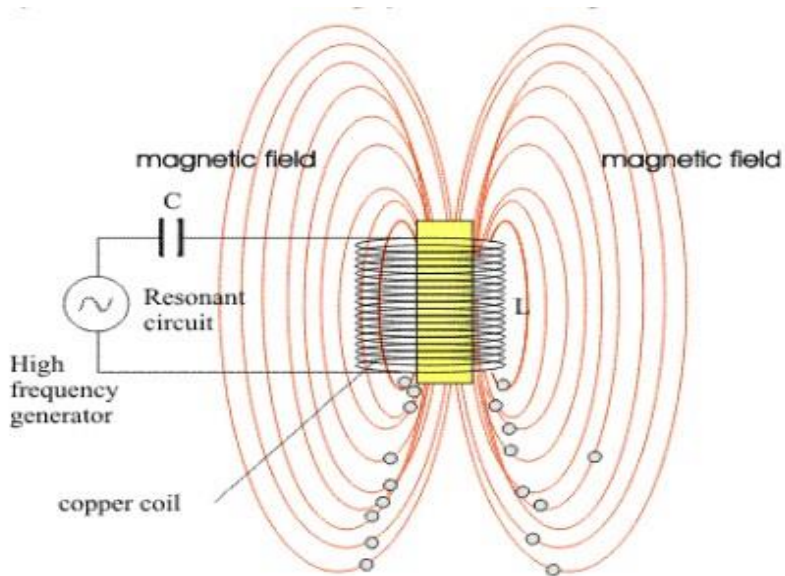
R – omski otpor površine ipredmeta.

Principi i postupci zagrevanja i hlađenja

Zagrevanje

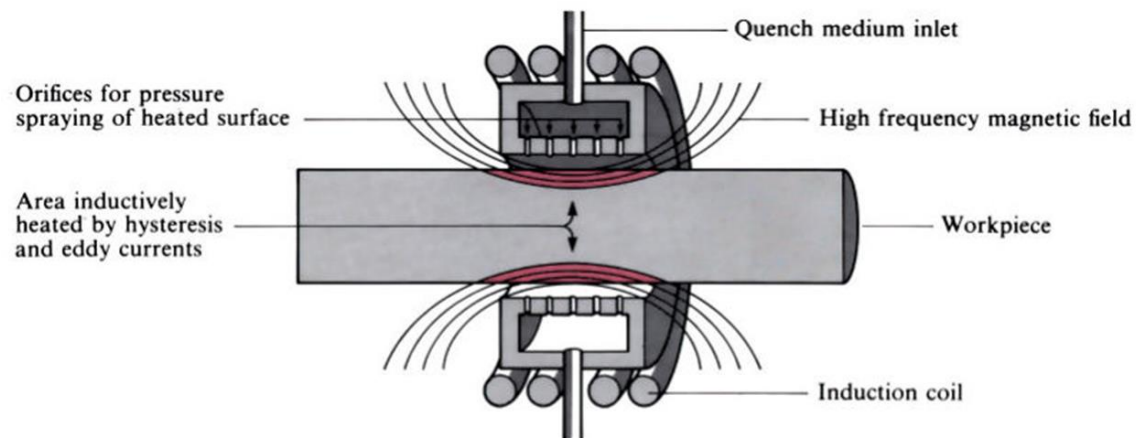
- Kod uobičajenih postupaka zagrevanja u TO radnom predmetu se toplota dovodi zračenjem, konvekcijom i provođenjem, a kod indukcionog kaljenja toplota nastaje od indukovane naizmjenične struje.
- Toplota se razvija na površini radnog predmeta .

Šema indukcionog zagrevanja

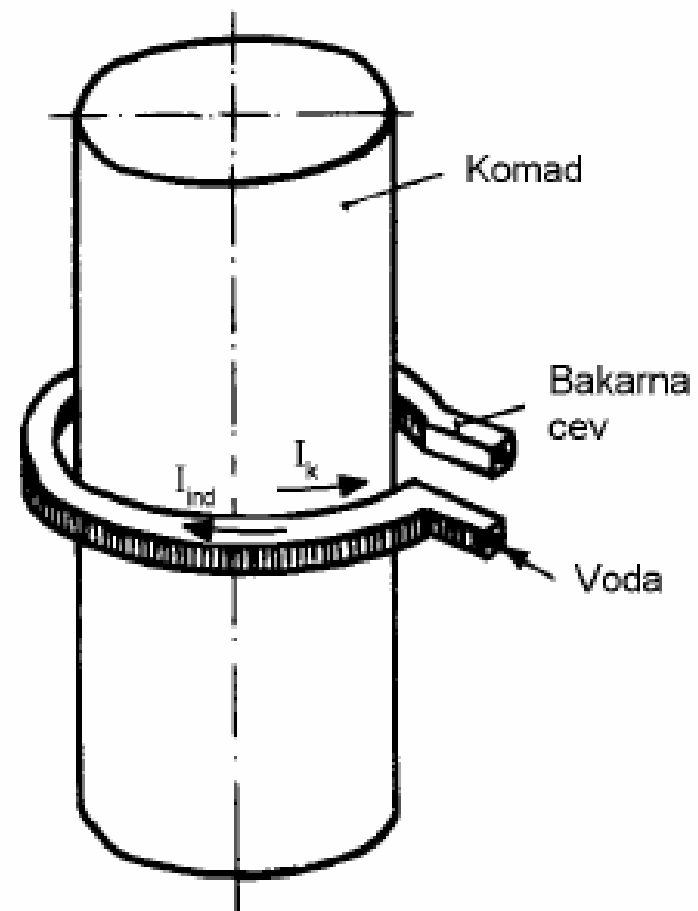
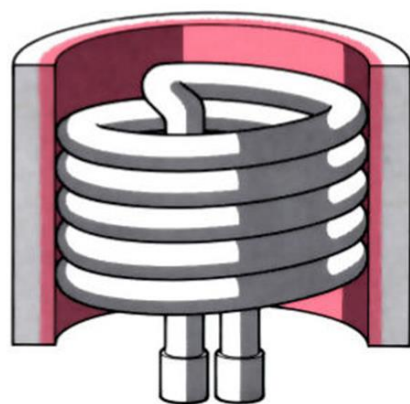
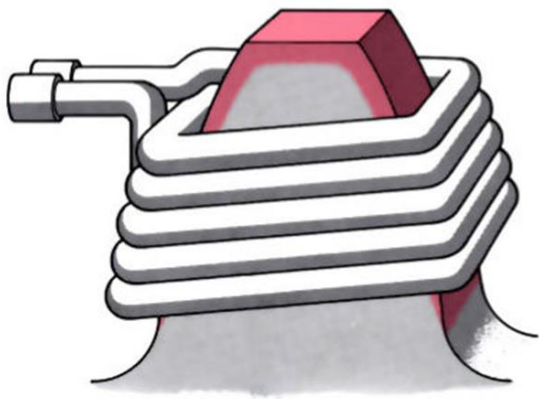


Indukciomo kaljenje

Pri indukcionom zagrevanju se na površini komada generiše indikovana struja (I_k) iste frekvencije ali suprotnog smera od struje koja protiče kroz induktor (I_{ind}) i stvara magnetno polje. Površinski slojevi se najpre zagrevaju sekundarnim strujama, a zatim se zakaljuju prskanjem vodom ili potapanjem u kadu.



Specially shaped coils (internal or external) are used for tubes or gear teeth.



Prednosti:

- Veliki opseg dubina (0,01 mm – 100 mm), (igle za šivenje $d < 1\text{mm}$)
- Kraće vreme zagrevanja od gasnog zagrevanja. (1/10 sec \rightarrow 10 sec)
- Lakše se reguliše i automatizuje proces.
- Lako ponovljiv proces.
- Kvalitet površinskog sloja dobar.
- Snaga postrojenja veća : τ -manje.
- Tvrdća veća od klasičnog kaljenja za 3-4 HRC.

Nedostaci:

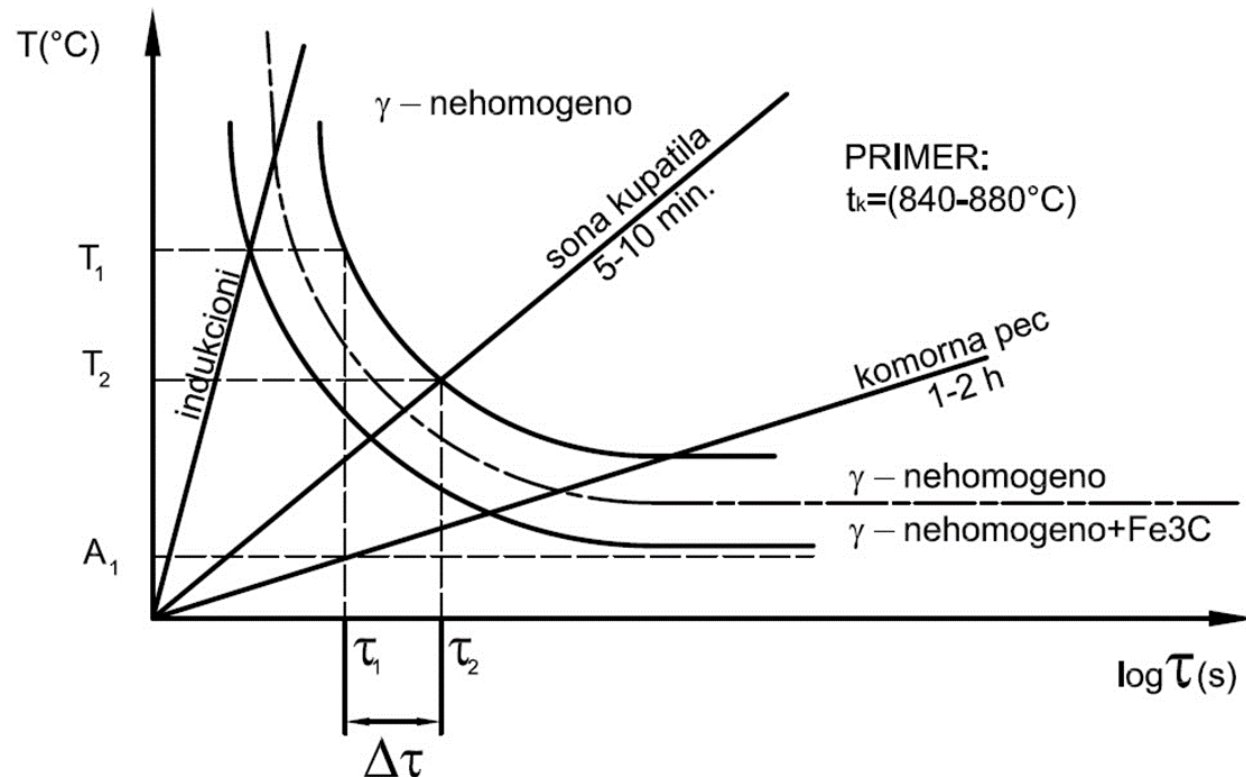
- Skupo postrojenje sa generatorom.
- Nije dovoljno univerzalan. (za određene delove)

Specifičnosti:

- Brzina zagrevanja velika ($V = 500-1000 \text{ }^\circ\text{C}/\text{sec}$)
- Pošto je proces nastajanja austenita difuzioni, zbog kratkoće procesa se neće desiti homogrn raspored ugljenika a austenit će ostati sitnozrni. Posle kaljenja – maretenzit bez iglica.
- Induktor nesme da dodiruje komad.
- Vrtložne - indukovane struje, u komadu nisu ravnomerne.

Uticajni faktori:

- Vrsta čelika
- Sklonost ka obrazovanju austenita
- Vreme zadržavanja
- Temperatura zagrevanja



Raspored gustine struje

- Za utvrđivanje dubine prodiranja struje važi izraz: (tu se razvije 85% toplote).

$$\delta = 5.03 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}}, \quad \text{mm}$$

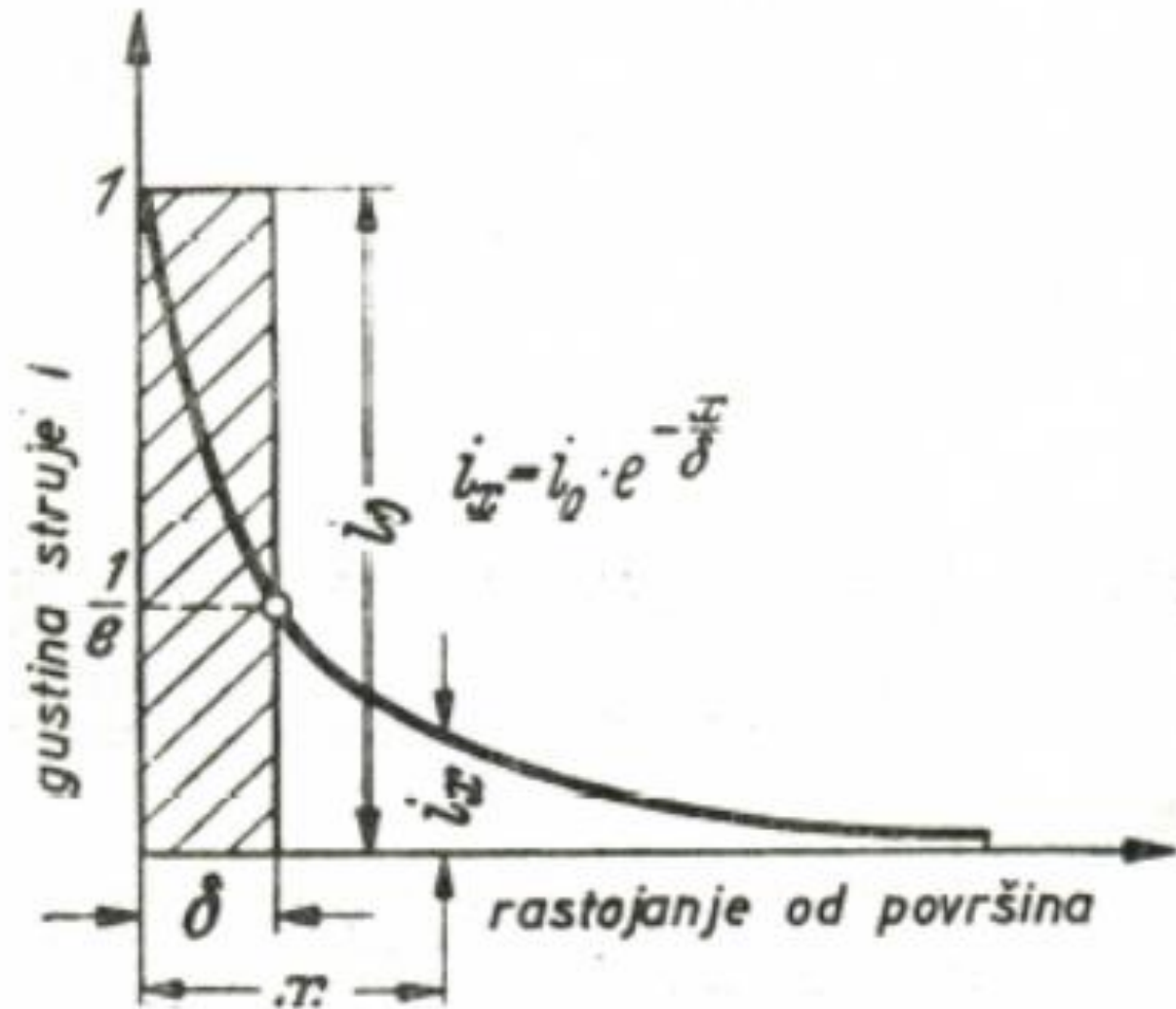
- gde je:

f – frekvencija naizmenične struje,

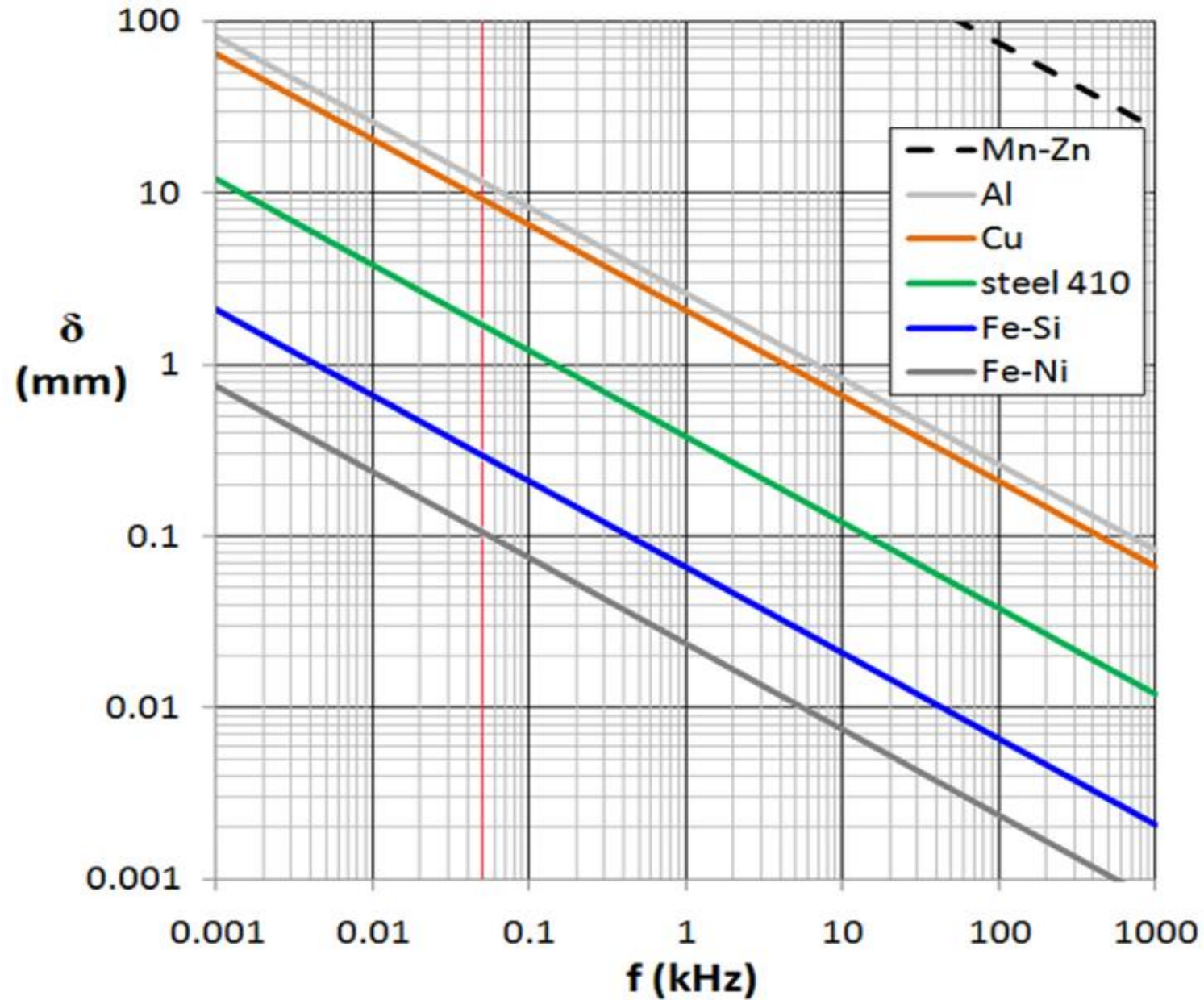
ρ - specifični električni otpor i

μ - magnetni permeabilitet.

- Pošto je dubina sloja obrnuto srazmerna frekvenciji, znači da će dubina progrejanog sloja opadati sa porastom frekvencije.



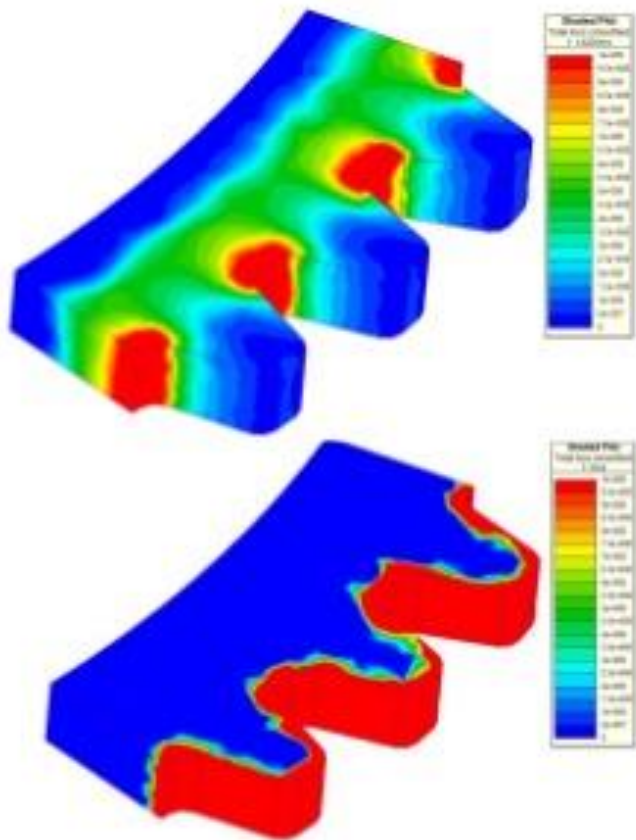
Dubina prodiranja indukovane struje



Tipovi frekvencija i dubina zakaljenog sloja

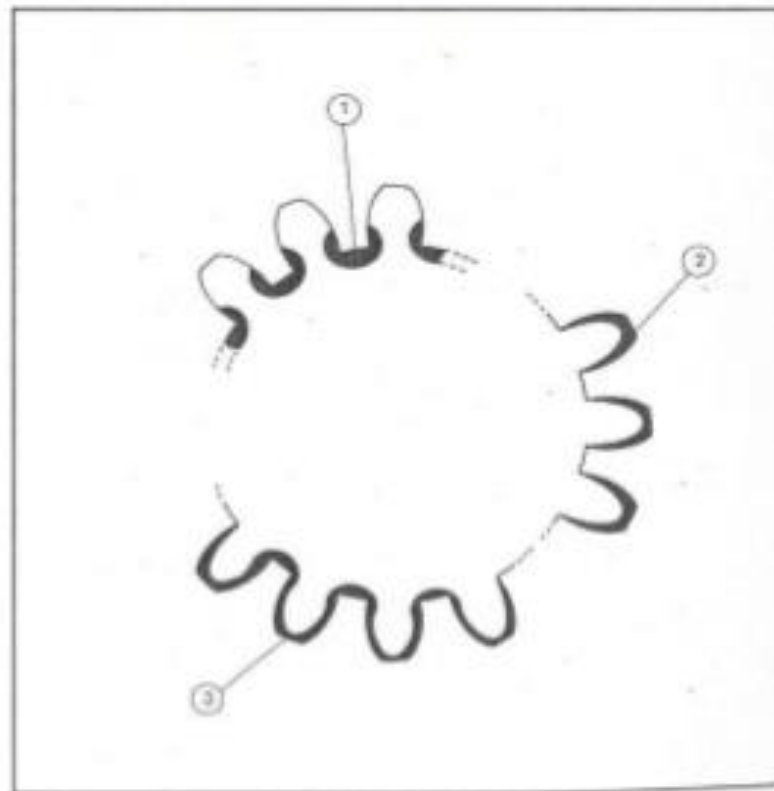
Frekvencija f (Hz)	Tip	Dubina zakaljenog sloja, mm (zagrevanje 5 s na $T \leq 850^{\circ}C$)
50	niska	9
1000	srednja	2
10^4	visoka	0.6
10^5	visoka	0.2
10^6	visoka	0.06

Frequency Selection



Power distribution pattern:
Top – Low Frequency
Bottom – High Frequency

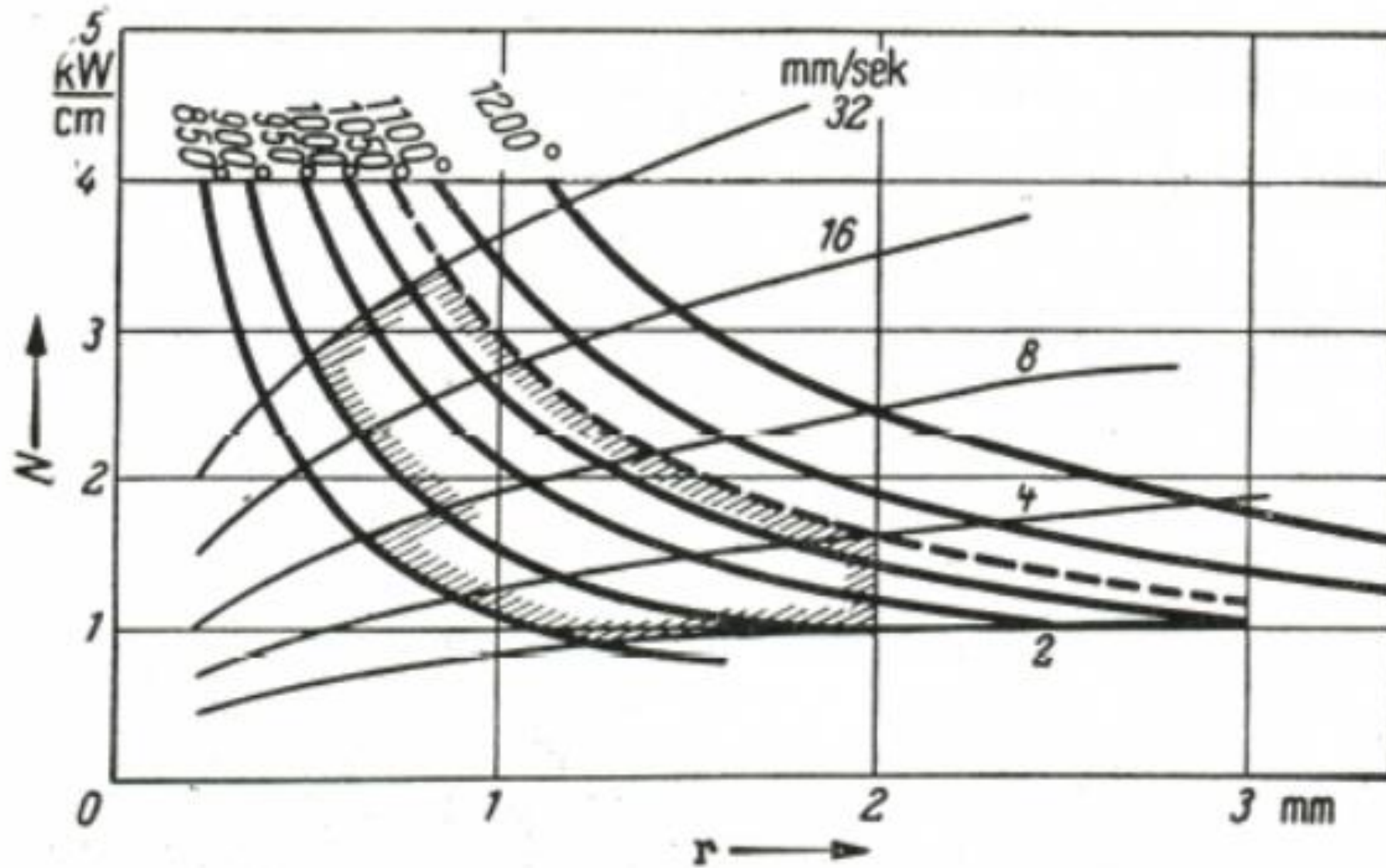
Source: Ajax Tocco Magnethermic



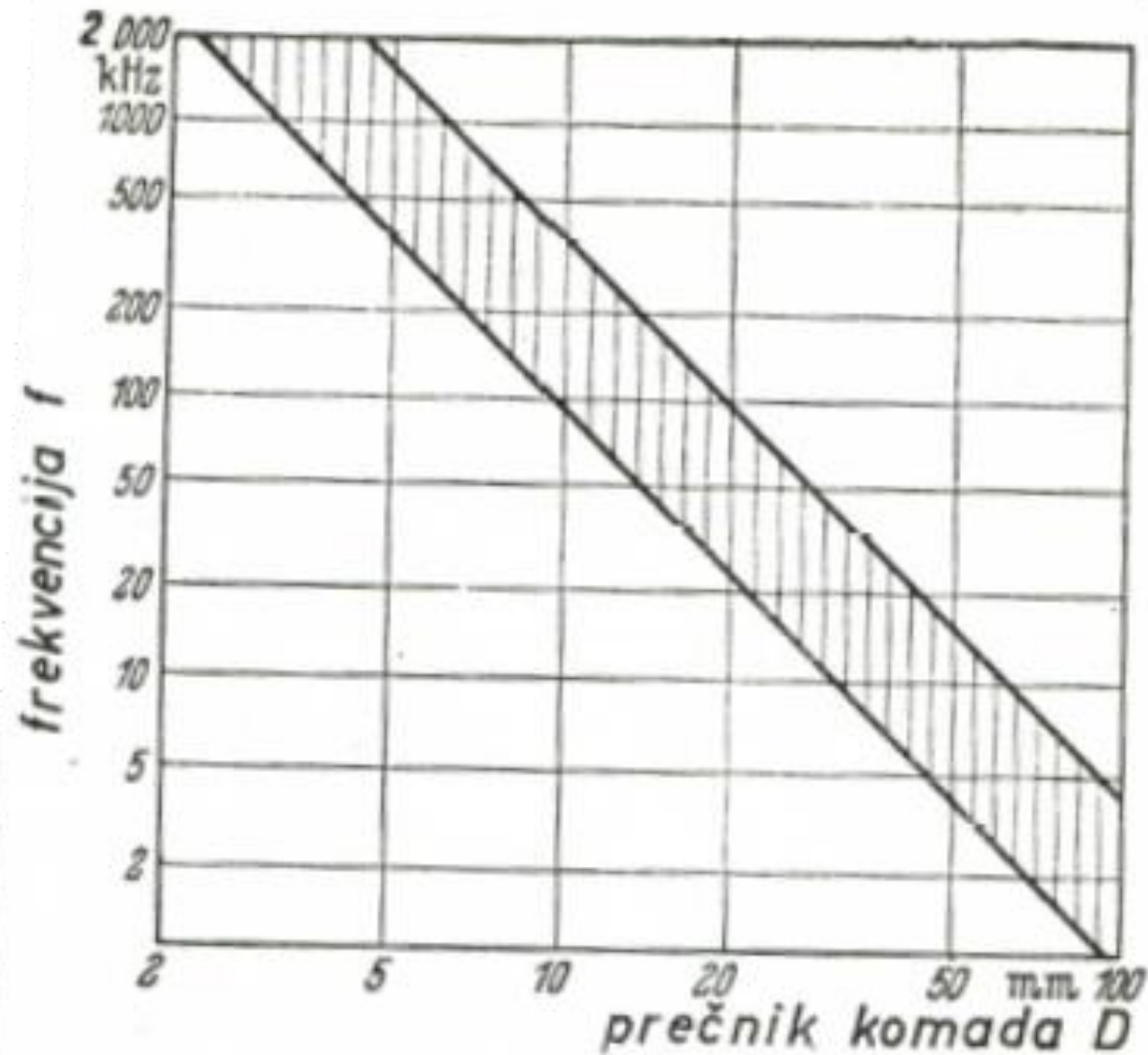
Hardened layer pattern:

- 1 – Low Frequency
- 2 – High Frequency
- 3 – Optimal Frequency, Power and Time

Specifična snaga induktora



Najpovoljnija frekvencija za zagrevanje



Niiska frekvencija generatora: $f=50-300$ Hz, prodor 75mm. Ne koristi se za kaljenje već samo za zagrevanje.

Srednja frekvencija: $f=0,5-10$ kHz, $\delta=20-3$ mm, $Dk=\text{min } 3\text{mm}$.

(rotacioni generator frekvencije)

Visoka frekvencija: $f=0,1-2,5$ MHz, $\delta= 1-0,3$ mm, $Dk= \text{min } 0,3\text{mm}$.

Impulsni generator

Uticaj zazora na prenos energije:

$$\text{snaga: } N = \frac{I^2}{a} 10^{-2} \sqrt{\frac{f\mu}{10}} \text{ (W)}$$

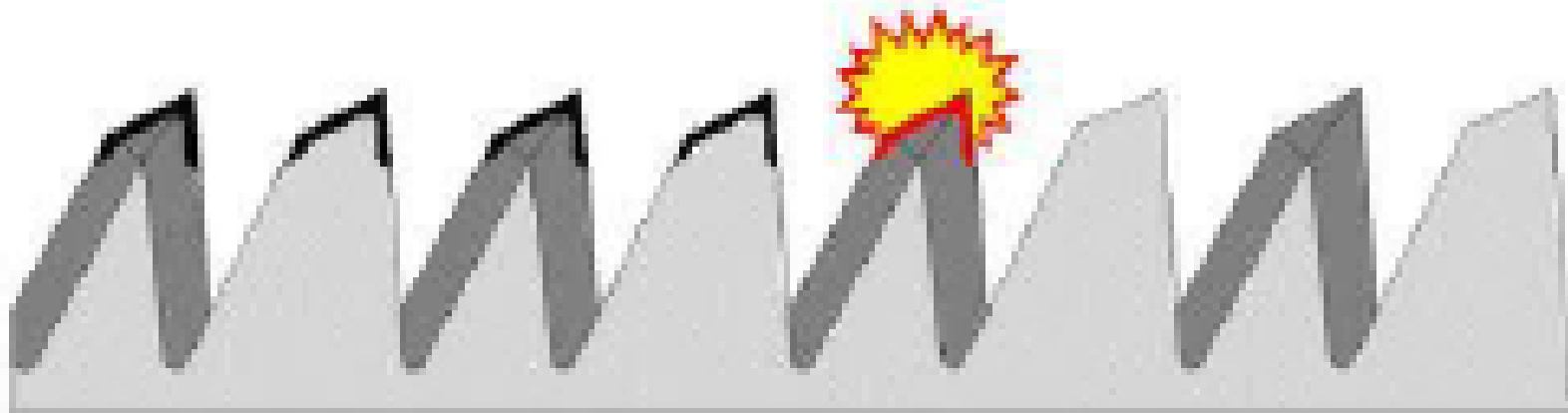
- Zazor kod komada koji stoje: 0,5mm
- Zazor kod komada koji se krecu: 1mm

Optimalne vrednosti Dk za određenu frekvenciju

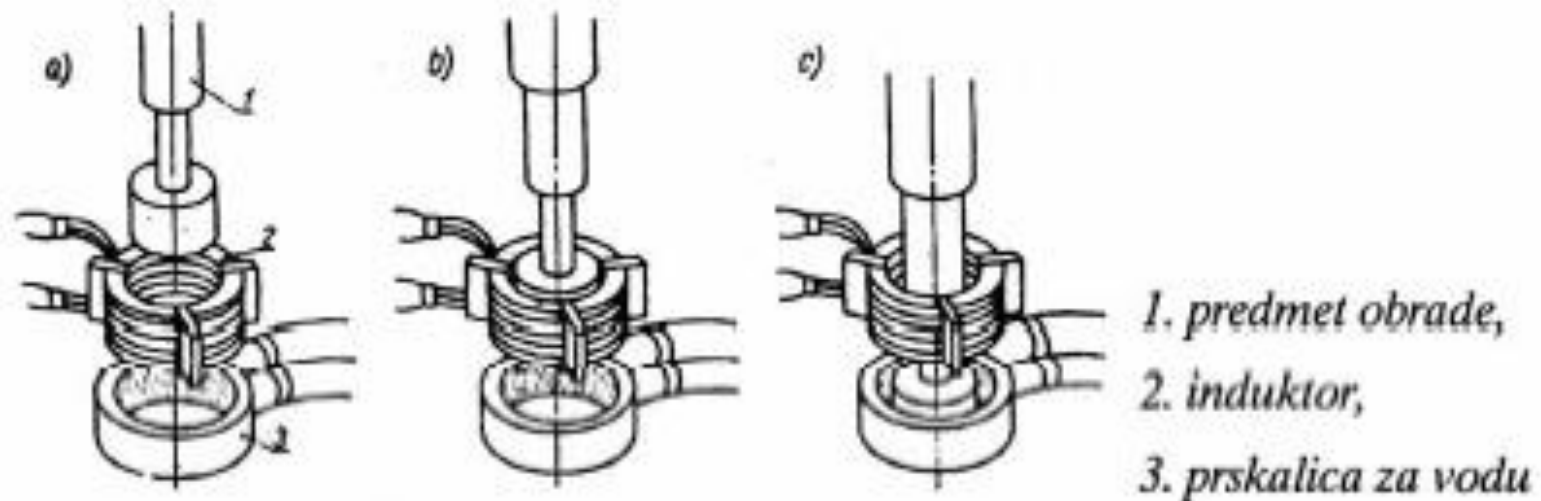
Oblast f	Izvor energije	Radna f	Dubina prodiranja δ	Najmanje Dk	Najveće Dk	Najmanji prečnik komada
		Hz	mm	mm	mm	mm
Niska f	Naizmenična struja	50Hz	75	-	-	300
Srednja f	Rotacioni pretvarač	0,5-10 kHz	20-6	1,5	-	15
Visoka f	Generator sa varnicom	0,1-2,5MHz	1-0,3	0,2	2-3	1-2
Najviša f	Impulsni generator	Do 30 MHz	0,1	0,01	0,1	0,5-1

Visokofrekventno impulsno kaljenje

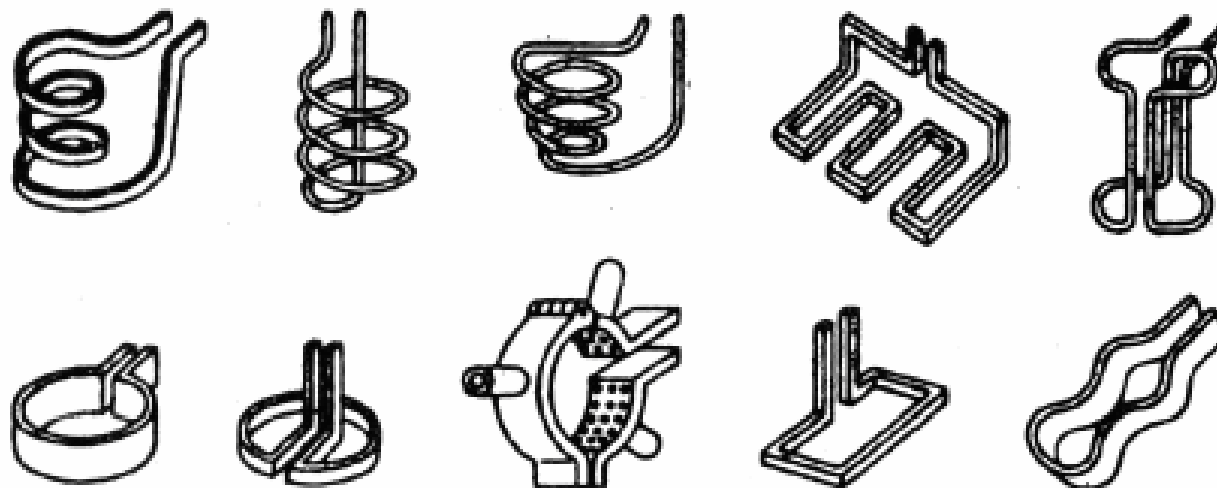
- Pražnjenjem kondenzatora, kojeg nabija visokofrekventni generator, u kratkim impulsima (1-100 ms) postiže se visoka koncentracija energije. Koristi se za kaljenje proizvoda malih dimenzija (npr. zubi lista testere, slika). Uređaj za kaljenje je skup s preciznom kontrolom vremena.



Indukciono kaljenje



Različiti tipovi induktora



Različiti tipovi induktora

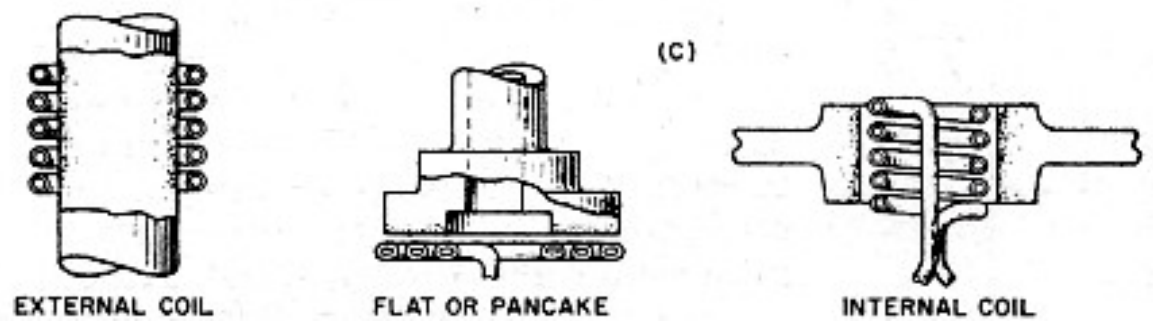
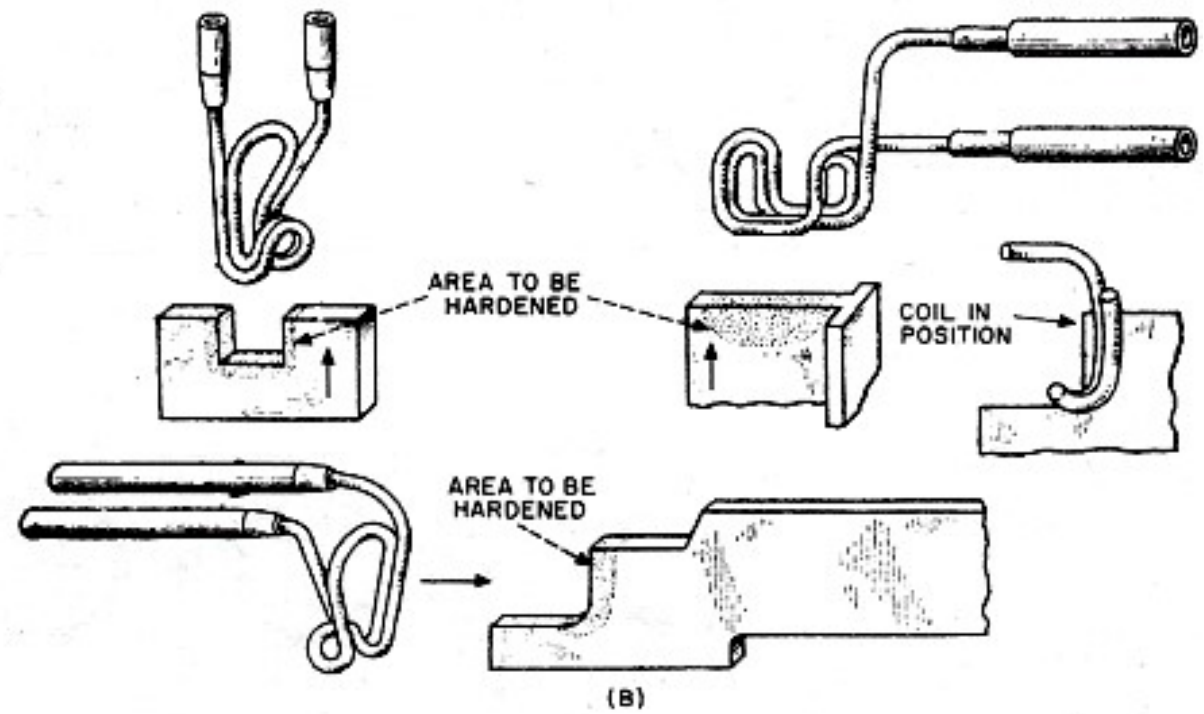
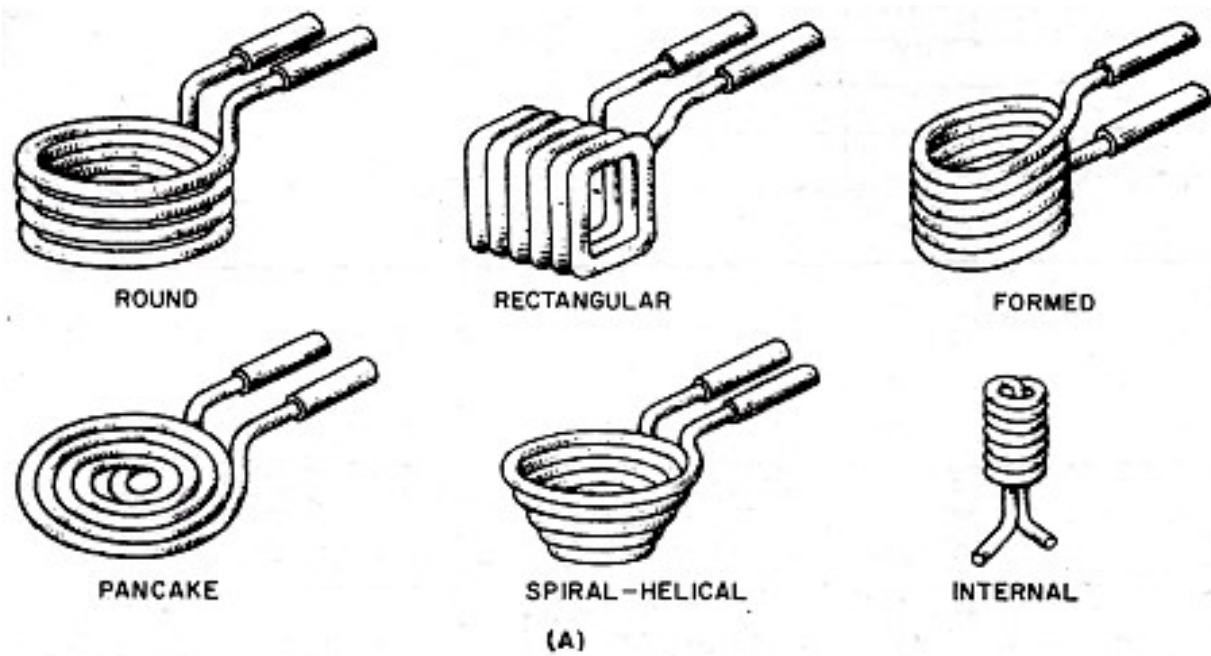


Fig. 9. This illustration shows typical work coils that are employed in induction heating equipment. (A) shows some of the common shapes used. (B) illustrates how special shaping is used to fit the metal sections that are to be heated. (C) shows placement of work coils with respect to work pieces.

Postupci indukcionog kaljenja

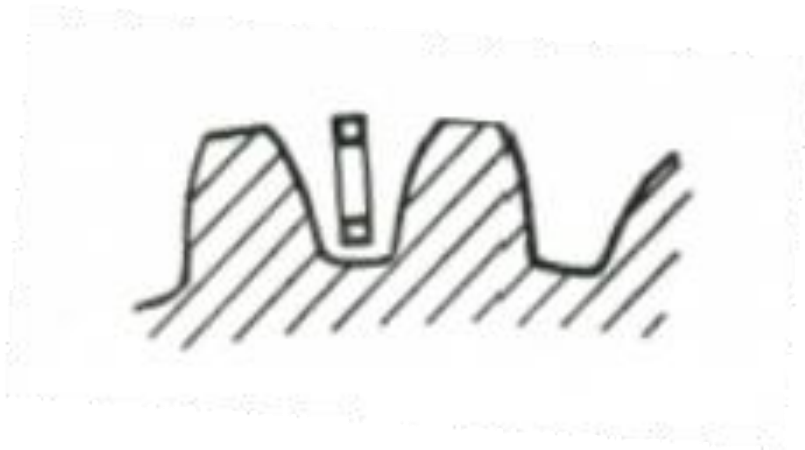
Postupno kaljenje:

- Postupno bez kretanja
- Postupno rotaciono kretanje

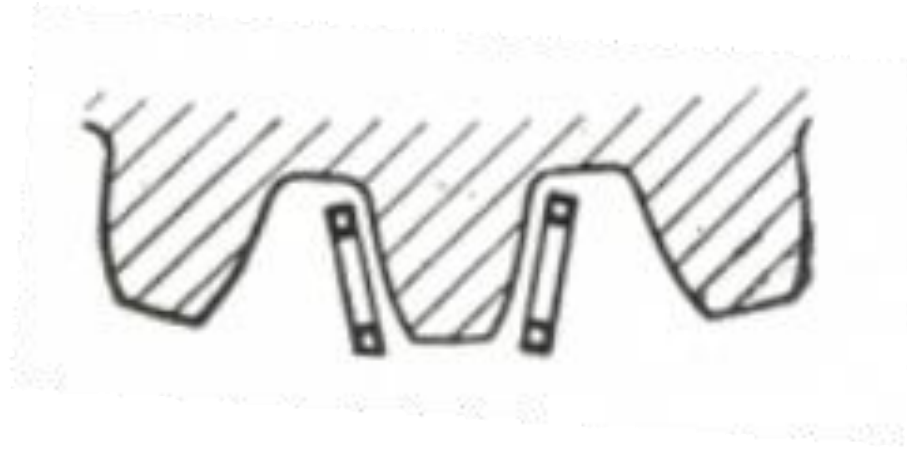
Linijsko kaljenje:

- Linijsko kaljenje sa posmakom
- Rotaciono kaljenje sa posmakom
- Helikoidno kaljenje
- Kaljenje sa prekidom

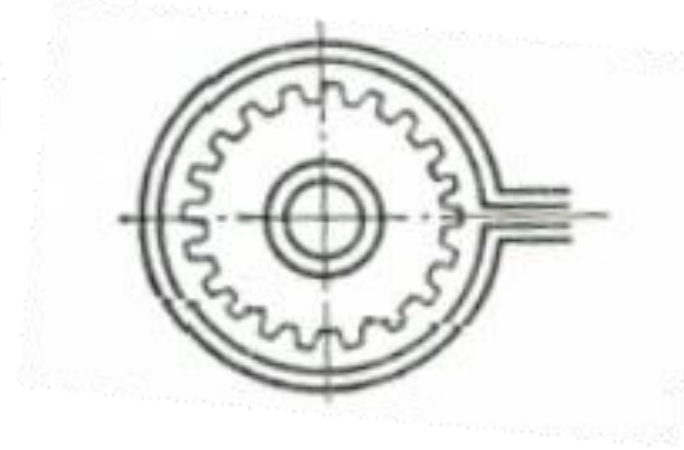
Kaljenje međuzublja



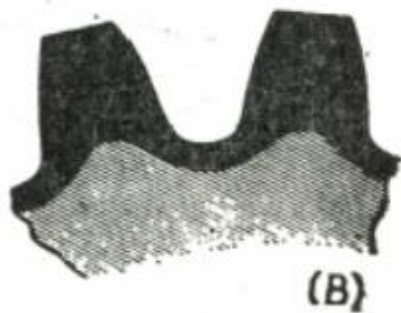
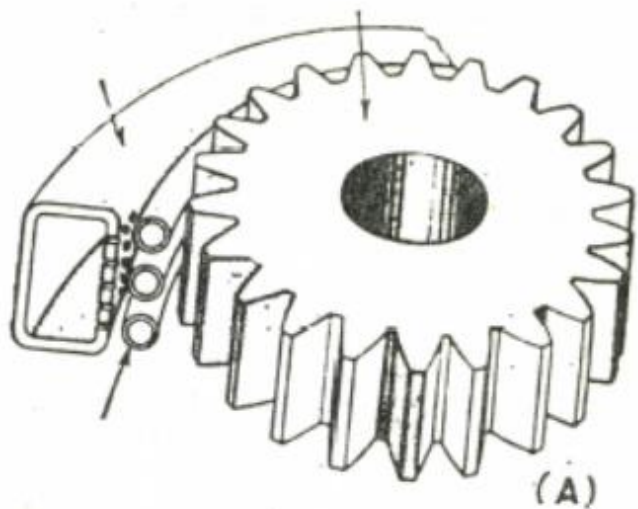
Kaljenje bokova zuba



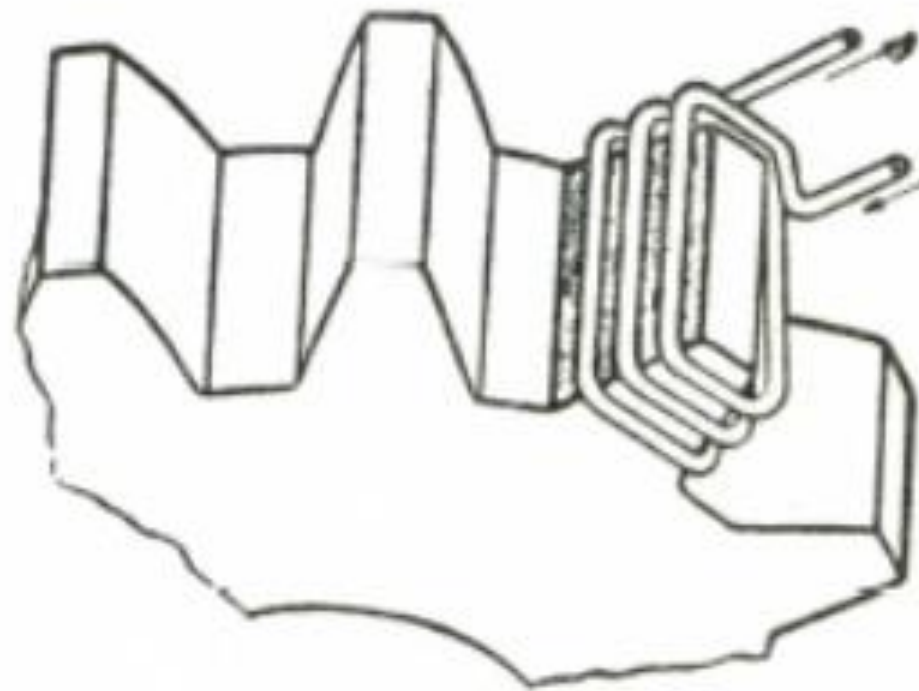
Kaljenje svih zuba



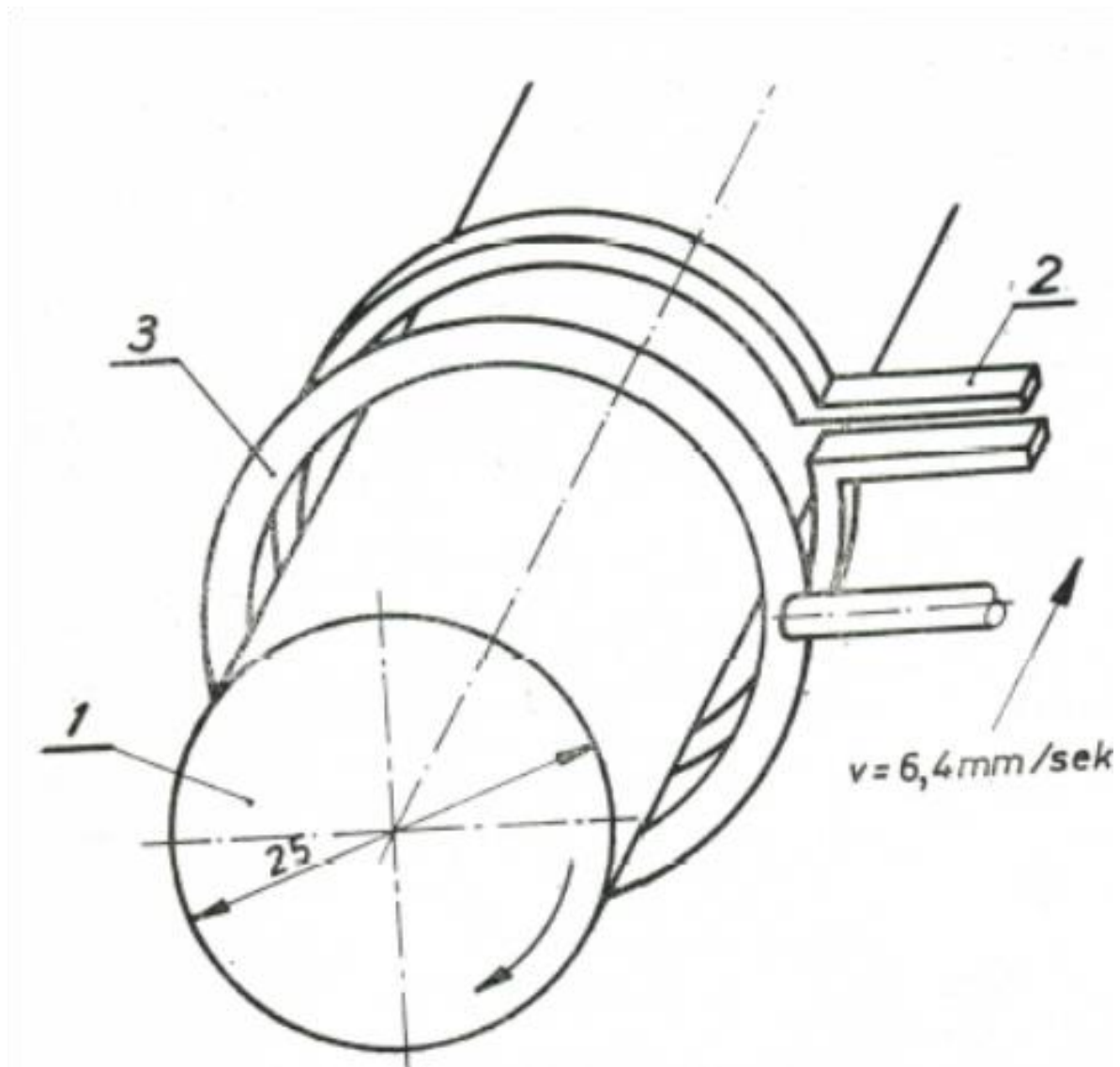
Kaljenje svih zuba



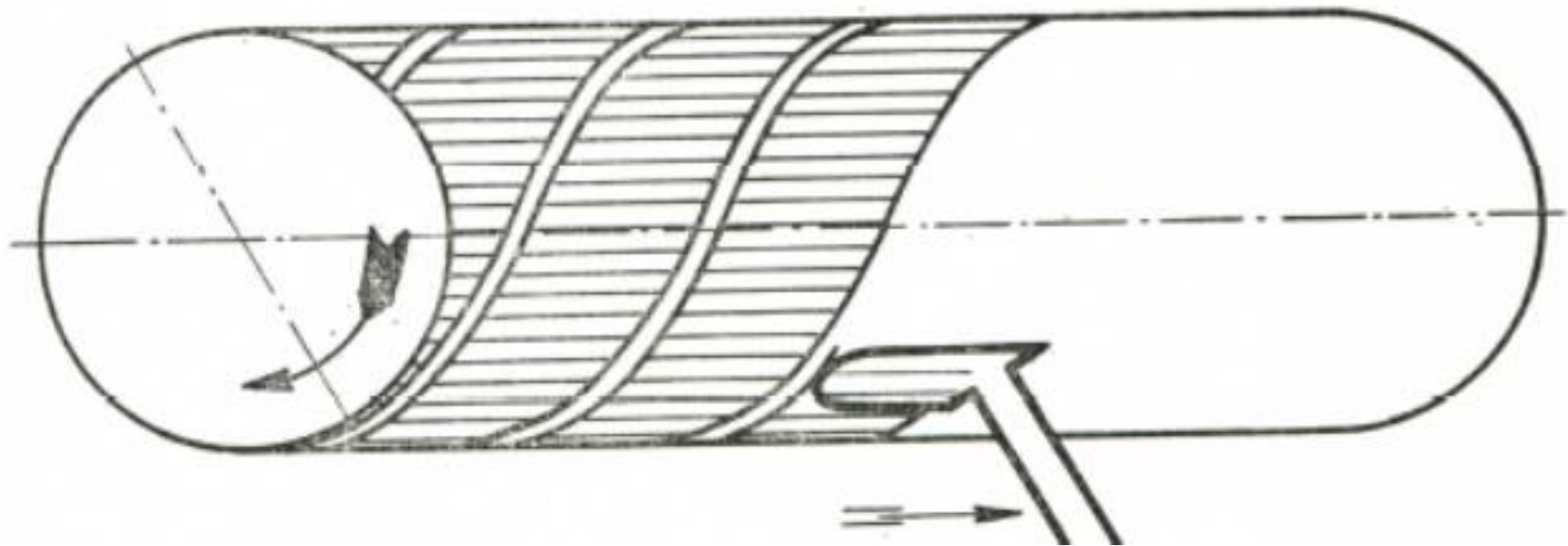
Kaljenje bokova zuba

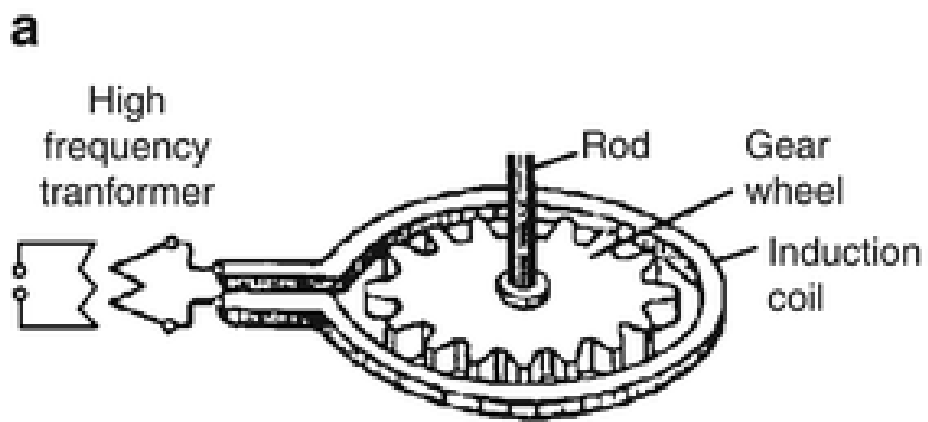


Linijsko kaljenje

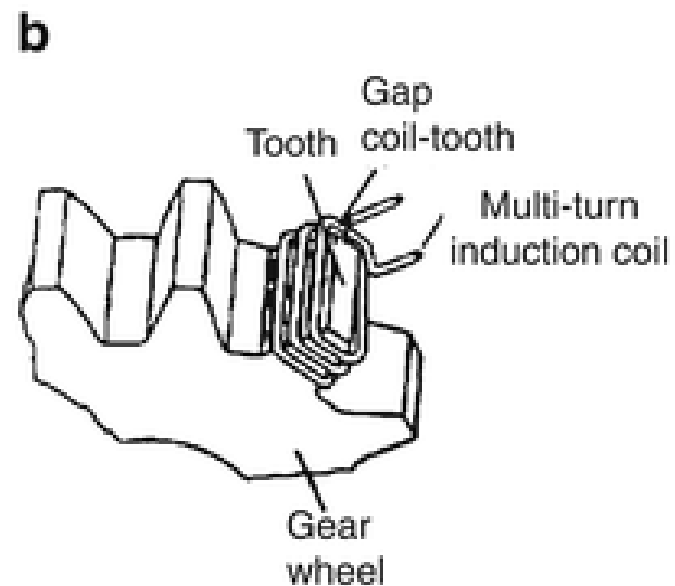


Helikoidno linijsko kaljenje

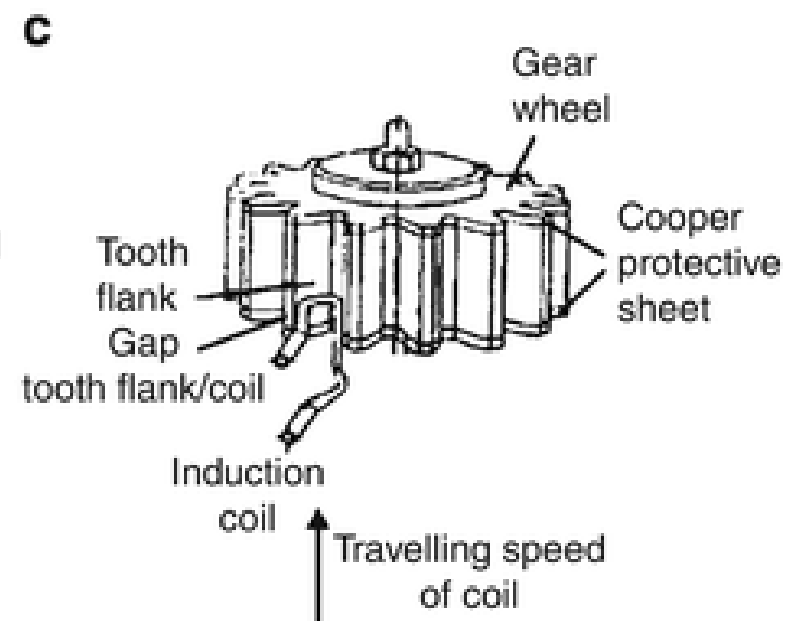




Single - shot hardening of gear wheel

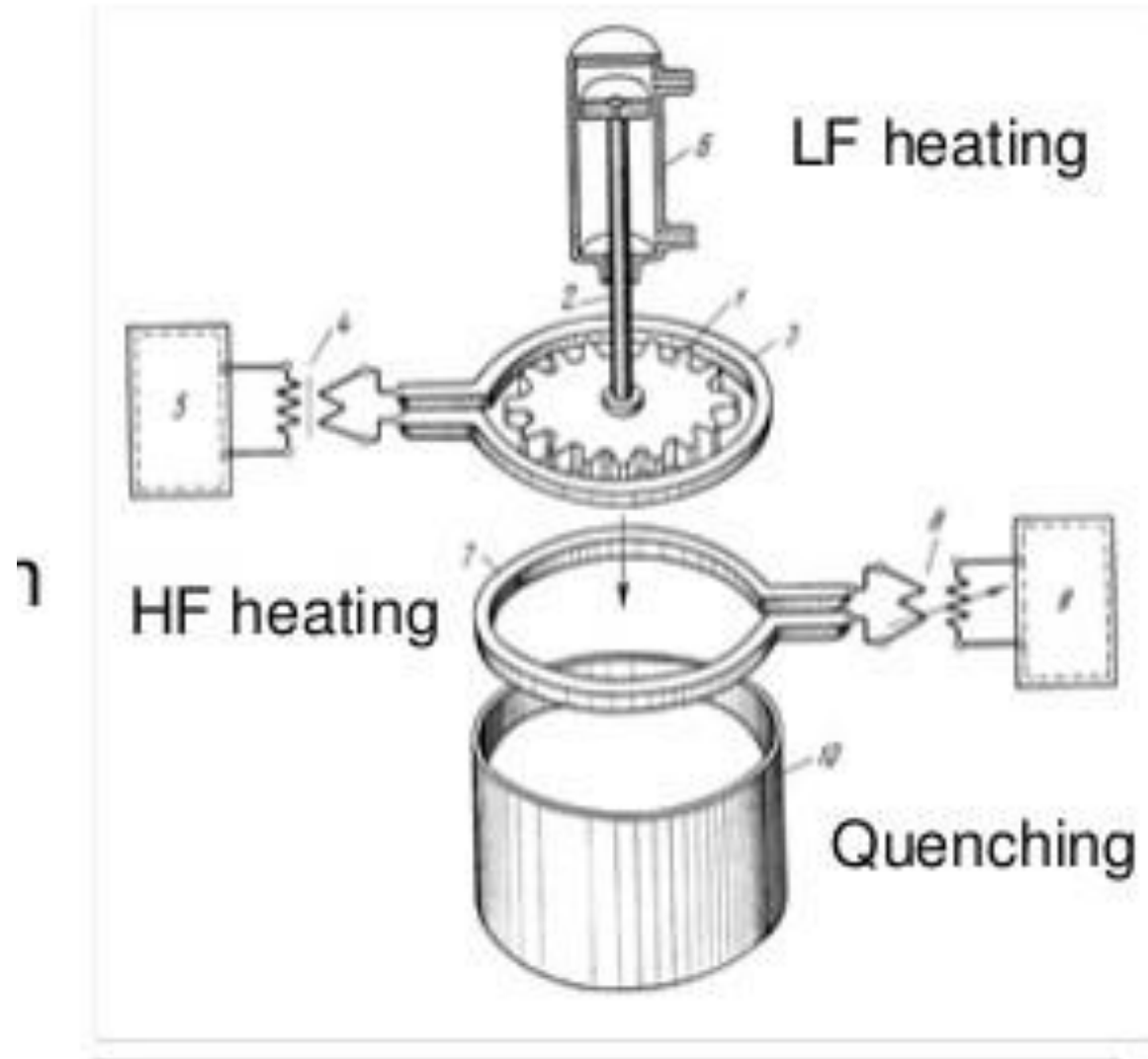


Coil installing around tooth



Coil installing in the gap

Uređaj sa dva induktora (dve frekvencije)

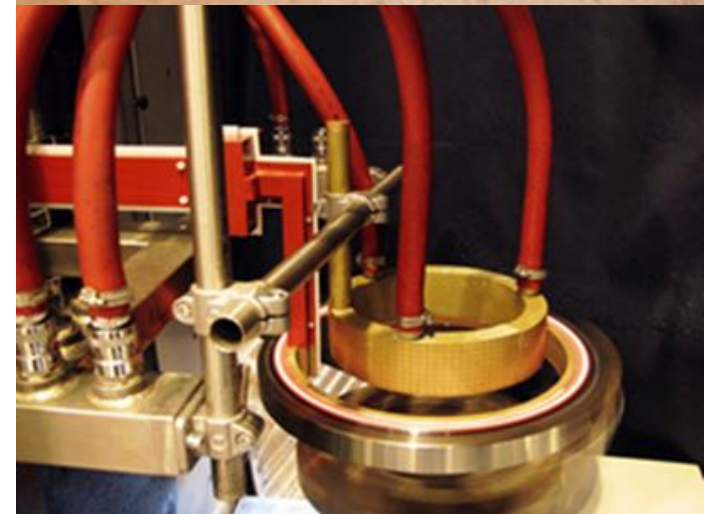


Univerzalna vertikalna i horizontalna mašina za indukciono kaljenje

- Za kaljenje zupčanika, vratila i različitih ležajeva.

Karakteristike mašine:

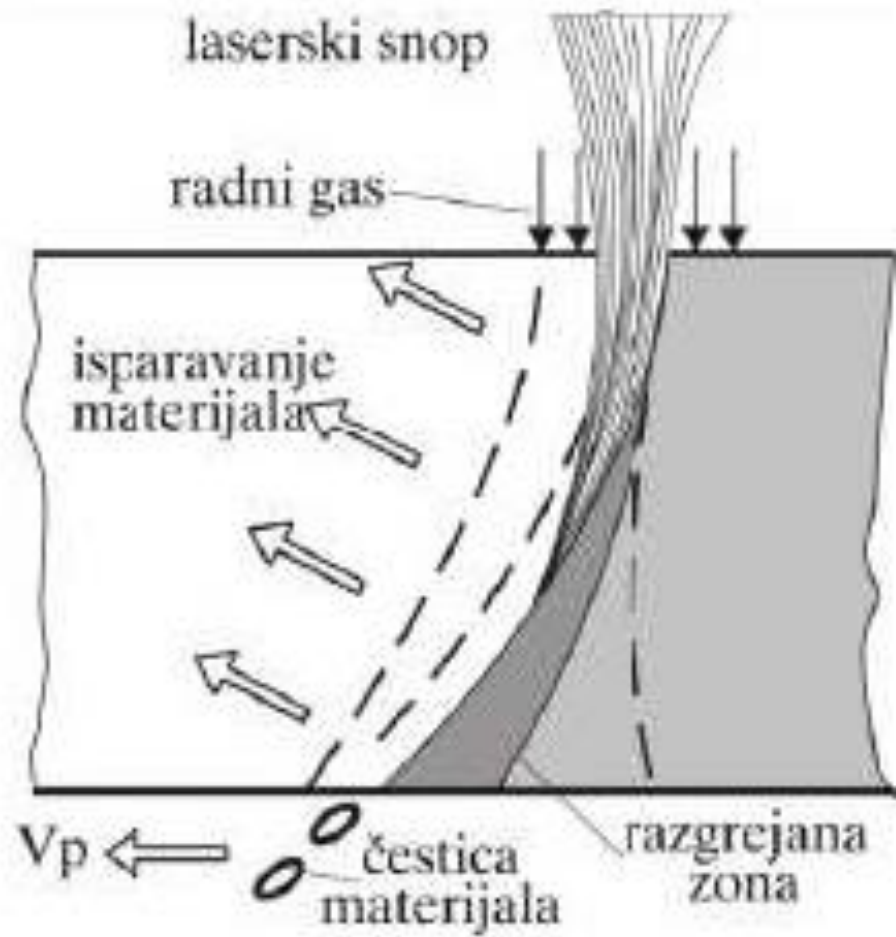
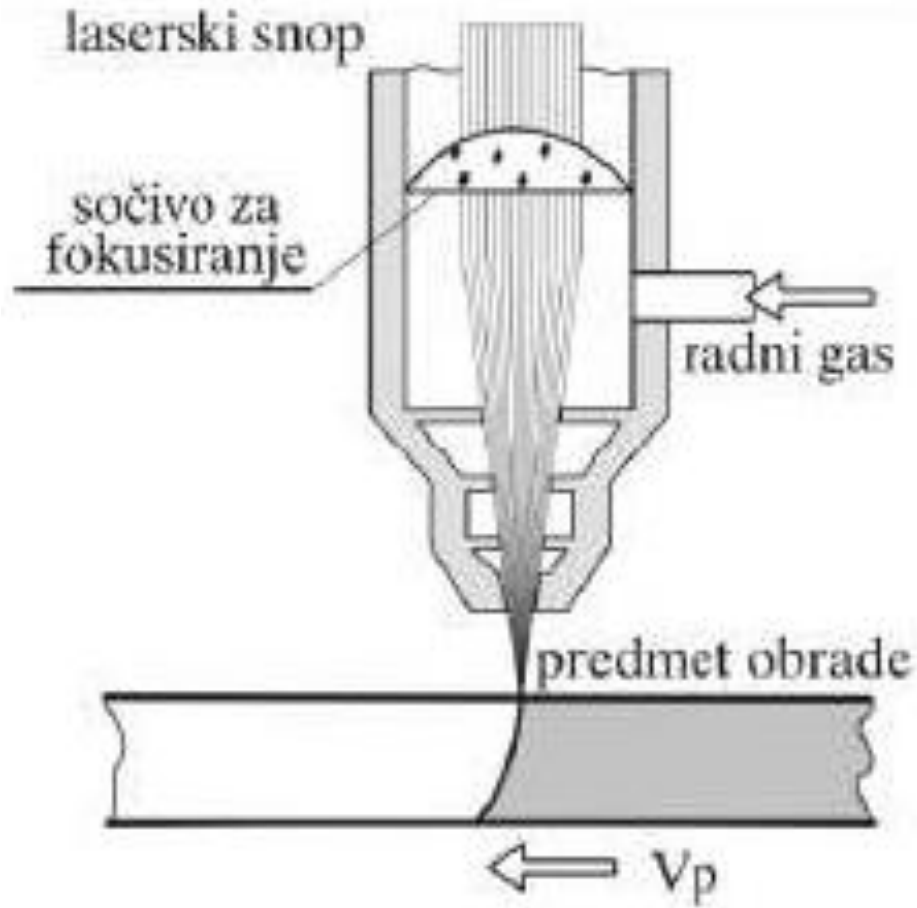
- Izlazna snaga $500kW$
- Transformator odgovarajućeg otpora
- Osovine/vratila dužine od $200mm$ do $3000mm$
- Osovine/vratila prečnika od $50mm$ do $350mm$
- Osovine/vratila težine do $1400kg$
- Prečnici zupčanika kada se kale zub po zub od $425mm$ do $2500mm$
- Težina zupčanika do $5000kg$
- Kontrolna jedinica PLC Simatic S7



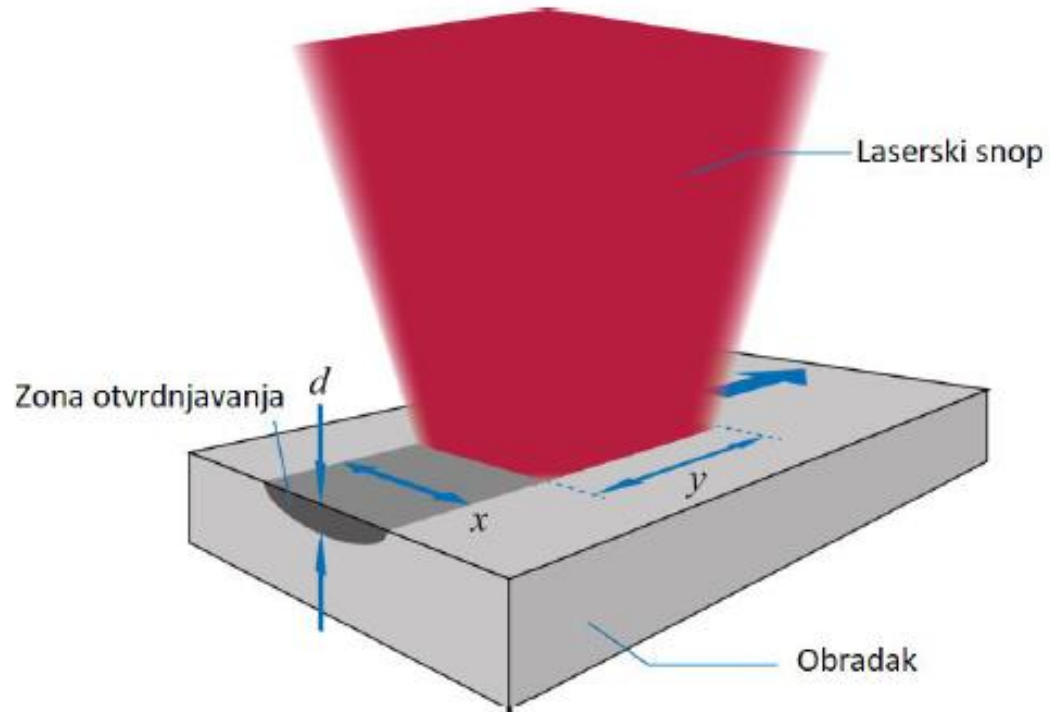
Termička obrada pomoću lasera

- Kao izvor toplote kod ove metode se koristi laserski snop svetlosti. Pomeranjem snopa po površini (ili obrnuto pomeranjem predmeta) zagreva se površina duž linije pomeranja. Zbog velike koncentracije energije zagrevanje se izvodi obično impulsno i nakon prestanka dejstva snopa nastaje brzo hlađenje usled odvođenja toplote kroz osnovni materijal. Ukoliko laserski snop ponovo pređe istom putanjom smanjenom snagom nastaje otpuštanje kaljenih oblasti površina. Ova metoda je pogodna za povećanje tvrdoće linijskih oblasti na površini čeličnih delova, kao što su npr. ivice finih mašinskih delova izložene habanju, ivice reznih alata za prosecanje, deformisanje i sl.

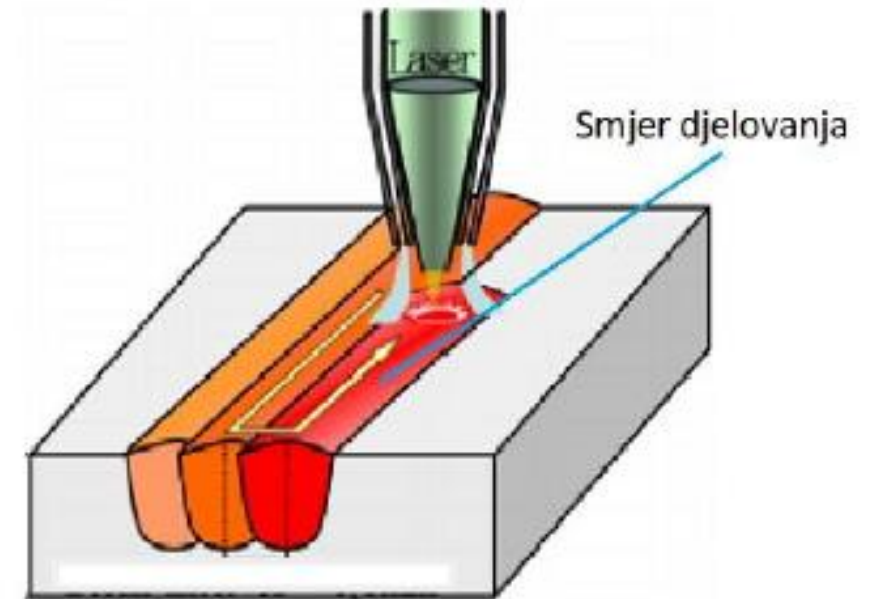
Principijelna šema formiranja laserskog snopa



Prikaz laserskog snopa

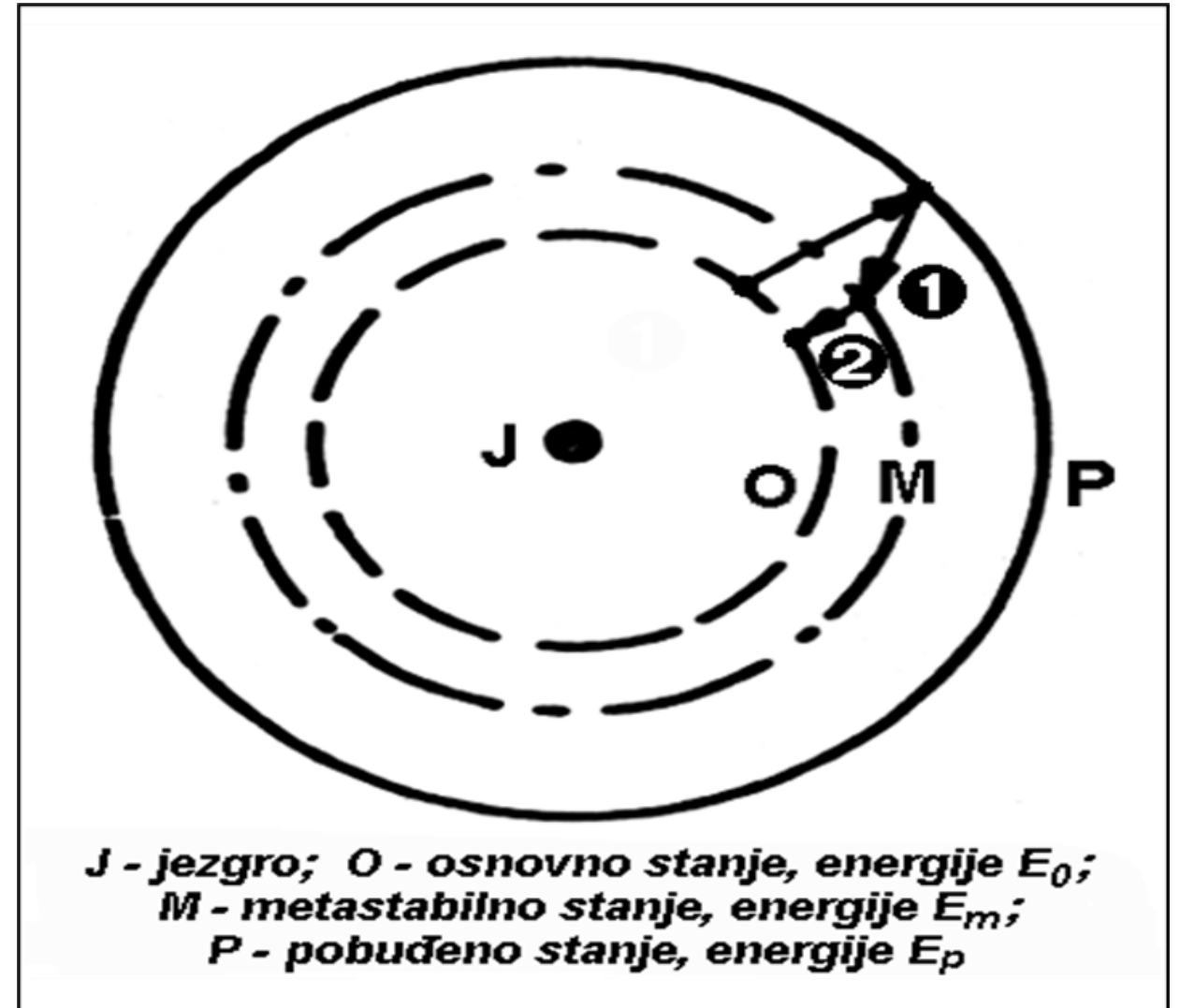


Smer uzoraka laserskog kaljenja



Fizičke osnove nastajanja laserskog zraka

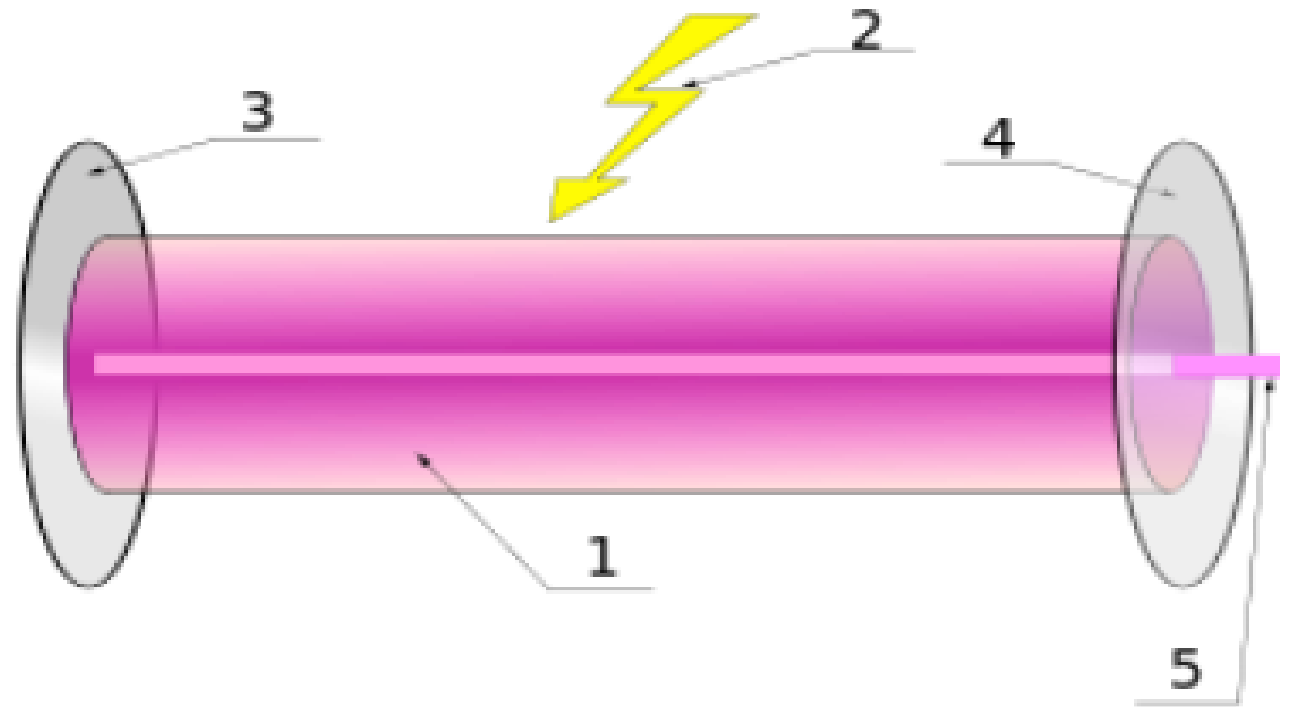
- Nakon što se elektron pobudi, vraća se u svoje osnovno stanje pri čemu se oslobađa energija u obliku svetlosne čestice–fotona. Svi emitovani fotoni su na istoj talasnoj dužini i koherentni (kreću se u istom smeru), što znači da su jednakih frekvencija, polarizacija i stalnog odnosa faza, za razliku od obične svetlosti koja sadrži fotone različitih talasnih dužina i zračenje nije koherentno.



Shematski prikaz lasera

Osnovni dijelovi lasera su:

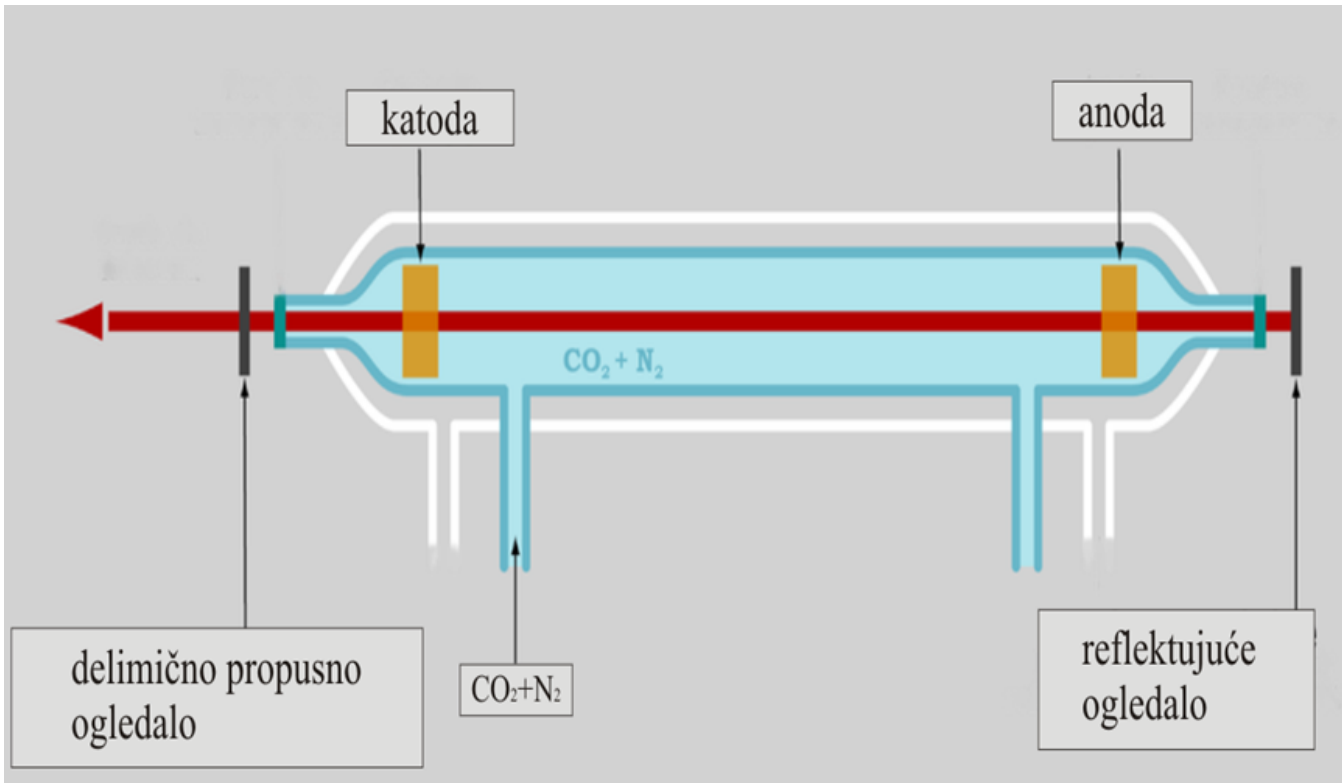
1. Aktivni medij;
2. Sastav za pobuđivanje
3. 100% reflektujuće ogledalo;
4. 90% reflektujuće ogledalo;
5. Laserski zrak



Primna lasera kod termičke obrade

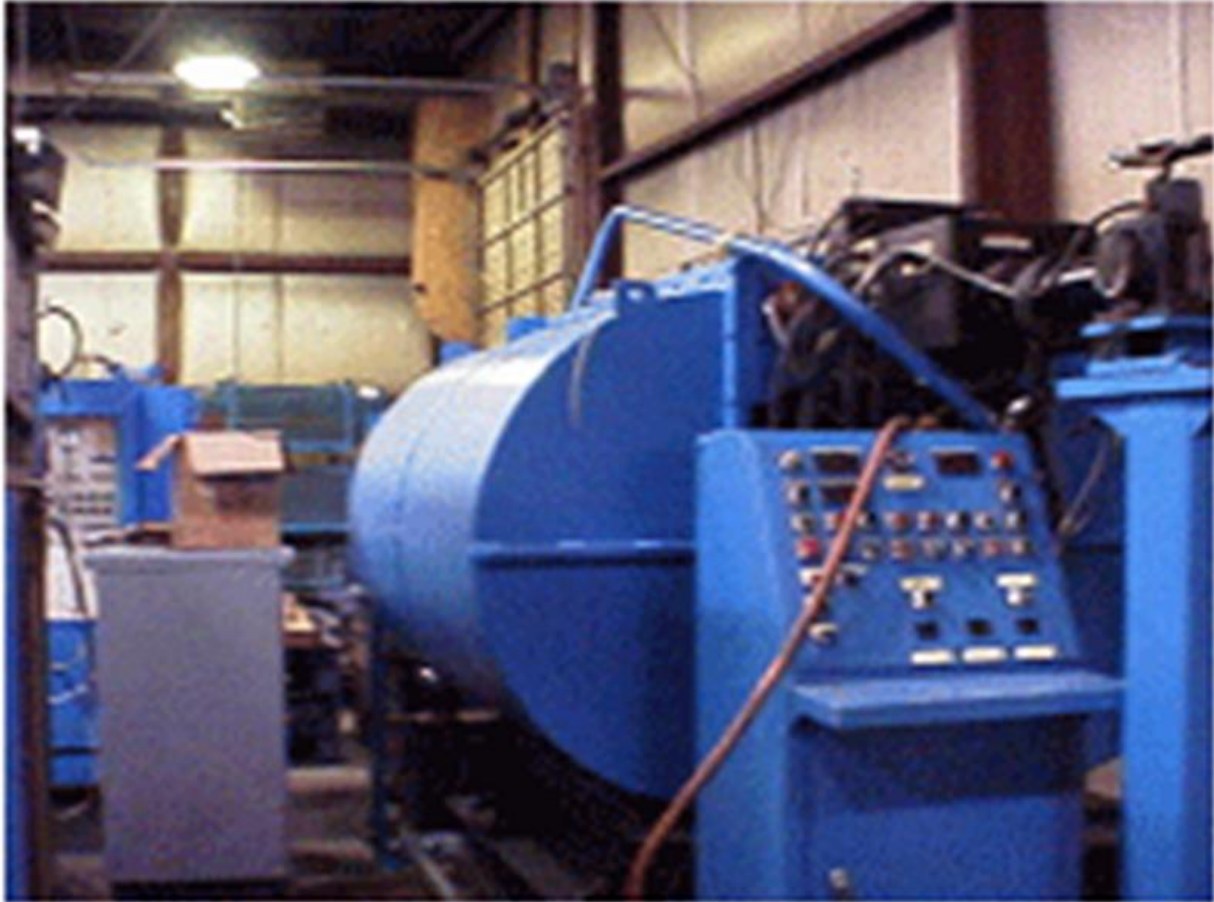
Najčešće korišteni laseri

- ČVRSTI LASERI: Rubinski laser, Stakleni laser, Nd: YAG laser (neodijumski), Poluprovodnički laseri.
- TEČNI LASERI: Laseri na bazi neorganske tečnosti, Laseri na bazi organskih boja.
- GASNI LASERI: CO₂ laser.



- Transfezalni protok plina
- Generiše snop talasne dužine $\lambda=10,6 \mu\text{m}$
- Snaga do 50kW

Postrojenje CO2 lasera Spektra Physics 975

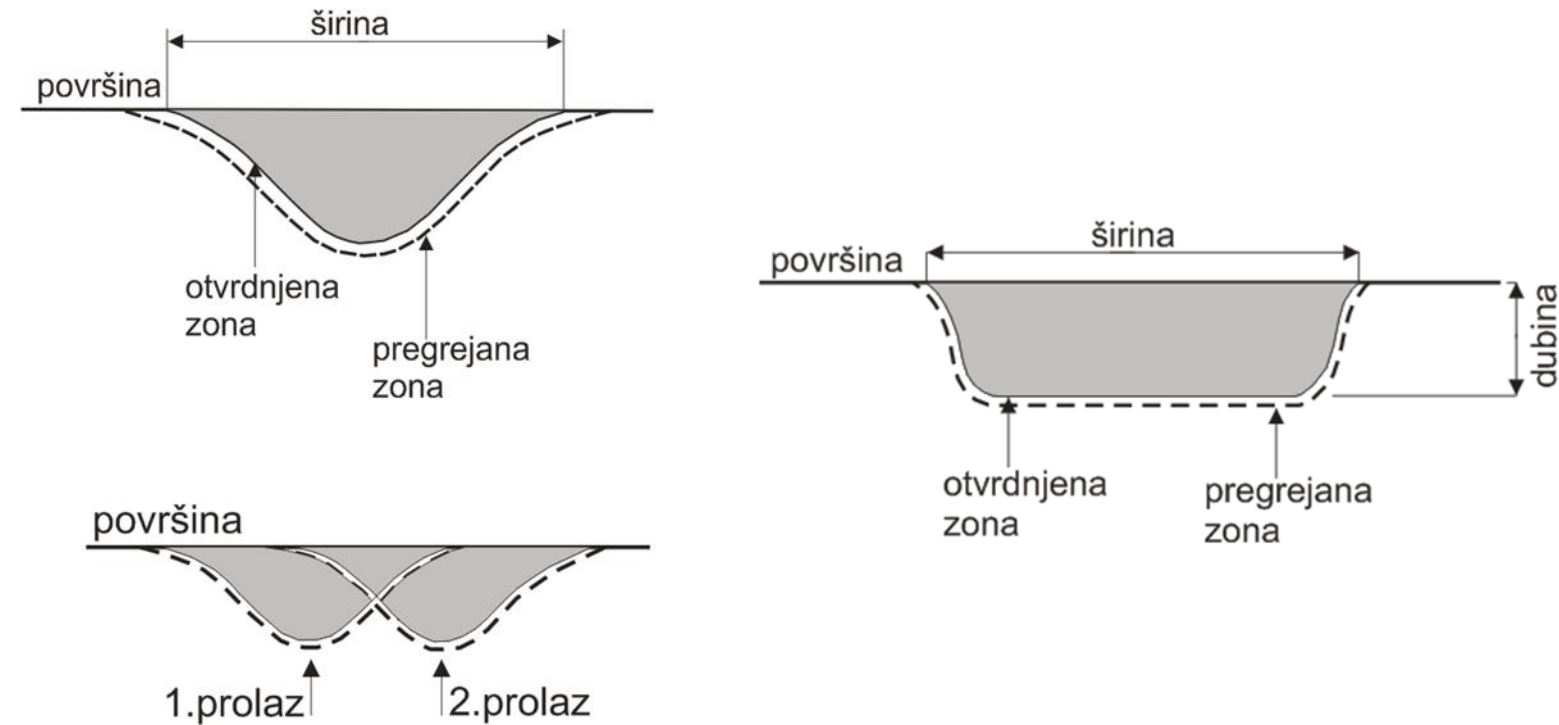


- Generiše izlazni snop snage 5 kW
- Stabilnost snage $\pm 5\%$
- Promer snopa 44 mm
- Napajanje lasera potreban napon 3000 V
- Max. Potrošnja pri punoj snazi lasera od 5 kW-150 Kw
- Smesa gasova: helija, azota, kiseonika i ugljen dioksida

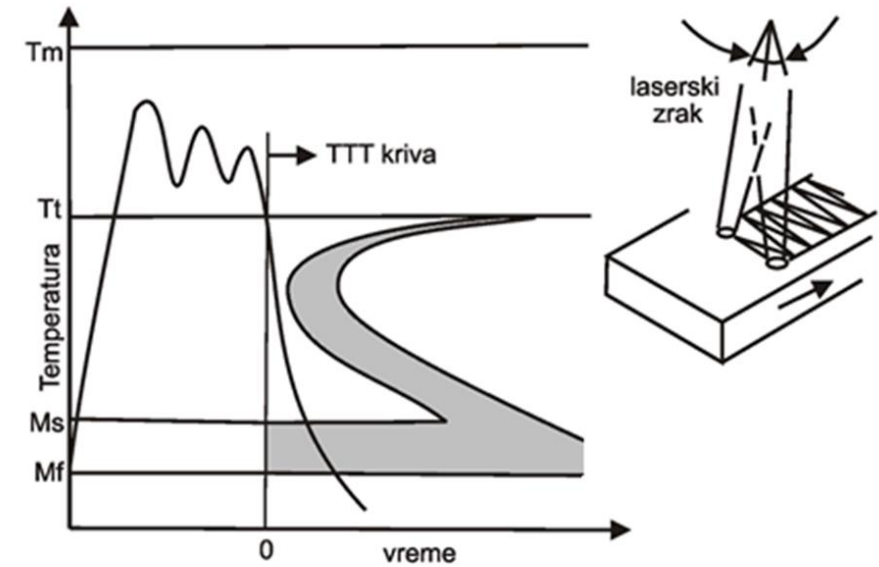
Tehnike površinskog tretmana

- Defokusirani laserski snop
- Oscilujući laserski snop

Defokusirani laserski snop



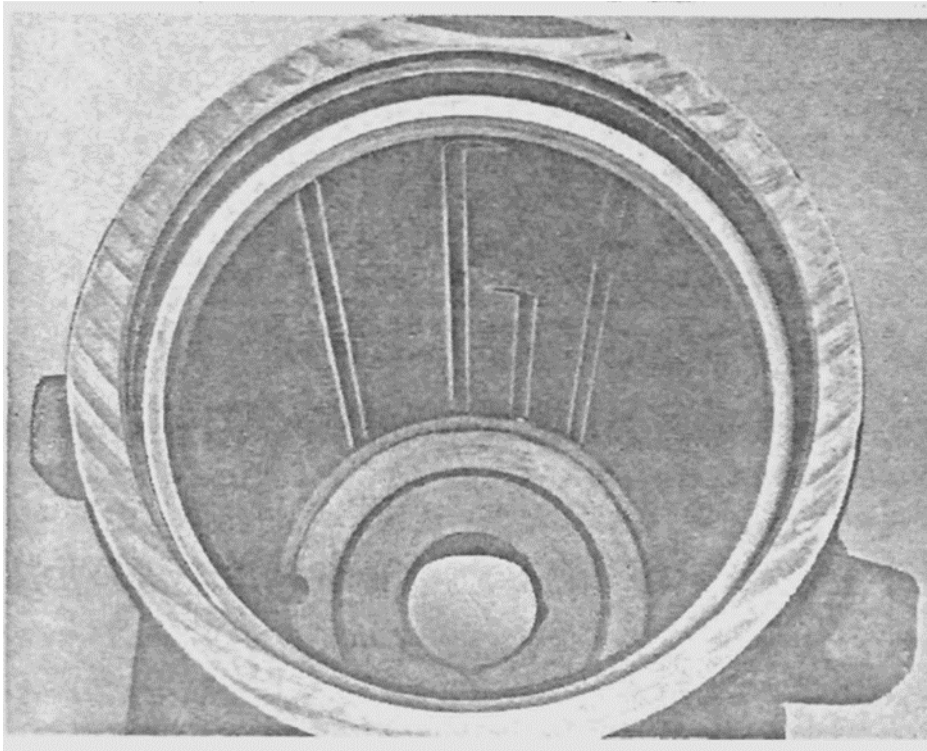
Osciljući laserski snop



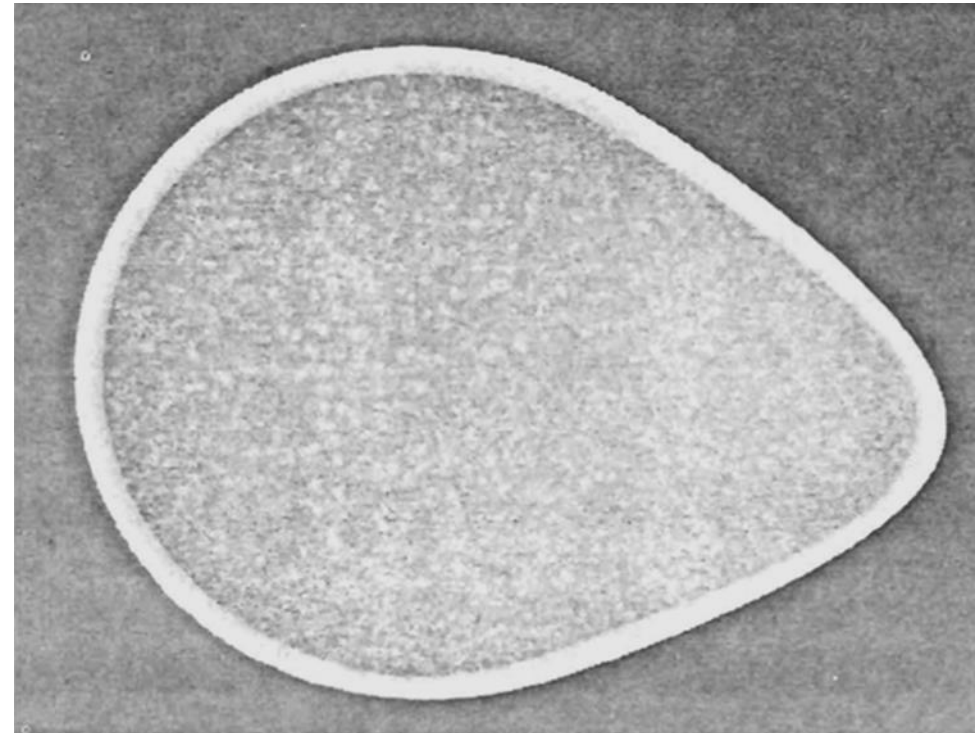
Primena laserske termičke obrade

- Laserska termička obrada unutrašnjih površina
- Laserska termička obrada spoljašnjih površina

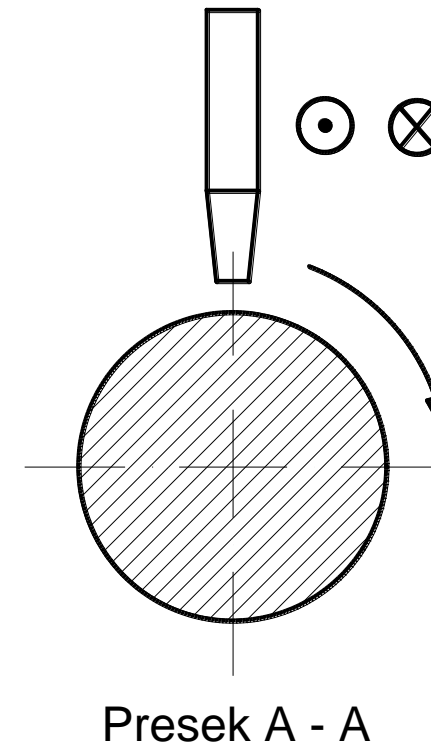
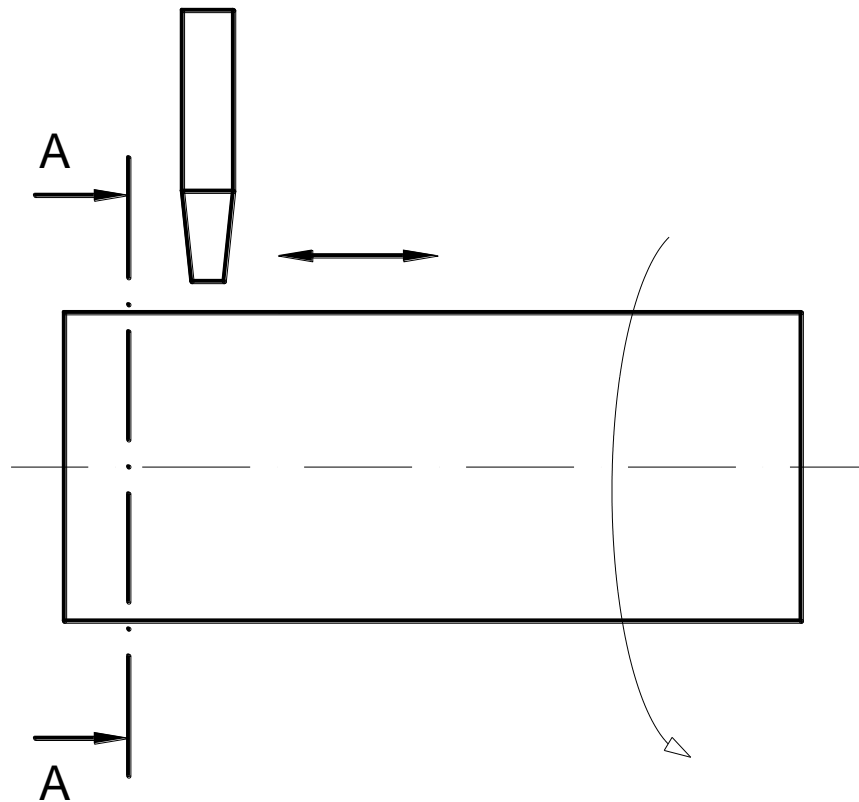
Laserska obrada unutrašnjih površina



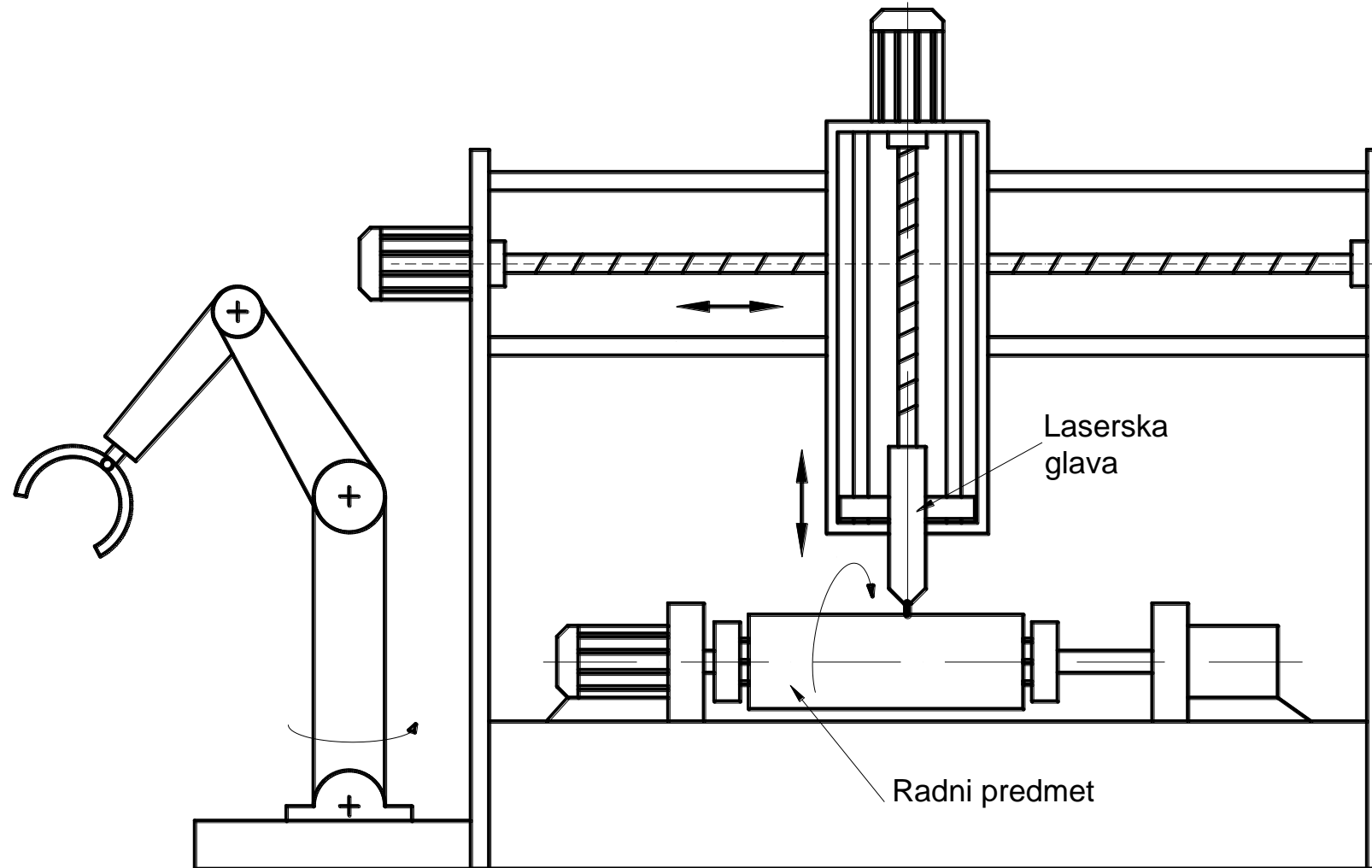
Laserska termička obrada vanjskih površina



Kretanja pri termičko obradi laserom

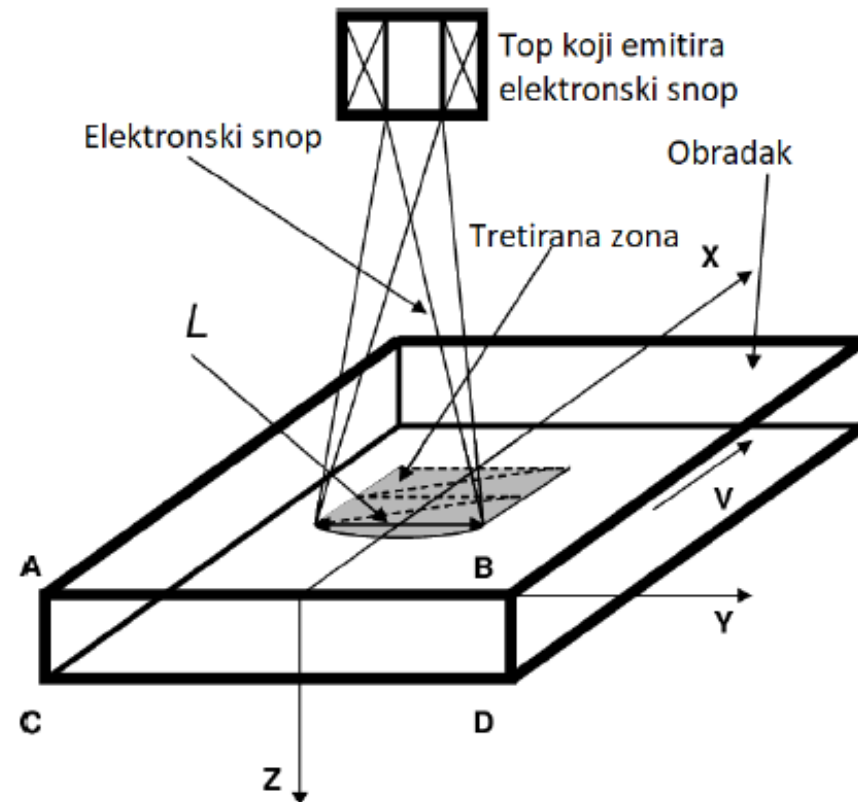


Automatizacija laserske termičke obrade

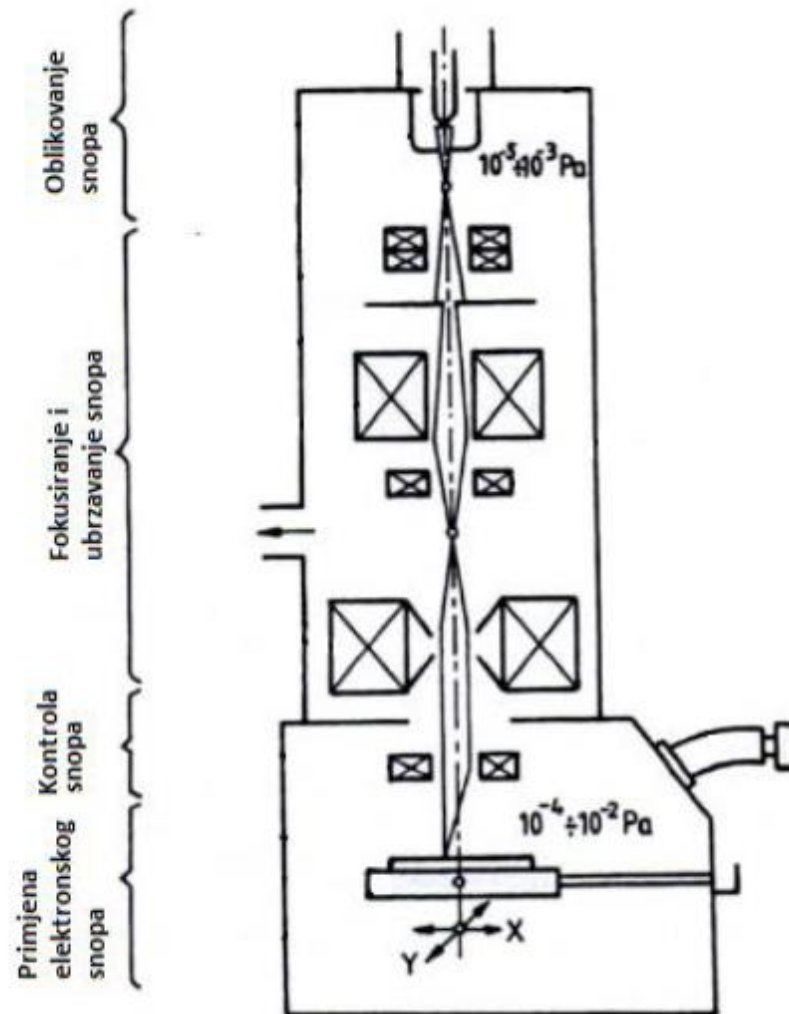


Proces kaljenja elektronskim snopom

- Površinsko kaljenje odvija se u vakuumskoj komori. Osnovni delovi uređaja su izvor snopa (katoda), elektromagnetsko sočivo za fokusiranje i ubrzavanje snopa te CNC uređaj za vođenje procesa. Udarom brzog snopa elektrona u obradak dolazi do pretvaranja kinetičke u toplotnu energiju, oko 75% energije. Značajni gubici energije nastaju uglavnom rasipanjem usporenih elektrona.

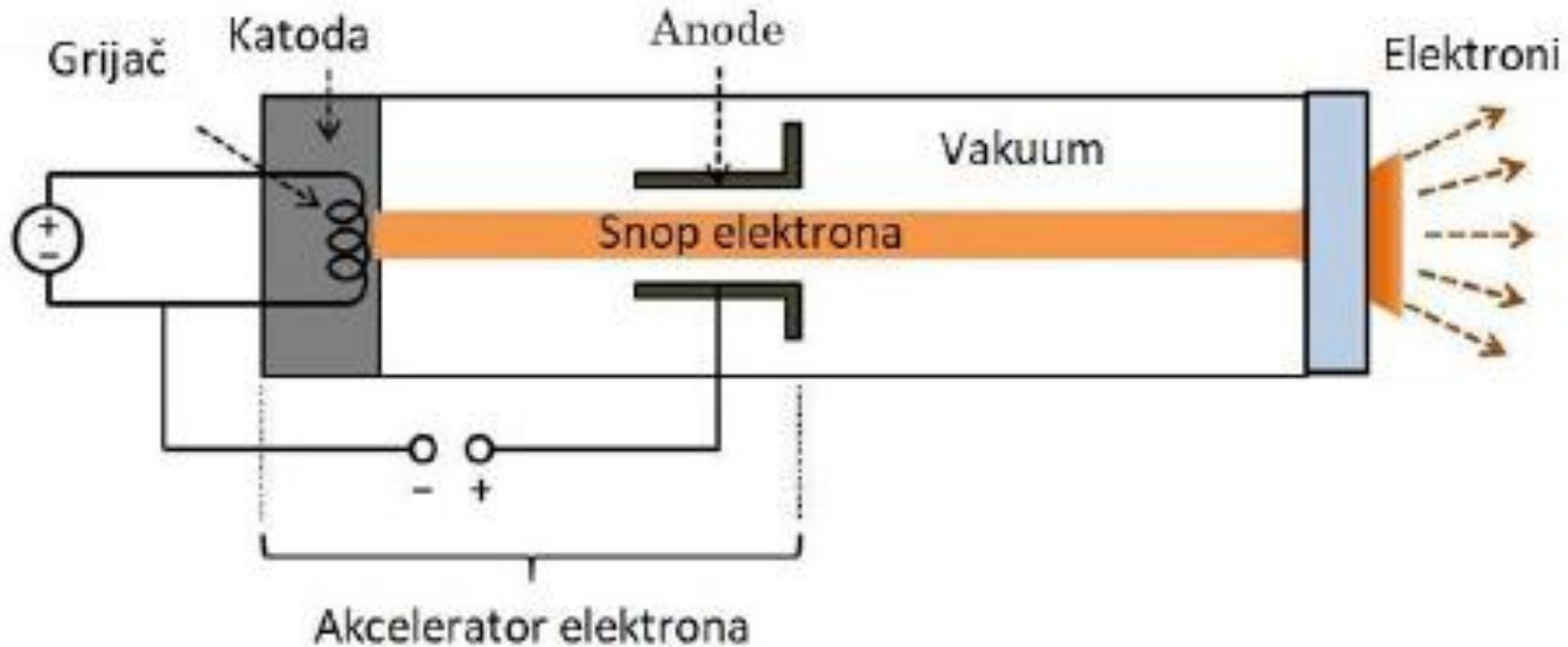


- Elektronski snop kao medij kaljenja koristi ulaznu snagu od 40 kW gdje se 50% snage koristi direktno za formiranje snopa elektrona, dok se ostalih 50% koristi za ostale procese. Otprilike 38% se koristi za rad vakuum pumpe, 5% za generator snopa, otprilike 3.5 % za sistem kontrole snopa i 5 % na hlađenje.



- Nakon prestanka delovanja snopa elektrona dolazi do samozakaljenja i stvaranja martenzitne strukture. Zavisno o odabranom materijalu, potrebna debljina komada treba biti najmanje 5 do 10 puta veća u odnosu na dubinu austenizacije.

Elektronski top



Primjeri površinskog kaljenja elektronskim snopom

a



b

Elektronski snop



c

Elektronski snop

