



Termička obrada i inženjerstvo površina



Poboljšavanje

Vanr. prof.dr Pal Terek

Otpuštanje čelika

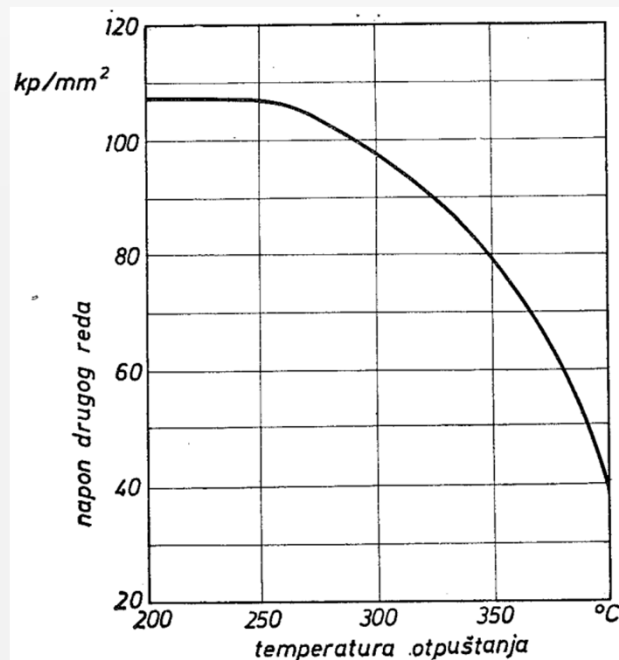
Vrste otpuštanja u zavisnosti od temperature:

- Niskotemperaturno otpuštanje (100 °C – 200°C / 250°C)
- **Srednjetemperaturno otpuštanje** (200 °C – 400°C)
- **Visokotemperaturno otpuštanje** (400 °C – A1)

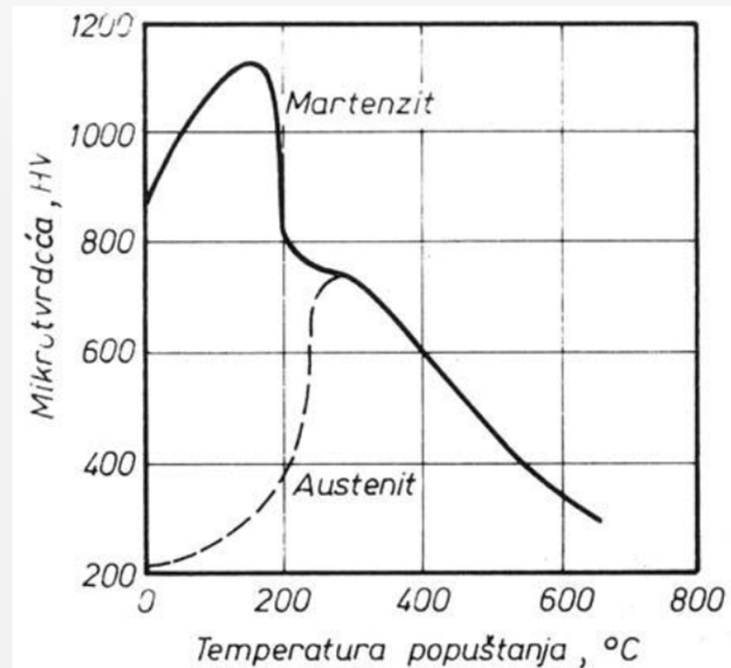
Otpuštanja se vrše zagrevanjem u peći na temperaturu otpuštanja, zadržavanje (1 do nekoliko sati) i hlađenjem van peći na mirnom vazduhu

Srednjetemperaturno otpuštanje (200 °C - 350 °C)

- Razlaganje zaostalog austenita i prelazak epsilon karbida u cementit
- Razlaganjem austenita ona prelazi u strukture koje su iste kao i strukture dobijene razlaganjem Martenzita
- Smanjuju se zaostali naponi u komadu

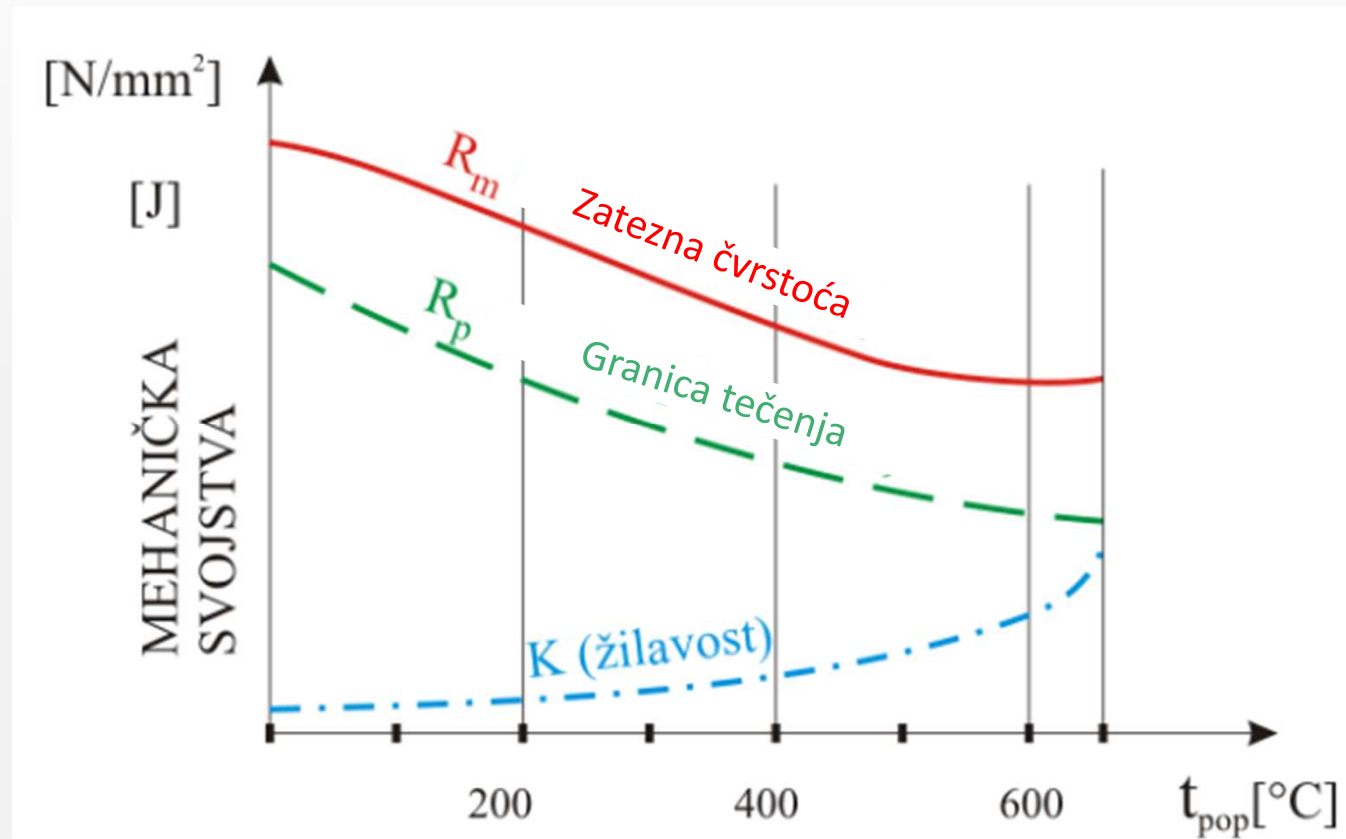


Ugljenični ili niskolegirani čelici



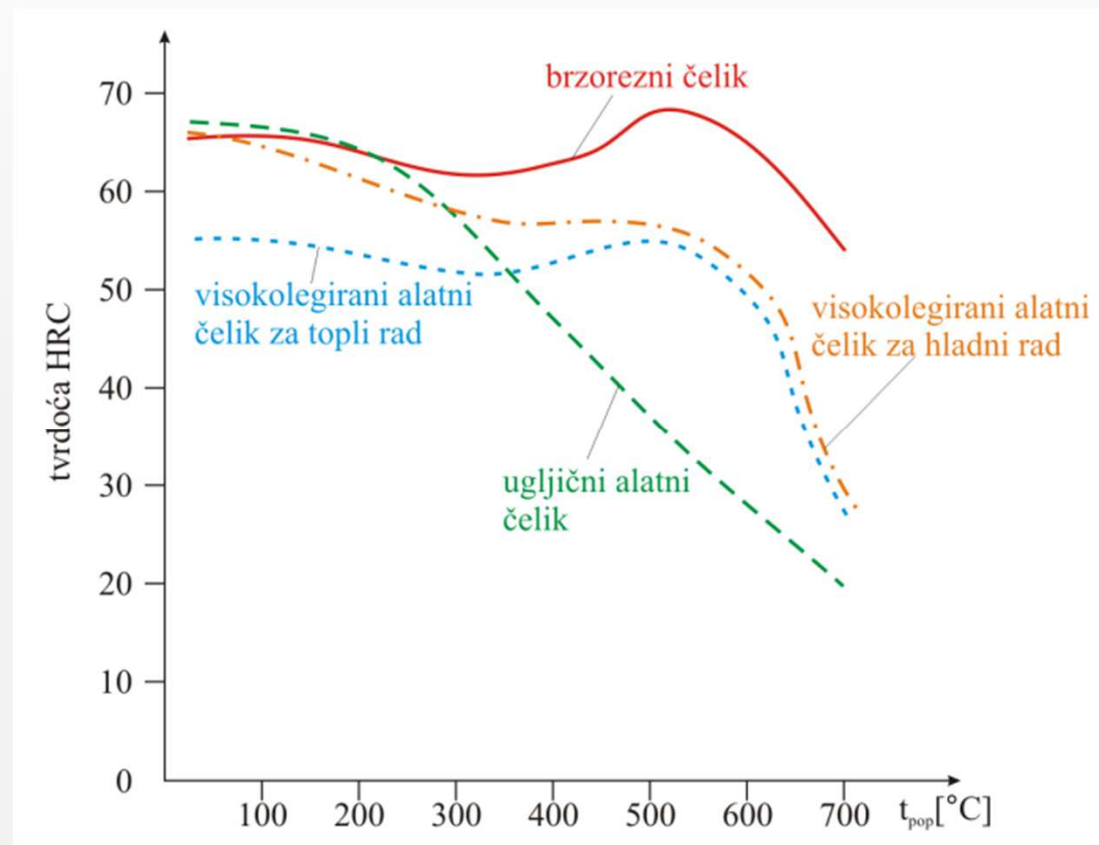
Uticaj temperature poboljšavanja na meh. osobine

- Otpuštanjem se smanjuju granica tečenja i zatezna čvrstoća ali dolazi do povećanja žilavosti materijala i izduženja



Oblast sekundarne tvrdoće kod legiranih čelika

- Otpuštanja legiranih (visokolegiranih) čelika
- Kod ovih čelika transf. ZA se dešava na nešto višim temperaturama
- Takođe kod ovih čelika se na višim temp. izlučuju karbidi legirajućih elemenata koji su veoma tvrdi
- Zbirni efekat veće količine martenzita i karbida daje efekat sekundarne tvrdoće
- Stoga ovi čelici mogu posle da rade na višim temperaturama jer zadržavaju svoju tvrdoću na povišenim temp.



Otpusna krtost

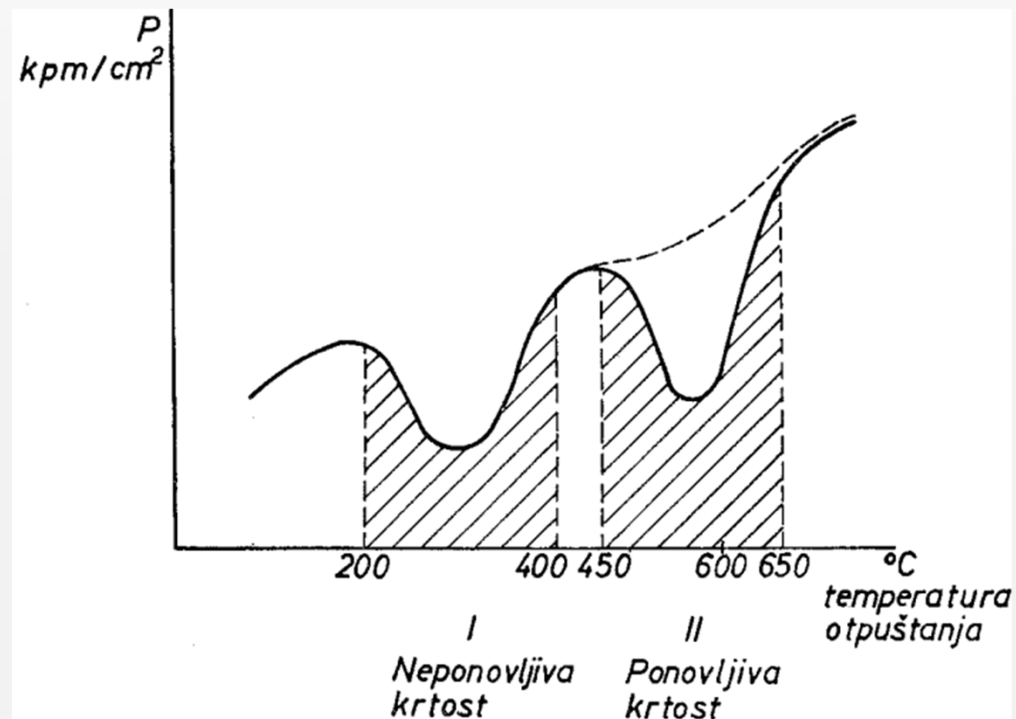
Promena žilavosti u zavisnosti od temperature otpuštanja

Nepovratna se izbegava na dva načina:

- Koriste se čelici koji imaju povišen sadržaj Si, koji jako smanjuje efekat nepovratne krtosti.
- Izbegava se otpuštanje u oblasti kritičnih temperatura.

Povratna krtost (usled sporog hlađenja) izbegava se brzim hlađenjem nakon otpuštanja.

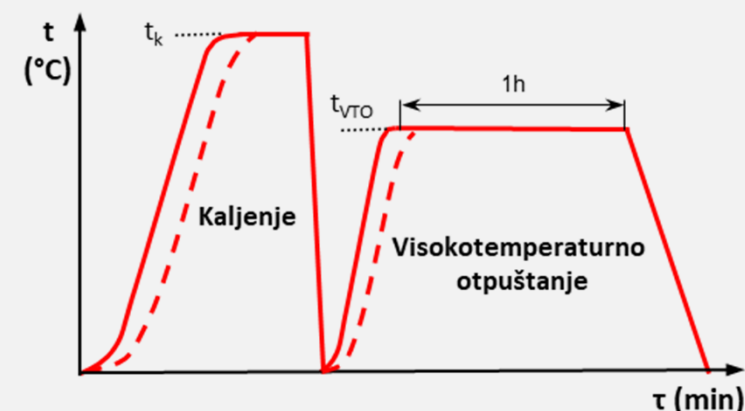
Isprekidana linija – brzo hlađenje
puna linija – sporo hlađenje



Poboljšavanje čelika

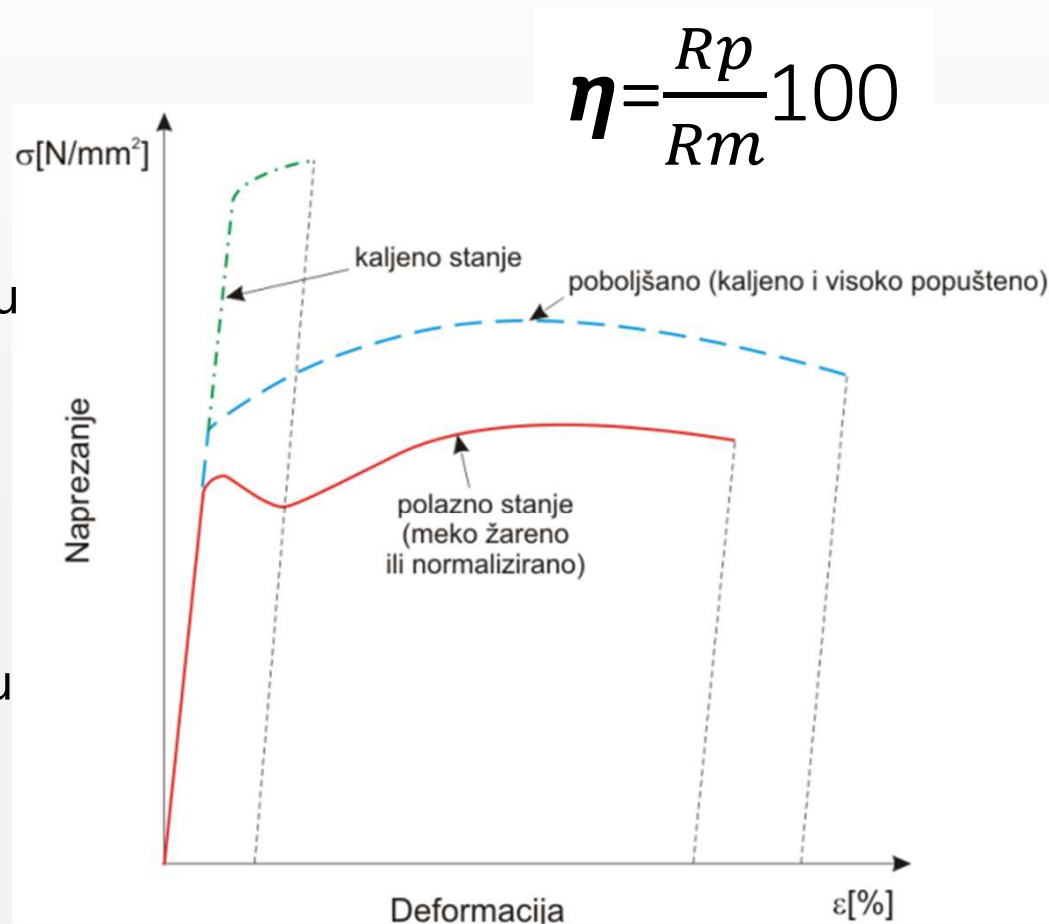
- Posle kaljenja čelik ima visoku vrednost napona tečenja, ali malu plastičnost i nisku vrednost žilavosti.
- Poboljšavanje je kombinovani postupak u kojem se nakon kaljenja vrši visokotemp. otpuštanje ($400\text{ }^{\circ}\text{C} - A_{C1}$), sa ciljem transformacije martenzita i zaostalog austenita u neke od prelaznih struktura (trusit, sorbit ili beinit) i formiranje sitnih karbida
- Nakon poboljšavanja mikrostruktura je otpušteni martenzit
- Ovim postupkom se uklanjaju i zaostali naponi ili se oni barem smanjuju na prihvatljive vrednosti
- Nalazi najširu primenu kod konstrukcionih ugljeničnih ($0,3-0,6\%C$), nisko i srednjelegiranih čelika (čelika za poboljšanje).

Cilj poboljšavanja je postizanje visoke čvrstoće i žilavosti koji su u suštini uvek u suprotnosti



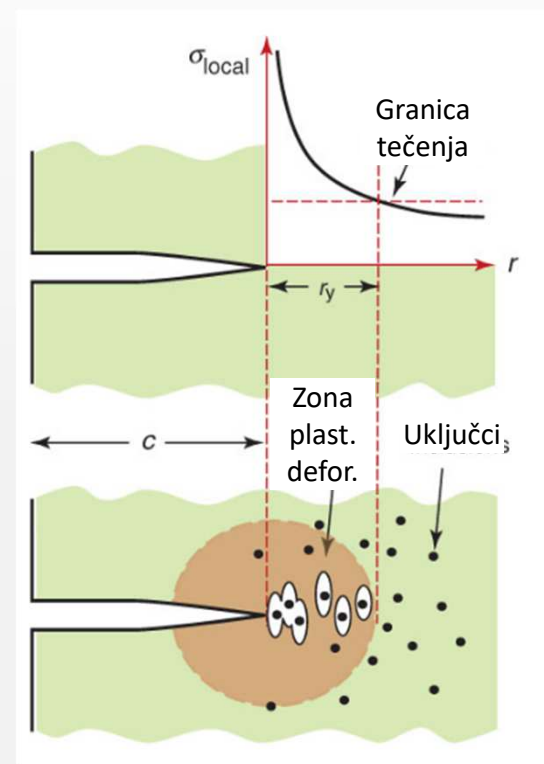
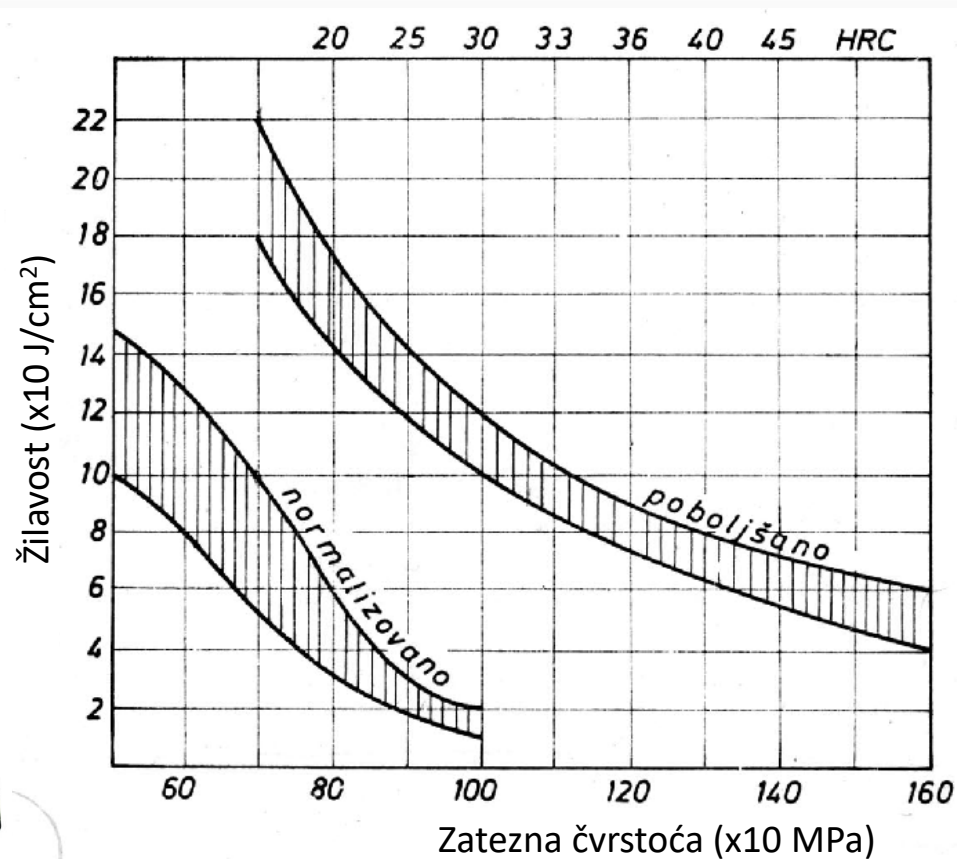
Uticaj poboljšavanja na iskorišćenje čvrstoće čelika

- Normalizacija daje isto dobre mehaničke osobine
- Poboljšavanje je složenije i skuplje ali se bolje podešava nego normaliz.
- Nakon kaljenja visok napon tečenja i malu duktilnost (mala površina ispod krive)
- Poboljšan čelik ima viši napon tečenja nego normalizovan ali i mnogo veće izduženje
- Poboljšavanje daje višu granicu tečenja i zateznu čvrstoću pa se koristi u mašinstvu za odgovorne delove
- Smanjenje težine konstrukcije, zbog mogućnosti primene manjih poprečnih preseka



Uticaj poboljšavanja na žilavost čelika

- Zavisnost žilavosti od zatezne čvrstoće kod normalizacije i poboljšavanja



• Izvor: Pantelić I: Tehnologija termičke obrade čelika. 1. knjiga, 1974.

Poboljšavanje i žilavost čelika

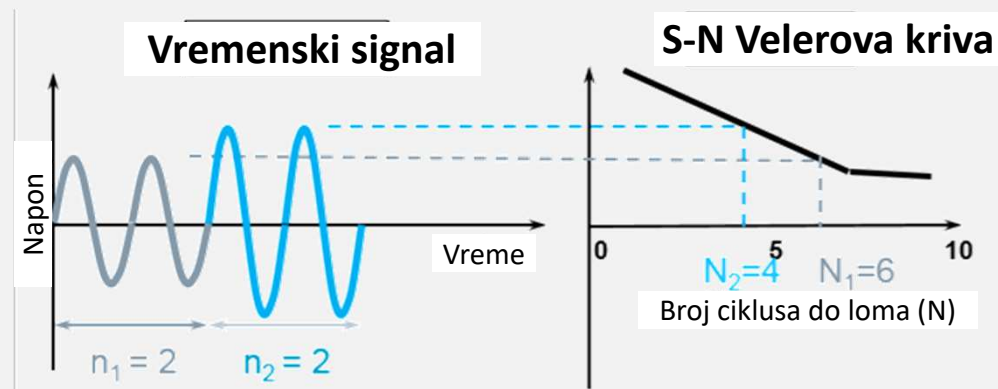
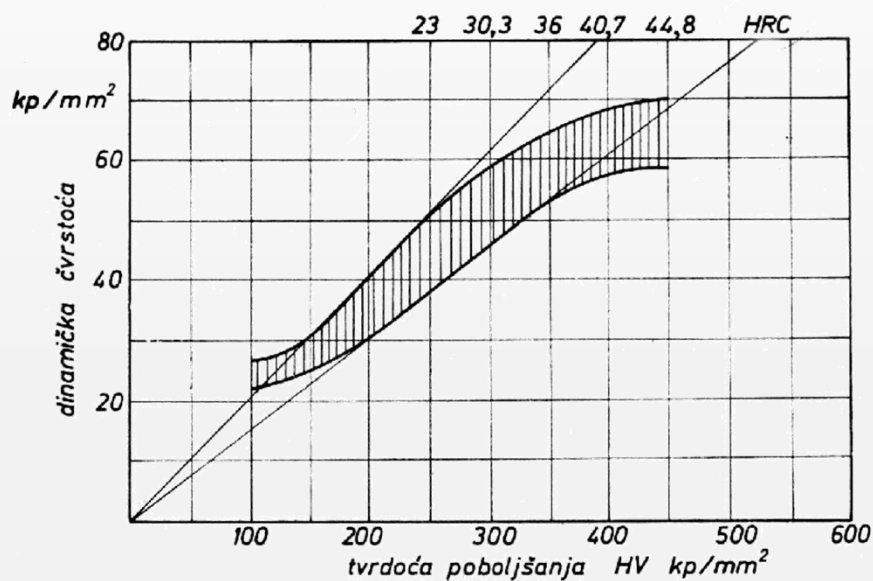
- Uočljivo je da ukoliko raste zatezna čvrstoća, tada opada žilavost. Težnja za većim čvrstoćama i lakšim konstrukcijama dovodi do smanjenja sigurnosti.
- Pri proračunu konstrukcija često se zanemaruje žilavost, jer se dimzionisanje vrši prema R_p i R_m . Iz veličine žilavosti (J) se ne moraju izračunavati preseci opterećenog dela ali se može pokazati kao pokazatelj sigurnosti.
- Žilavost je veličina koja ograničava primenu velike zatezne čvrstoće, te je konstruktor prinuđen da nađe kompromis između čvrstoće i žilavosti. Otuda je veliki značaj malog rasipanja žilavosti kod postupka poboljšavanja.

Poboljšavanje čelika

- Pored tvrdoće i statičke čvrstoće, nakon poboljšavanja dolazi do povećanja dinamičke čvrstoće zbog čega se poboljšani delovi najčešće koriste u dinamički opterećenim konstrukcijama.
- Najveća tvrdoća čelika koja može da se postugne je za formiranje 100% martenzita a ta tvrdoća se naziva kaljivost. Ona najviše zavisi od količine ugljenika u čeliku
- Postupkom poboljšavanja se postižu više mehaničke osobine nego normalizacijom
- Međutim efekat poboljšavanja može se primetiti samo do određene dubine materijala. Što se u industrijskoj praksi često zanemaruje

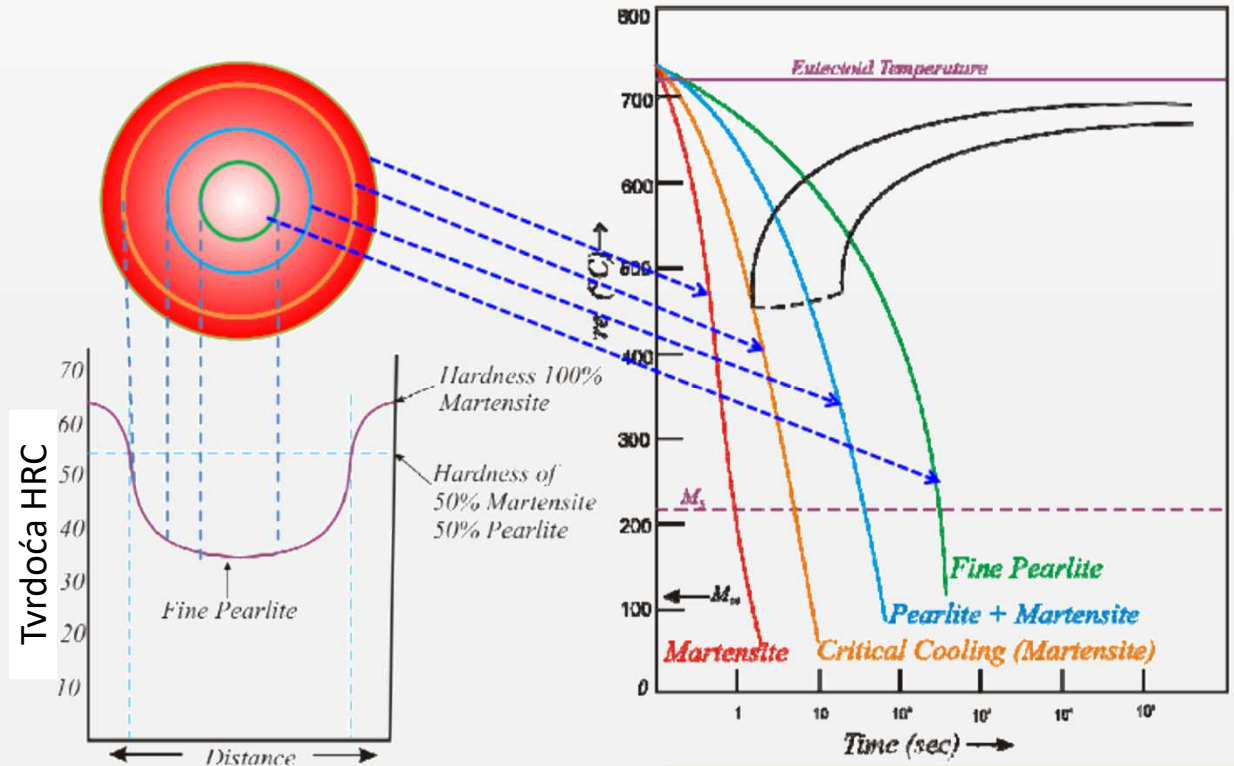
Uticaj poboljšavanja na dinamičku čvrstoću čelika

Zavisnost zatezne dinamičke čvrstoće od tvrdoće poboljšavanja



Prokaljivost čelika

- Za neki radni predmet kaže se da je u potpunosti prokaljen kada se u jezgu nalazi 50% martenzita.
- Za neprokaljive čelike prokaljivost je dubina na kojoj je ostvarena transformacija sa 50% martenzita
- Ugljenični prokaljivi 10mm
- Za veće preseke moraju se primeniti legirani čelici
- Alatni čelici su skroz prokaljivi

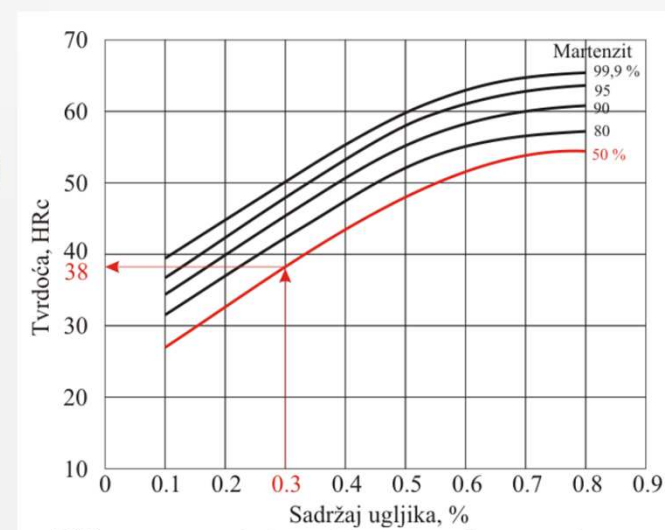
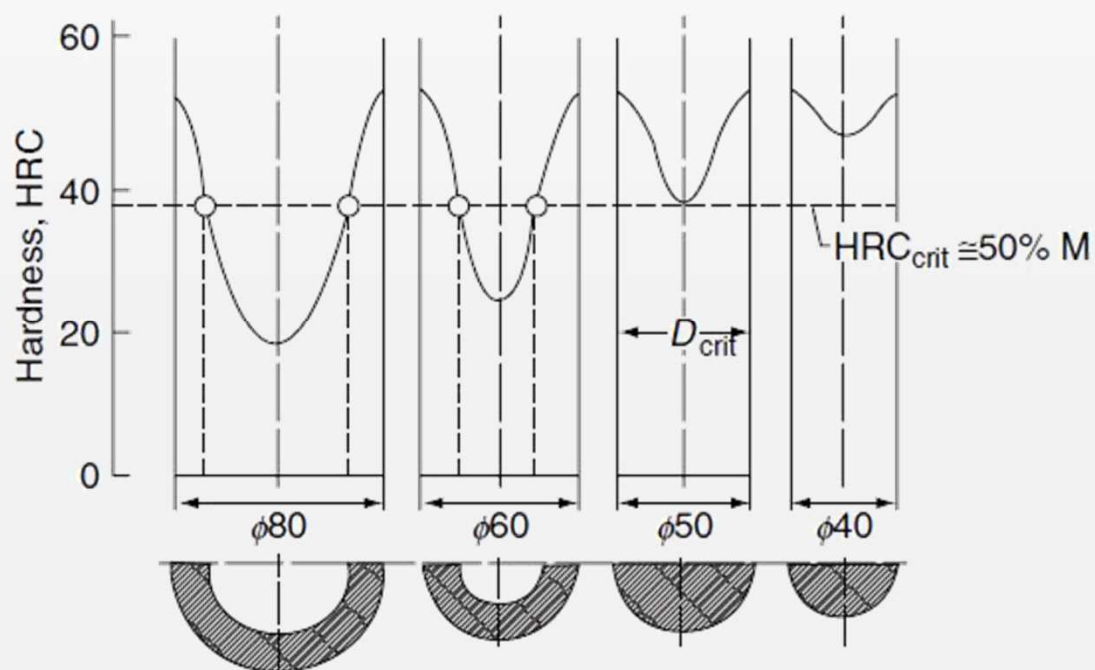


Prokaljivost čelika

- Osim uslova hlađenja koji nisu isti u svim slojevima radnog predmeta na prokaljivost utiču
 - oblik komada
 - dimenzije
 - hemijski sastav
 - mikrostruktura pre kaljenja
 - toplotna provodljivosti čelika
- Prokaljivost čelika se određuje metodama po :
 - Grosmanu
 - Džominiju (jednostavniji i zastupljeniji metod)-proizvođači čelika često daju dijagram prokaljivosti po Džominiju,
- Prilikom izbora čelika i određene termičke obrade za svaki se mogu naći podaci o prokaljivosti i/ili dijagram prokaljivosti

Prokaljivost čelika po grosmanu

- Određivanje prokaljivosti po Grosmanu (Grossmann)



Izvor: Gabrić I., Šitić S., Materijali II, Sveučilište u Splitu, 2015.

- Izvor: Totten, G. E. (2006). Steel heat treatment: Metallurgy and technologies. Boca Raton, FL: Taylor & Francis.

Prokaljivost čelika po grosmanu

- Faktor rashladne sposobnosti H. Opisuje brzinu hlađenja koja može da se postigne sa datim sredstvo za hlađenje i određenim uslovima rada

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	

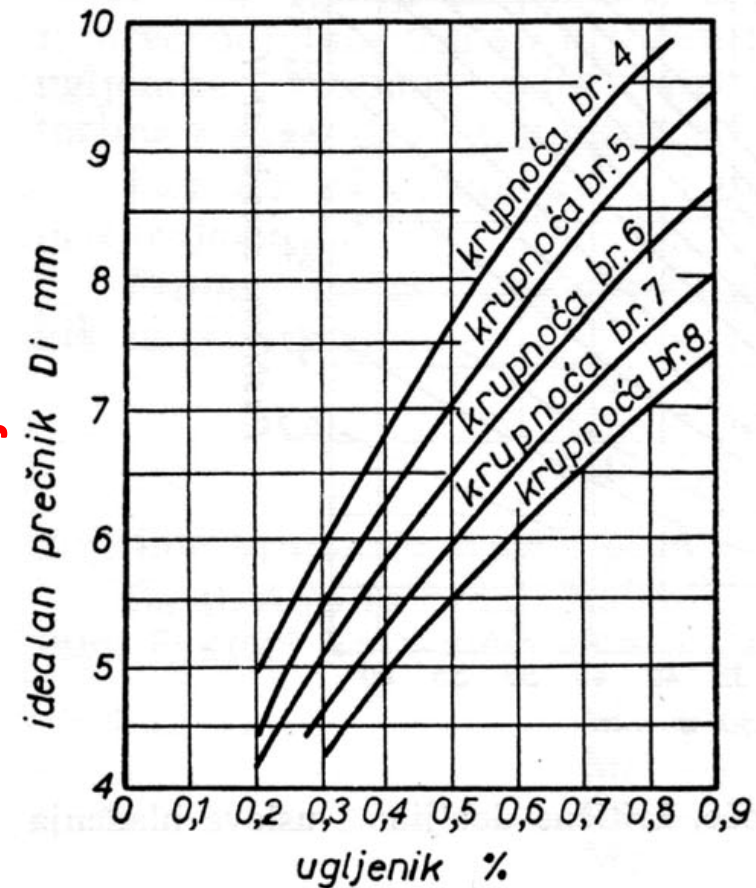
Prokaljivost čelika

- Uticaj sadržaja ugljenika i veličine zrna
- Što su zrna sitnija to je prokaljivost veća

D_{IC}

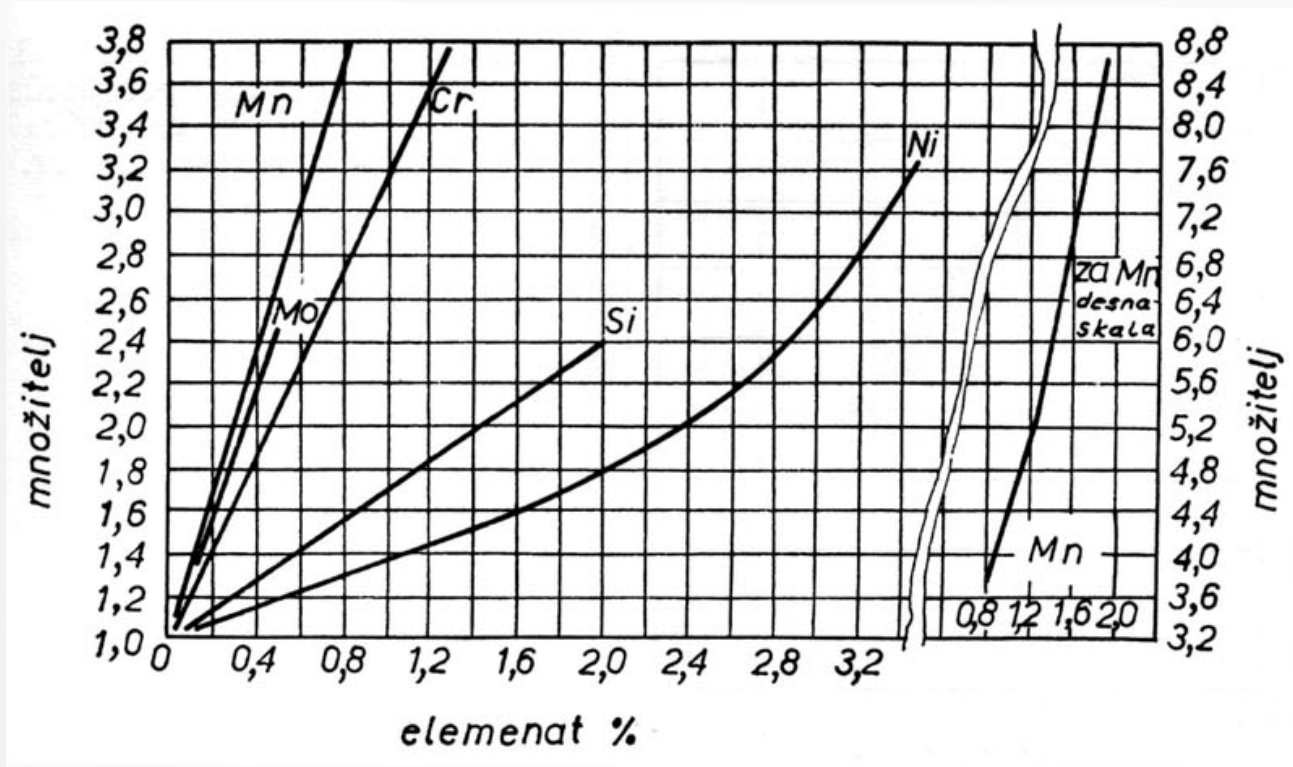


Prokaljivost



Prokaljivost čelika

- Najveći uticaj na prokaljivost imaju legirajući elementi Mn, Cr, Mo, Ni, W oni smanjuju kritičnu brzinu, dok je Co povećava kritičnu brzinu i snižava prokaljivost



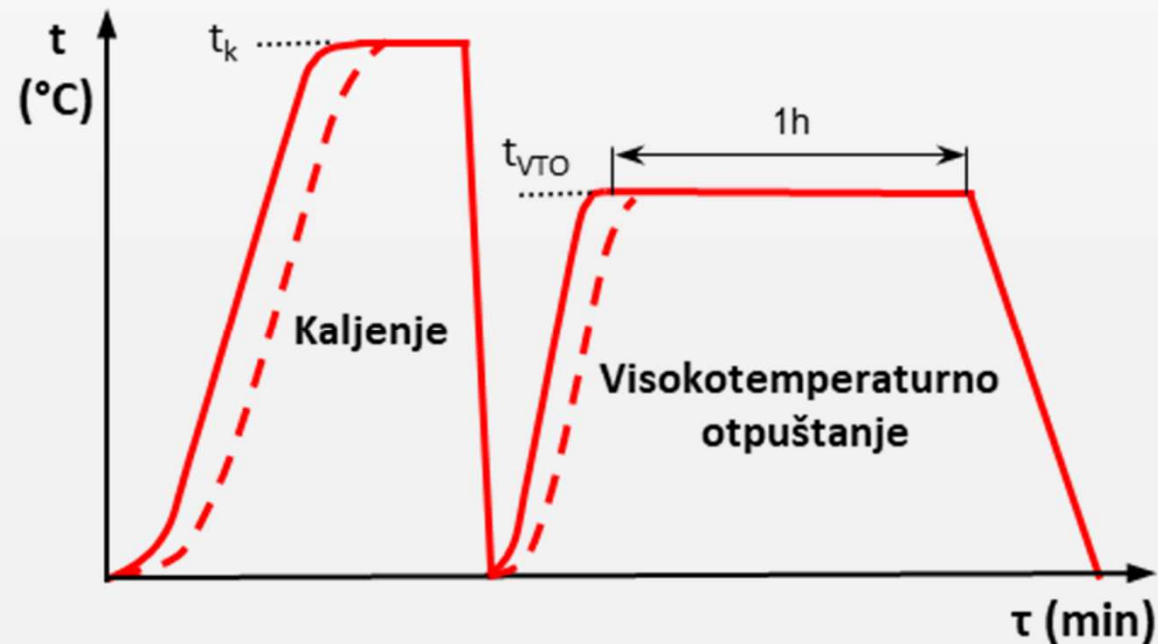
Izbor čelika za poboljšanje

- Pri izboru čelika za određeni radni predmet i usvajanju poboljšavanja kao vida termičke obrade potrebno je imati u vidu da osobine po preseku komada zavise od prokaljivosti.
- U postupku izbora treba da se izvrše dve provere čelika:
 1. *Provera prema čvrstoći* - proverava se da li određeni čelik uopšte može da postigne traženu dinamičku čvrstoću. Kako čvrstoća najviše zavisi od udela ugljenika određuje se koliko ugljenika treba da sadrži čelik da bi postigao traženu čvrstoću.
 2. *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.

Kombinovano poboljšavanje

Kombinovano poboljšavanje

- parametri procesa kaljenja se biraju na isti način kao i kod kaljenja na potpunu martenzitnu strukturu.
- Brzina hlađenja se bira prema potrebnoj kritičnoj brzini hlađenja. Pravi efekat se postiže ako je kaljenje na martenzitnu strukturu obavljeno po celom preseku, uz eventualno prisustvo ZA.
- Samo u ovom slučaju otpuštanje na određenoj (500°C ili 600°C) temperaturi daje jedinstveni oblik prelazne strukture, a to zavisi i od dimenzija i oblika komada, kao i od vrste čelika.



Izotermalno poboljšavanja

Izotermalno poboljšavanje

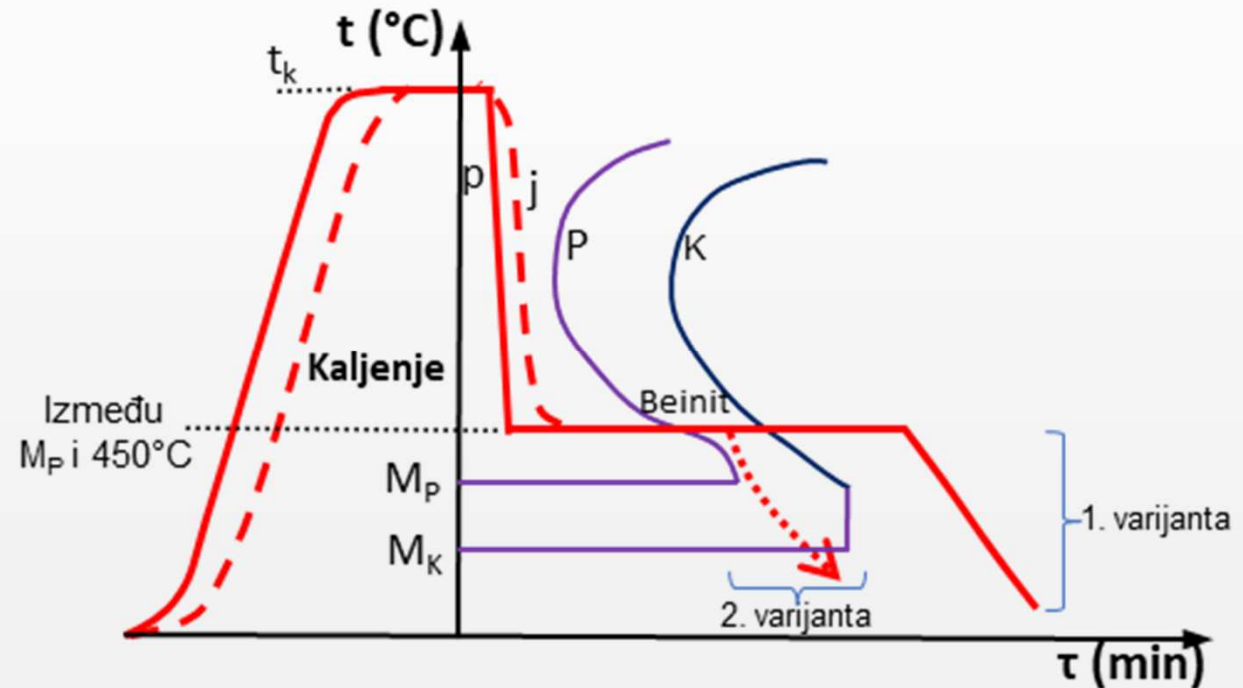
gde postoji opasnost od pucanja i gde oblik komada ne dozvoljava klasično kaljenje, gde se teži da nema deformacija

Kod malih delova, od čelika niske prokaljivosti

Dve varijante

1. v. Dobijanje bejnita tvrdoća je manja ali žilavost dobra i nema deformacija

2. v. Dobijanje smeše bejnita i martenzita. Tako što se komad pre završetka transformacije u bejnit izvadi i brzo ohladi na vazduhu



Vrste poboljšavanja

- Struktura koja nastaje pri izotermalnom poboljšavanju je **beinit** (razlaganjem austenita), a vrlo je slična strukturi sorbita odnosno trustita (koja nastaje razlaganjem martenzita).
- Hlađenje sa tk se vrši u sonom kupatilu do temperature izotermalne transformacije a to je relativno sporo hlađenje, tako da se ovako mogu kaliti samo čelici sa nižim kritičnim brzinama hlađenja, odnosno legirani čelici.
- Postoji mogućnost izjednačavanja temperature površine i jezgra, pre nego što počne transformacija austenita, što je velika prednost kod komada nepovoljnih oblika.
- Mehaničke osobine su lošije nego kod kombinovanog postupka i najverovatnije su posledica povoljnijeg oblika nasalog karbida u trustitu i sorbitu nego u beinitu.
- Poređenje osobina kod:
 - Izotermalno poboljšavanje: $\searrow R_m$, $\nearrow R_p$
 - Kombinovano poboljšavanje: $\nearrow R_m$, $\searrow R_p$
- Nema dodatnog otpuštanja tako da je postupak veoma dobrih ekonomskih efekata



Termička obrada i inženjerstvo površina



Hvala na pažnji

Vanr. prof.dr Pal Terek