



## *Termička obrada i inženjerstvo površina*



# **Površinsko ojačavanje**

*Vanr. prof.dr Pal Terek*

# Površinsko ojačavanje

Česti razlozi zbog kojih se mašinski delovi izbacuju iz upotrebe

- Lom (preopterećenje, zamor materijala)
- Habanje-progresivno odnošenje materijala sa delova koji se klizaju ili kotrljaju jedan preko drugog
- Korozija-hemijsko propadanje površine delova



# Površinsko ojačavanje

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.

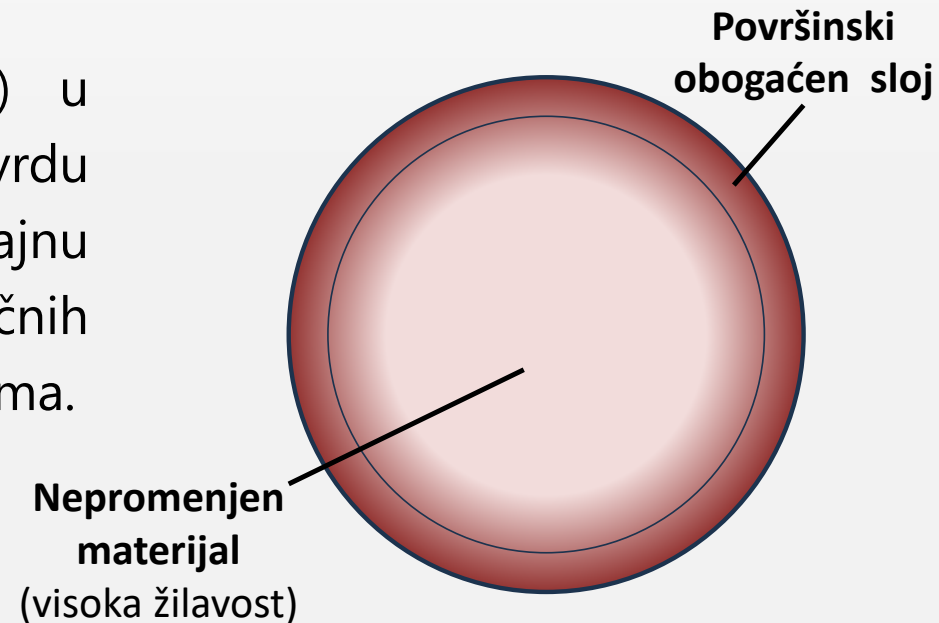
# Površinsko ojačavanje

Tehnologije površinskog ojačavanja:

- Naklep
- Površinsko kaljenje
  - Plameno
  - Indukciono
  - Laserom
  - Elektronskim snopom
  - ...
- Termo-hemijski procesi
  - Difuziono zasićenje nemetalima (Cementacija, Nitriranje, Karbonitriranje, Nitrocementacija,...)
  - Difuziono zasićenje metalima (Niklovanje, Hromiranje, Alitiranje, Siliciranje,...)
- Depozicije
  - PVD
  - CVD
  - ...

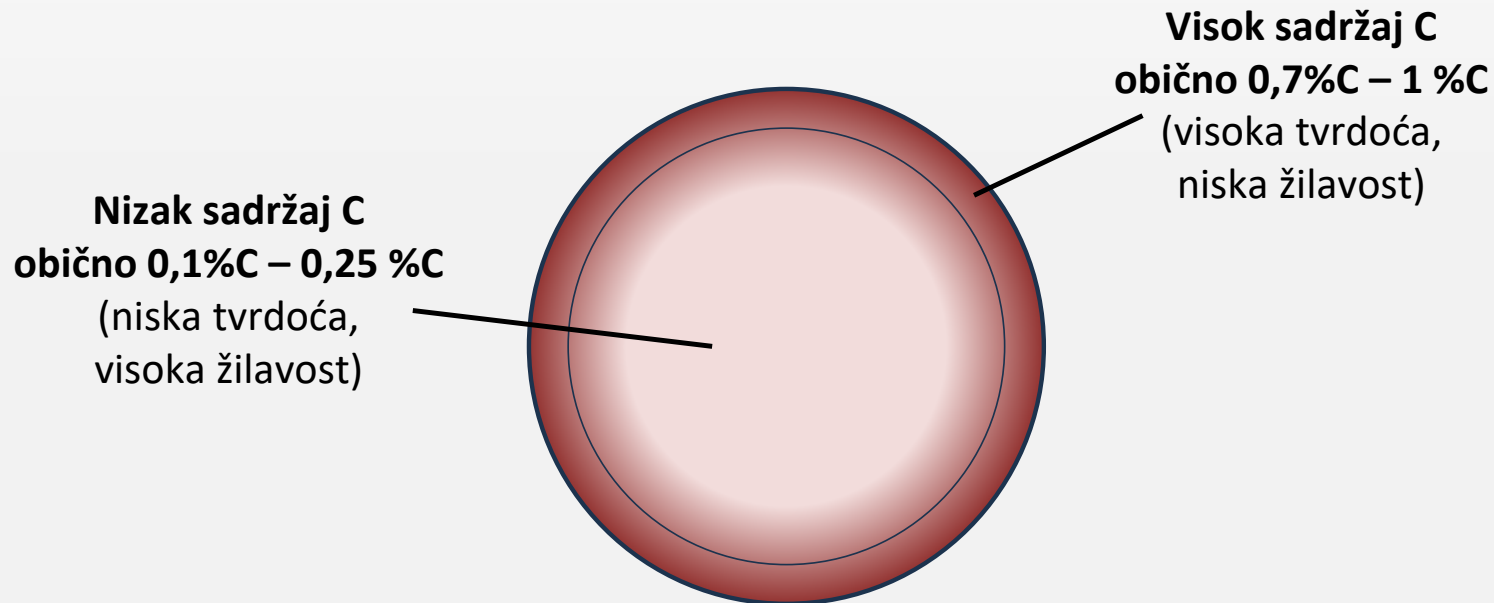
# Termohemijska obrada

- 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.
- **Nitriranje** je postupak difuzije azota (N) u površinski sloj čeličnog dela. Nitriranje daje tvrdnu površinu (otpornu na habanje), povećanu trajnu dinamičku čvrstoću i bolju postojanost čeličnih delova prema koroziji i povišenim temperaturama.



# Cementacija

- Cementacija je proces termohemijske obrade koji se izvodi u austenitnoj oblasti (880-980 °C) sa ciljem obogaćivanja površine ugljenikom, koji se nalazi u čvrstom rastvoru u austenitu.
- Postupak ojačavanja površine cementacijom po definiciji obuhvata i kaljenje radnog predmeta.



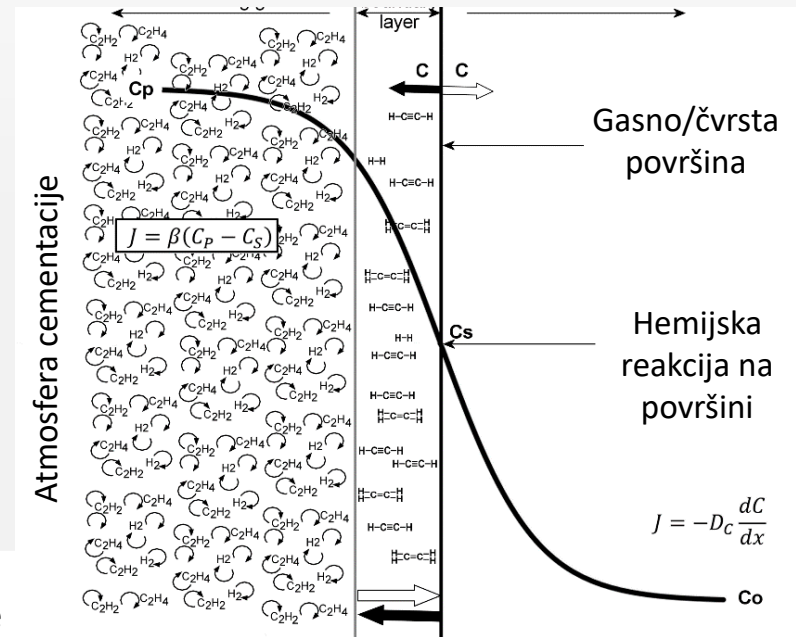
# Cementacija

- Za vreme naugljeničavanja dešavaju se tri fizičko - hemijska procesa:
  - disocijacija ugljenika na površinu komada,
  - adsorbcija ugljenika na površini komada i
  - difuzija ugljenika od površine ka unutrašnjosti komada.

Ugljenični potencijal atmosfere (ugljenična aktivnost) predstavlja efektivnu koncentraciju ugljenika u sredstvu u kojem se vrši termička obrada ferolegura.

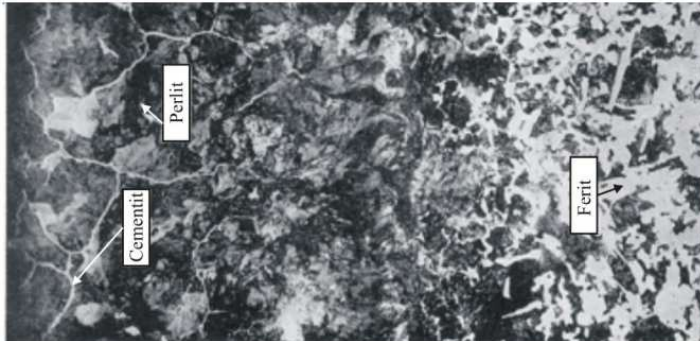
Efekat cementacije, tj. dubina i koncentracija ugljenika u površinskom sloju, zavisi od ugljeničnog potencijala, vremena trajanja cementacije, temperature i sposobnosti čelika ka cementaciji.

$C_p$ -ugljenični potencijal atmosfere

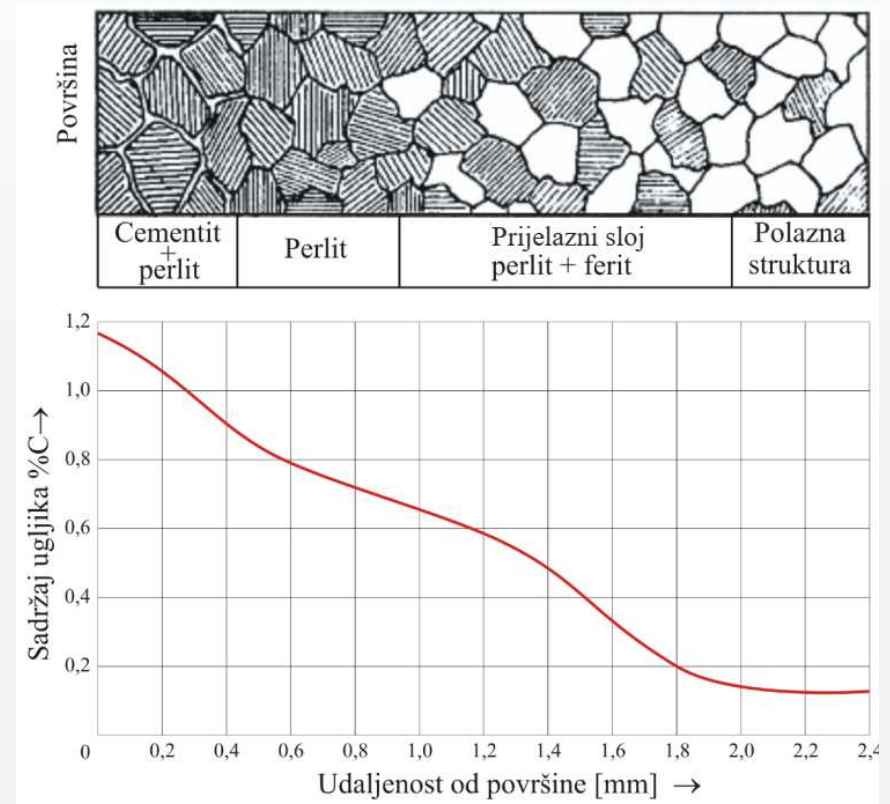


# Cementacija

- Sadržaj ugljenika cementiranog sloja

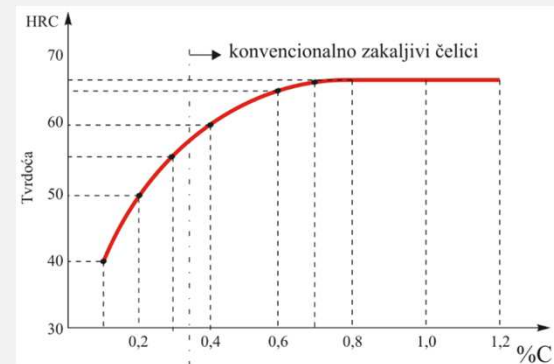
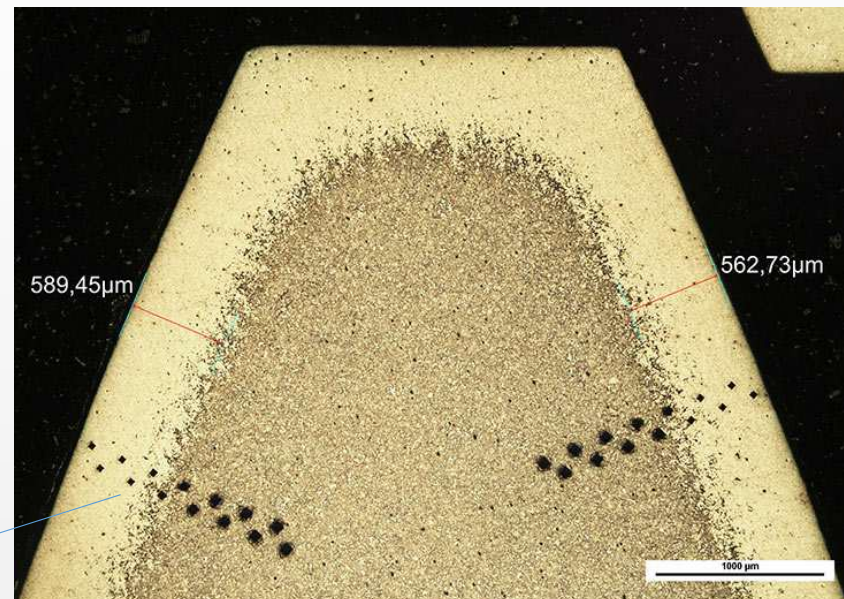
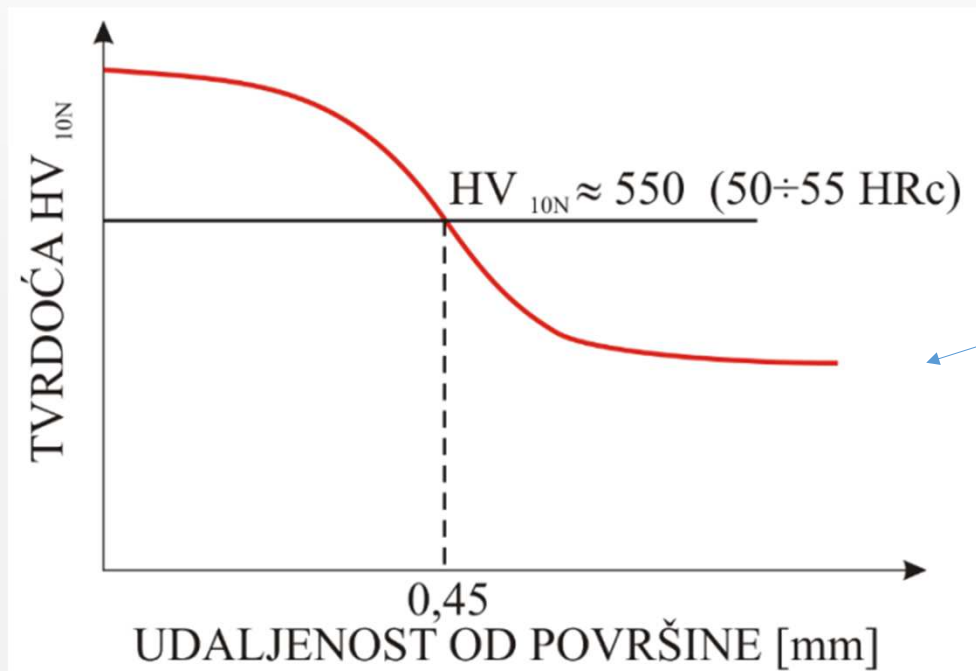


Mikrostruktura posle cementacije  
(deo u žarenom stanju)



# Dubina cementacije

- Dubina cementiranog sloja



- SRPS EN ISO 18203:2022 Čelik – Određivanje debljine površinski otvrdnutih slojeva

# Cementacija u čvrstom sredstvu

## **Prednosti :**

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

## **Nedostaci :**

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



# Cementacija u tečnom sredstvu (rastopima soli)

## **Prednosti:**

- Kraće trajanje procesa zbog velike brzine zagrevanja komada i odsustva potrebe da se delovi pakuju u posebne kutije.
- Vreme zagrevanja se može zanemariti dok je hemijski potencijal soli ujednačen => dobija se veoma ujednačena debljina cementiranog sloja što je posebno pogodno kod sitnijih komada (da se ne cementira jezgro)
- Moguće je direktno kaljenje radnih predmeta, što pojeftinjuje proizvodnju.

## **Nedostaci:**

- Sona kupatila obično imaju ograničenu veličinu pa je otežana cementacija delova velikih gabarita.
- Potrebne su veće mere zaštite zbog štetnih isparenja soli iz kupatila.
- Povećani investicioni troškovi u odnosu na cementaciju u čvrstom sredstvu

# Cementacija u gasovitom sredstvu

## **Prednosti:**

- Laka regulacija dubine cementiranog sloja i rasporeda sadržaja ugljenika u cementiranom sloju
- Najlakše je izvesti direktno kaljenje
- Laka automatizacija procesa

## **Nedostaci:**

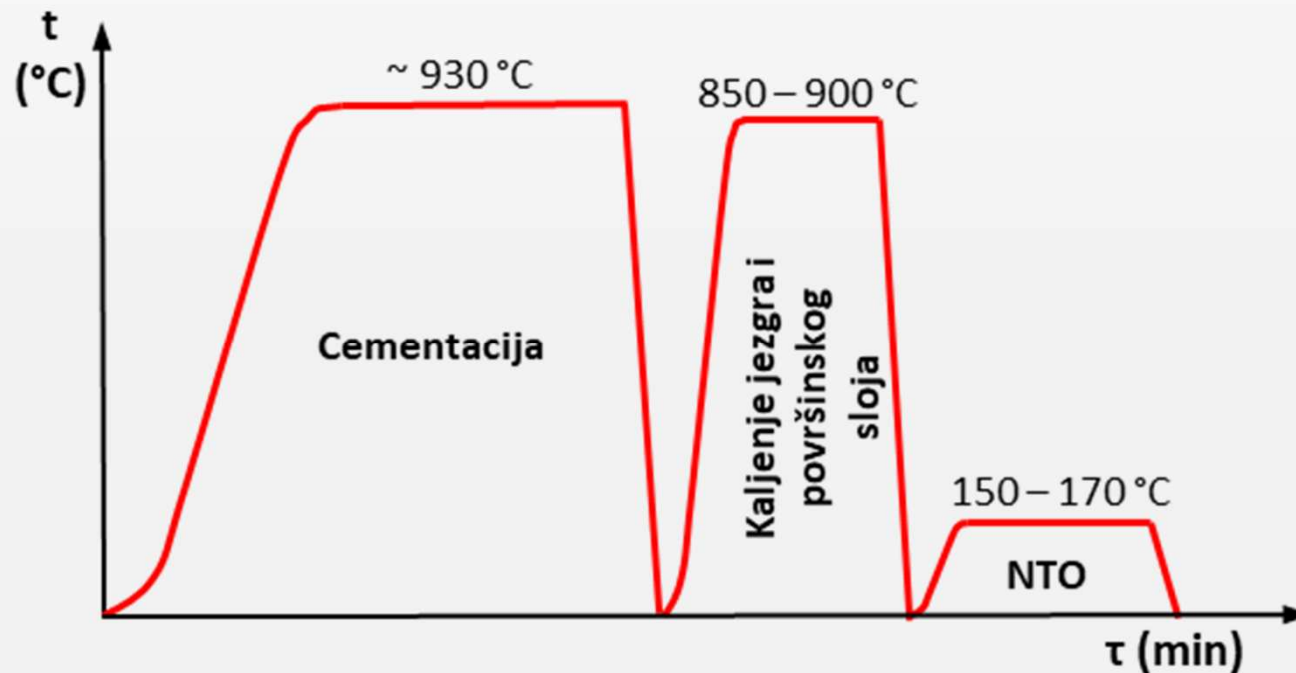
- Najviša kapitalna ulaganja i kasnije održavanje postrojenja
- Osoblje mora biti bolje obučeno

# Cementacija u gasovitom sredstvu



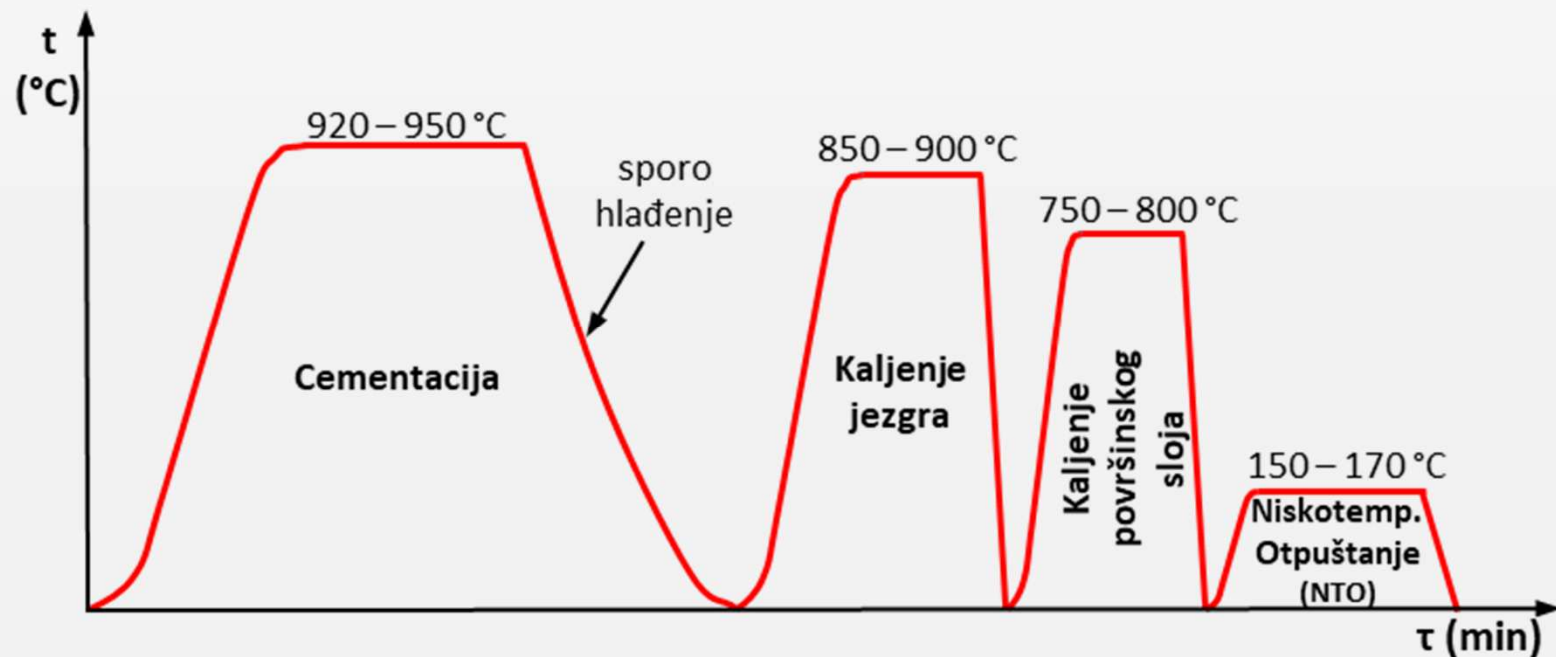
# Termička obrada nakon cementacije

Ukoliko se postavljaju manji zahtevi pred cementirani površinski sloj, obavlja se jedno kaljenje i niskotemperaturno otpuštanje, koje u najvećoj mjeri odgovara jezgri komada;



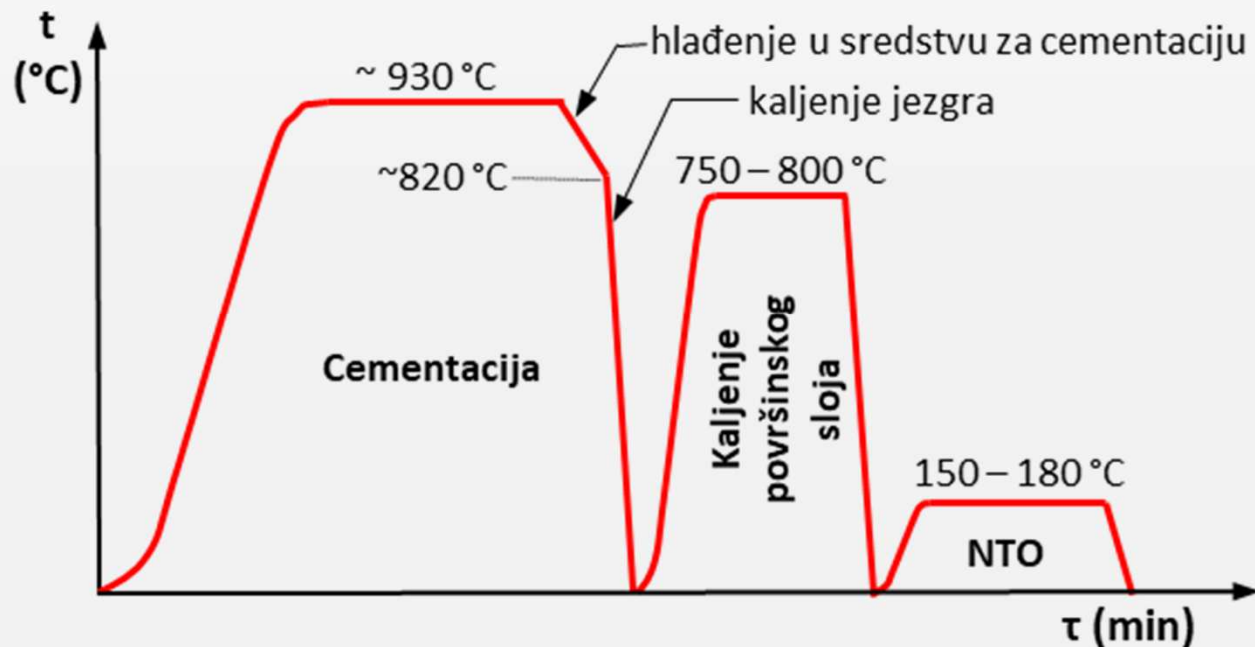
# Termička obrada nakon cementacije

- Kada se zahtevaju optimalne osobine i jezgra i površine, vrši se **dva kaljenja**
  - kaljenje jezgra koje ima za cilj profinjavanje strukture jezgra
  - kaljenje površinskog sloja pri čemu će jezgro možda opet biti kaljeno ali nepotpuno jer je temperatura kaljenja neka



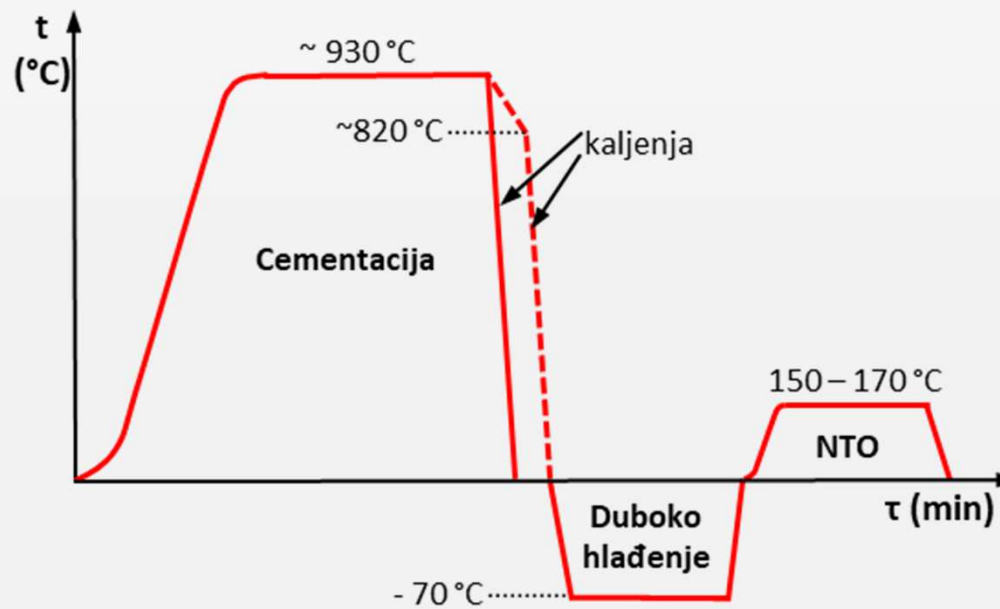
# Termička obrada nakon cementacije

- Kada se zahtevaju optimalne osobine i jezgra i površine manjih komada, vrši se **direktno kaljenje**
- Povoljan postupak u masovnoj proizvodnji jer je brži i mnogo ekonomičniji



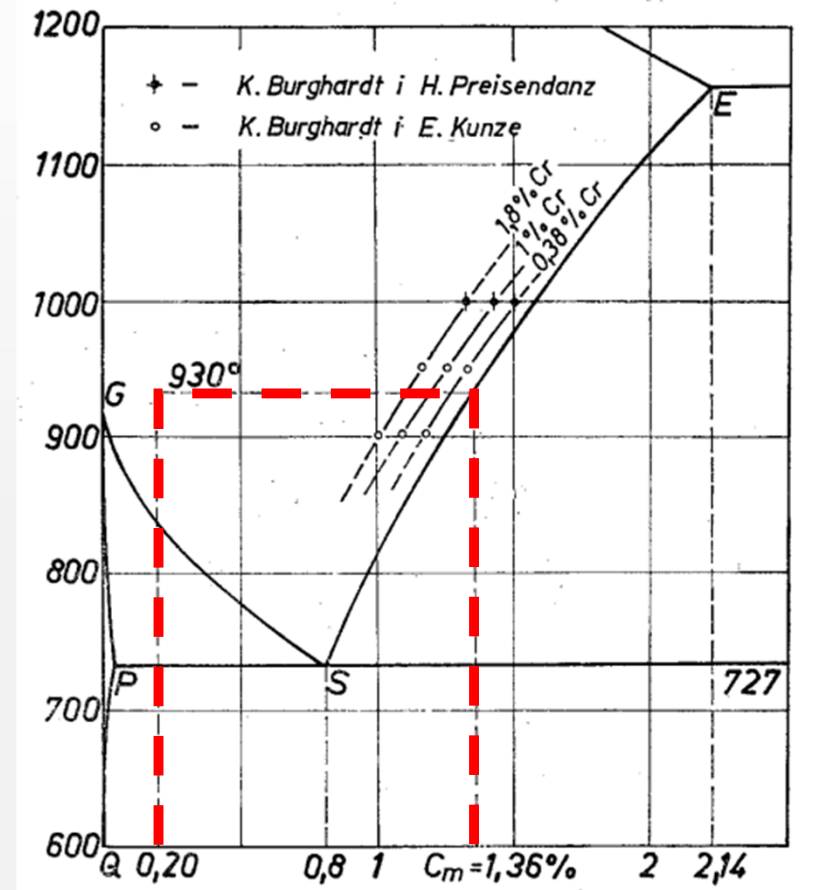
# Termička obrada nakon cementacije

- Nedostatak direktnog kaljenja nakon cementacije su krupnozrno jezgro i veća količina zaostalog austenita u tvrdom sloju.
- Smanjenje količine zaostalog austenita može se postići dubokim hlađenjem



# Termička obrada nakon cementacije

- Temperatura cementacije se obično kreće između 880 °C i 980 °C
- Temperatura jednostavnog kaljenja: između 820 °C i 870 °C
- Dvostruko kaljenje:
  - Kaljenje jezgra: između 840 °C i 900 °C
  - Kaljenje površine: između 780 °C i 820 °C
- NTO: između 150 °C i 200 °C



# Čelici za cementaciju

- Čelici za cementaciju, po pravilu sadrže malu količinu ugljenika između 0,08 %C i 0,31 %C (najčešće između 0,15 %C i 0,21 %C)
- Mogu biti:
  - Ugljenični
  - Legirani

# Završne napomene

## Prednosti:

- Nakon termičke obrade površina ima visoku tvrdoću i otpornost na habanje, dok se jezgro odlikuje ekstremnom žilavošću (delovi su u stanju da izdrže dinamička i udarna opterećenja)
- Može se postići minimalna deformacija tokom kaljenja (samo tanak površinski sloj prolazi kroz martenzitnu transformaciju), a kako je jezgro žilavo teže nastaju pukotine pri kaljenju.
- Ukoliko je to potrebno, pojedine površine radnog komada se mogu zaštititi od cementacije

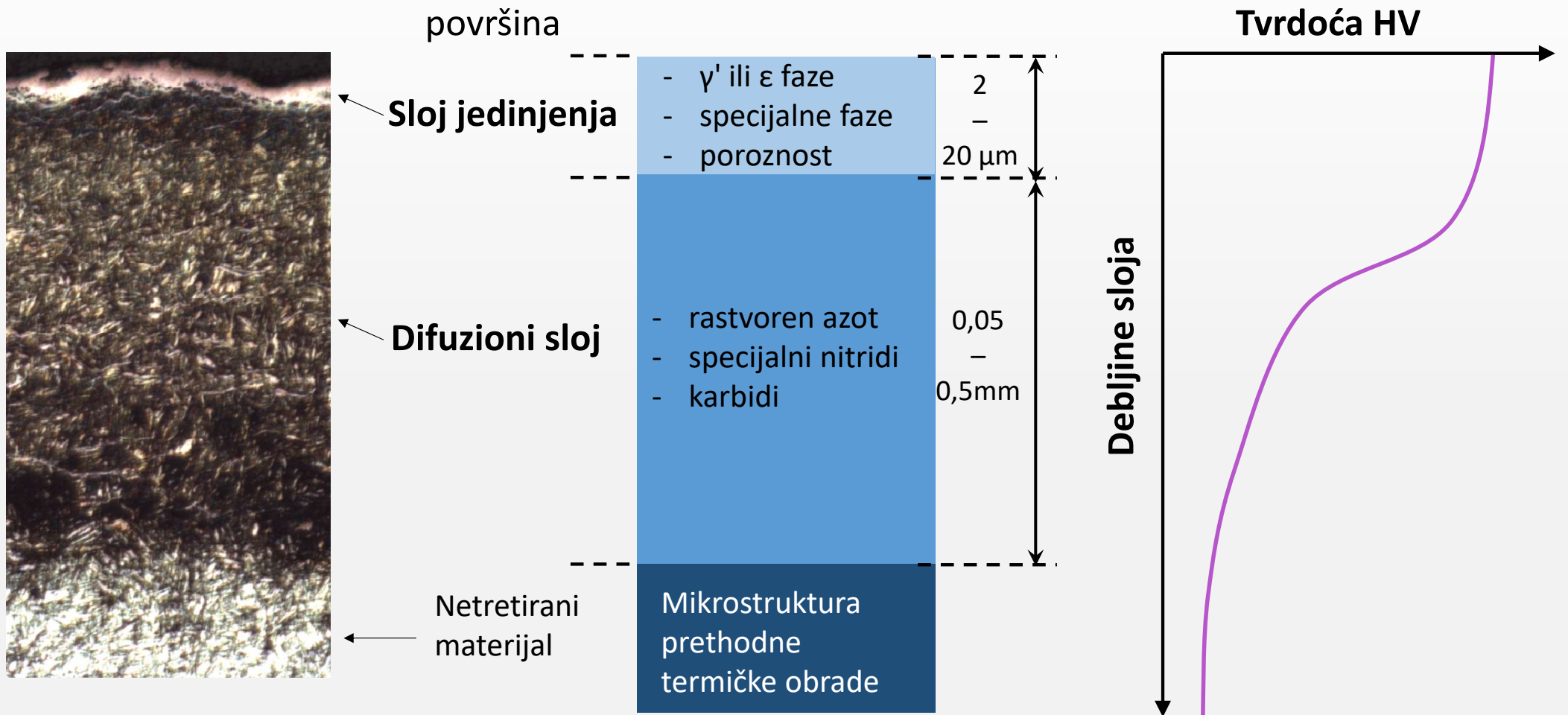
## Nedostaci:

- Niska radna temperatura cementiranih delova (do 200°C)
- Problemi sa velikom količinom zaostalog austenita u površinskom sloju
- Dugotrajno izlaganje visokim temperaturama može dovesti do deformacije radnih predmeta usled sopstvene težine (delovi se mogu ispravljati ako se ne radi direktno kaljenje)

# Nitriranje

- **Nitriranje je postupak termohemijske obrade koji se primenjuje u cilju proizvodnje tvrdog površinskog sloja koji sadrži nitride.**
- Za razliku od procesa cementacije koji se obavlja u austenitnom području i za dobijanje visoke površinske tvrdoće zahteva naknadno kaljenje i martenzitnu transformaciju,  
nitriranje se sprovodi u feritnom području i naknadno hlađenje do sobne temperature ne dovodi do faznih transformacija.
- Temperature nitriranja se kreću u opsegu od 400 do 600°C
- Nakon nitriranja delova proces termičke obrade je završen i nipošto se ne vrši naknadna obrada brušenja niti drugi vidovi obrade komada

# Struktura nitriranog sloja



# Osnove procesa nitriranja

Osnovne prednosti nitriranih slojeva:

- visoka tvrdoća površinskog sloja,
- zadržavanje visoke tvrdoće i na temperaturama do 550 °C,
- visoka dinamička čvrstoća, tj. otpornost na zamor materijala (usled visokih pritisnih napona u nitriranom sloju),
- visoka stabilnost dimenzija,
- otpornost na efekat zareza,
- poboljšana koroziona i oksidaciona postojanost (naročito kod niskolegiranih i niskougleničnih čelika),
- temperature procesa su dovoljno niske tako da ne utiču na strukturu prethodno poboljšanog čelika,
- poboljšana otpornost na habanje na povišenim temperaturama (do 600°C).

# Osnove procesa nitriranja

Osnovni postupci nitriranja:

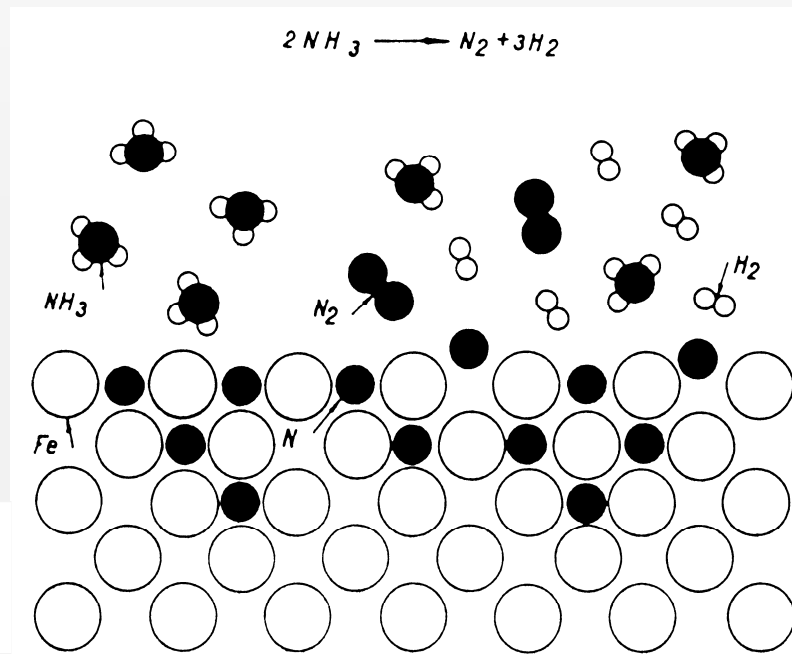
- Gasno nitriranje
- Nitriranje u solima
- Plazma nitriranje
  
- Postoji mnogo varijacija navedenih postupaka, kao i neki manje korišćeni postupci, na primer: nitriranje u fluidiziranom sloju, nitriranje u prahu, nitriranje uz pomoć lasera, ....

# Gasno nitriranje

Nakon uvođenja radnog gasa u peć (amonijak-  $\text{NH}_3$ ) vrši se zagrevanja radnih predmeta ( $400\text{-}600^\circ\text{C}$ ). Otpočinje proces nitriranja u kojem postoje sledeće faze:

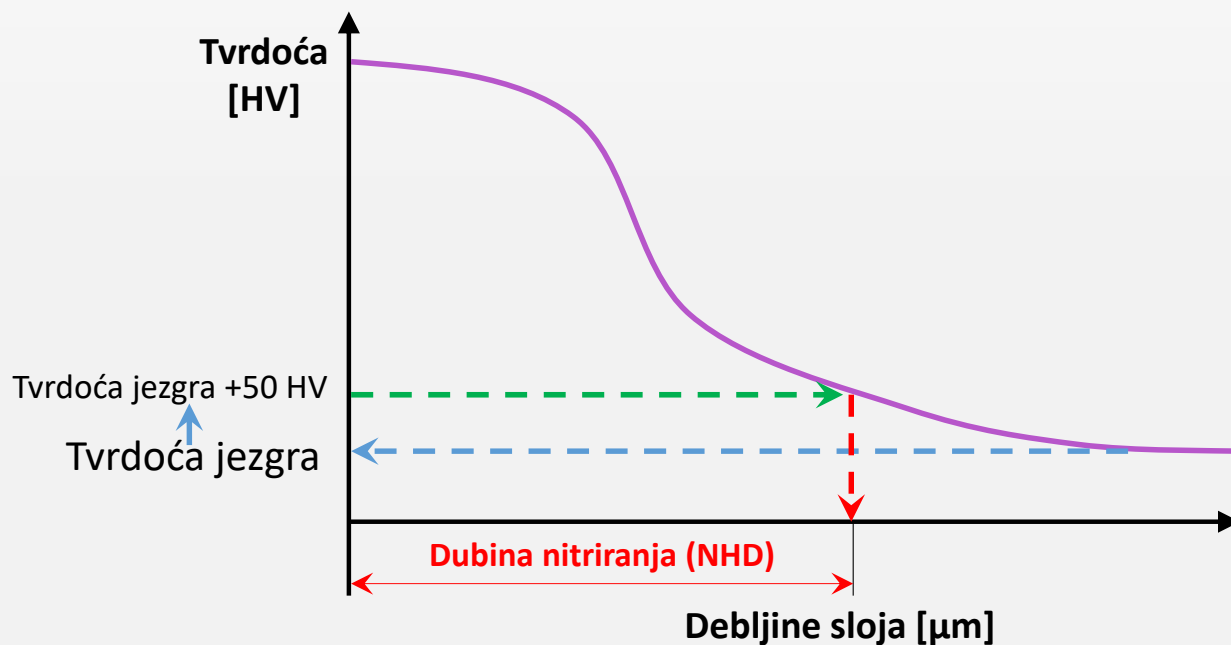
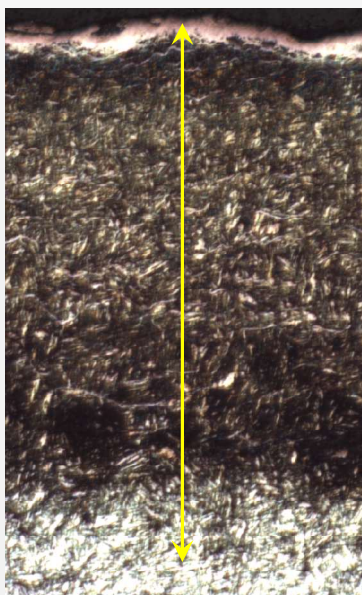
- disocijacija (razgradnja) amonijaka,
- adsorpcija aktivnog azota (vezivanje azota na površinu radnog predmeta) i
- difuzija atoma azota u dubinu radnog predmeta.

$$K_N = \frac{p_{\text{NH}_3}}{[p_{\text{H}_2}]^{3/2}}$$



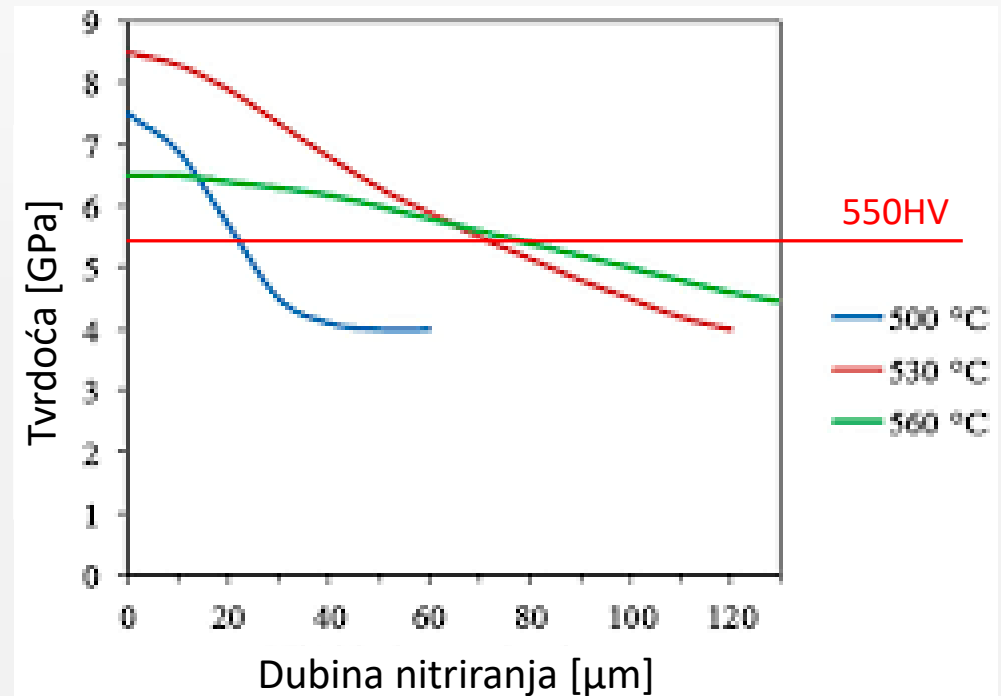
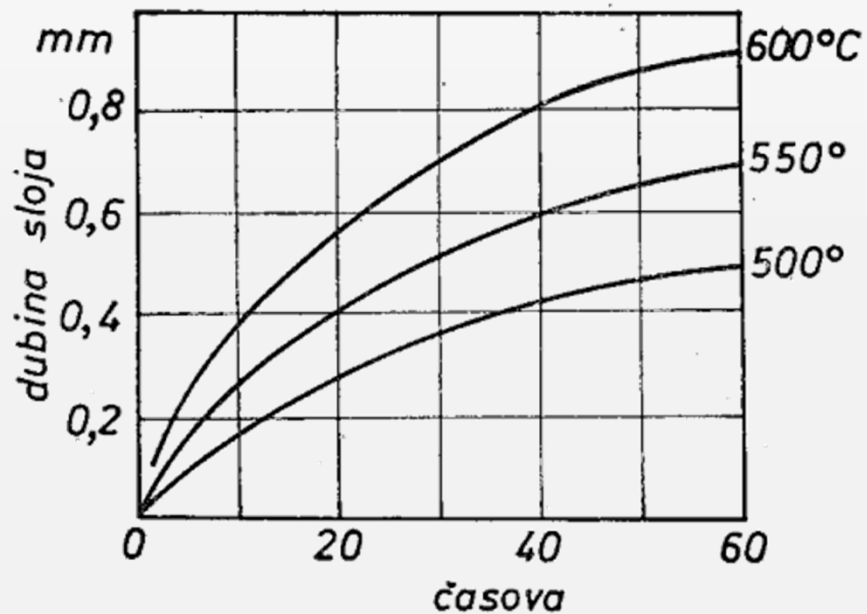
# Određivanje dubine nitriranja

- Dubina nitriranog sloja NHD
- Ukupna debljina površinskog otvrdnjavanja THD
- Debljina sloja jedinjenja CLT



# Gasno nitriranje

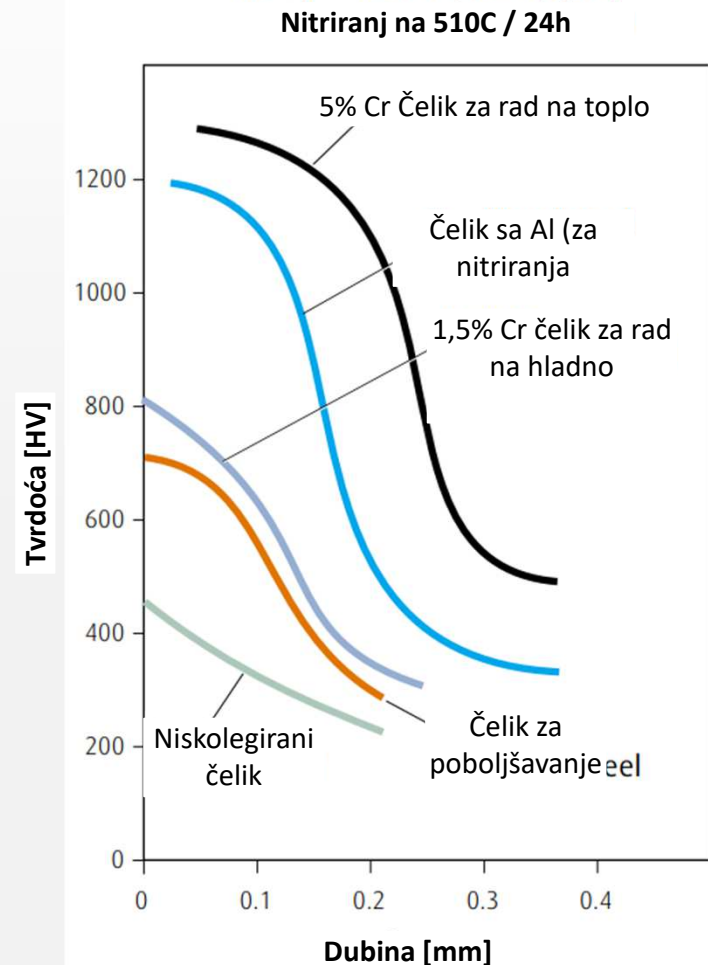
- Parametri procesa koji imaju najveći uticaj na rezultate procesa nitriranja su vreme i temperatura
- Osim toga veoma je važno kontrolisati protok gasova u komori i pritisak



# Čelici za nitriranje

Svi čelici se mogu nitrirati samo je pitanje kolikom efikasnošću (kolikom dubinom i koje maks. tvrdoće):

- Niskougljenični i niskolegirani čelici nakon nitriranja imaju nisku tvrdoću (35HRC) pa se nitriraju samo zbog povećanja korozivne otpornosti
- Čelici za nitriranje posebno razvijeni za ovu svrhu jer imaju srednji sadržaj ugljenika i legirajućih elemenata koji imaju afinitet ka formiranju nitrida
- Visokolegirani (alatni) čelici se veoma dobro nitriraju jer imaju legirajuće elemente (Cr, V, Mo) koji obrazuju tvrde nitride

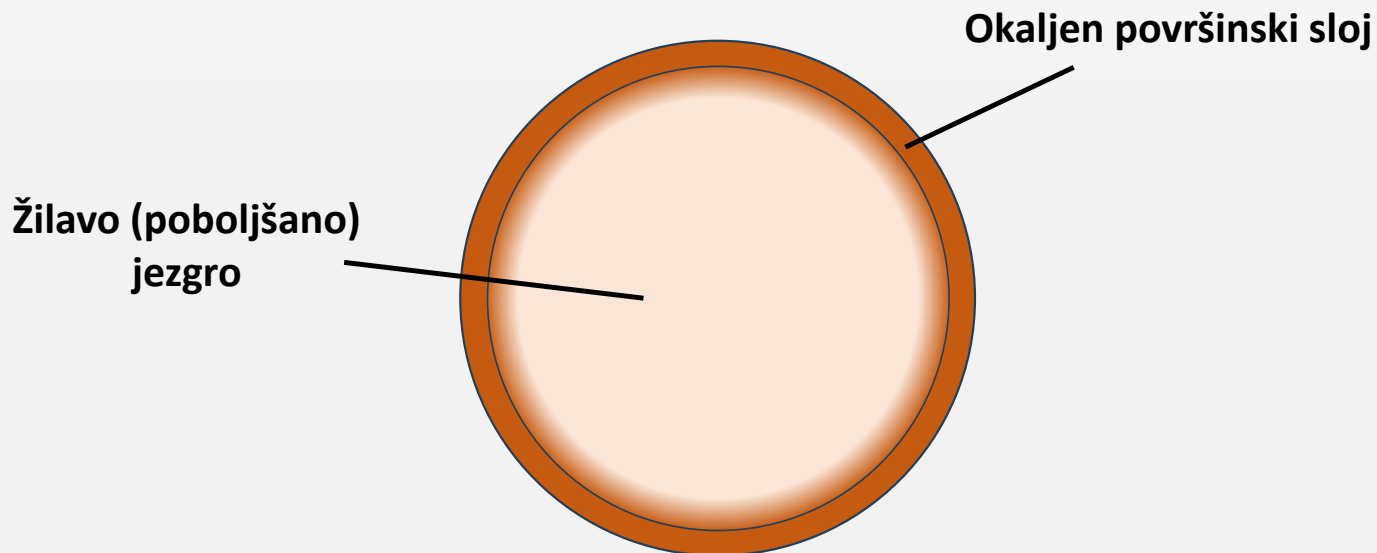


# Upotreba nitriranja



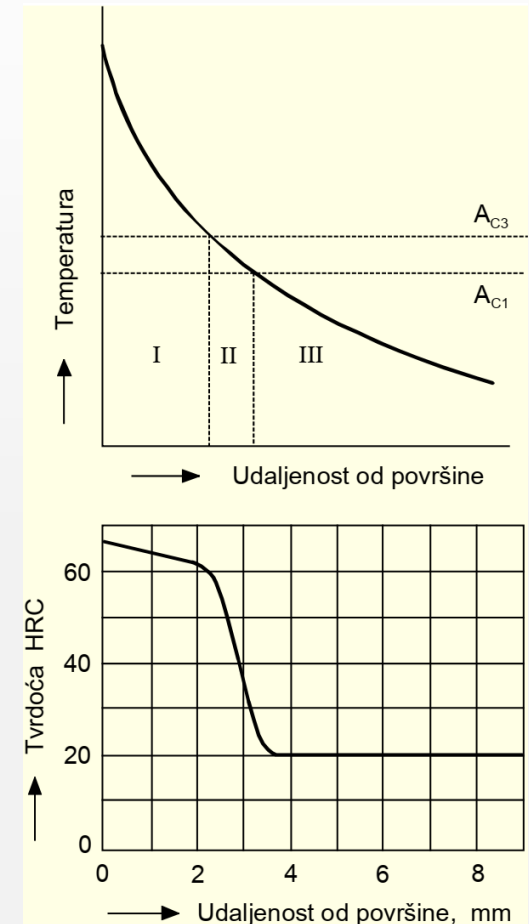
# Površinsko kaljenje

- Površinsko kaljenje je vid površinskog ojačavanja (otvrdnjavanja) kod kojeg se intenzivnim dovodenjem toplote i naknadnim hlađenjem kali samo tanak površinski sloj, bez uticaja na početnu mikrostrukturu ostatka radnog predmeta.
- Zbog optimalnih osobina jezgra, površinsko kaljenje se po pravilu izvodi nad radnim predmetima koji se nalaze u poboljšanom stanju.



# Površinsko ojačavanje

- Površinsko kaljenja
- Kod površinskog kaljenja u tankom površinskom sloju nastaje martenzitna struktura koja stvara zaostale pritisne napone i menja mehančke osobine površinskog sloja



# Površinsko kaljenje

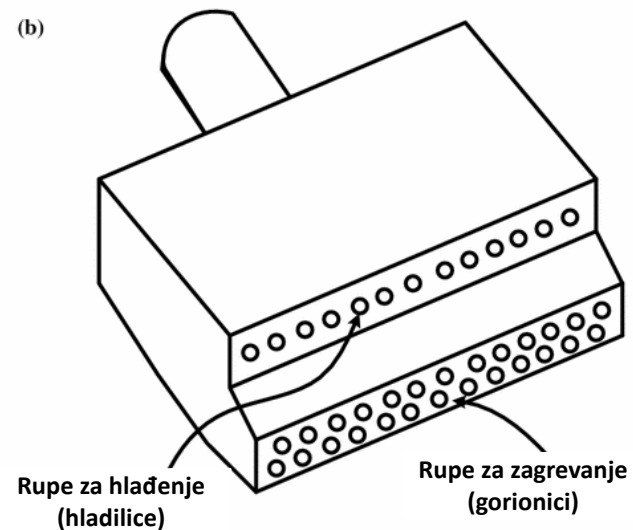
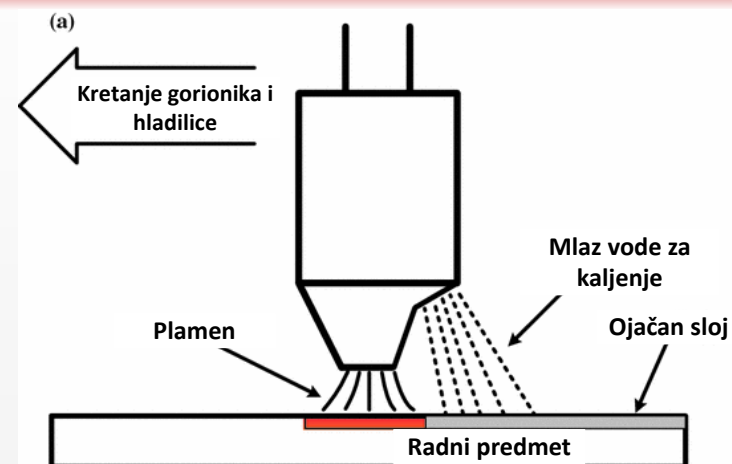
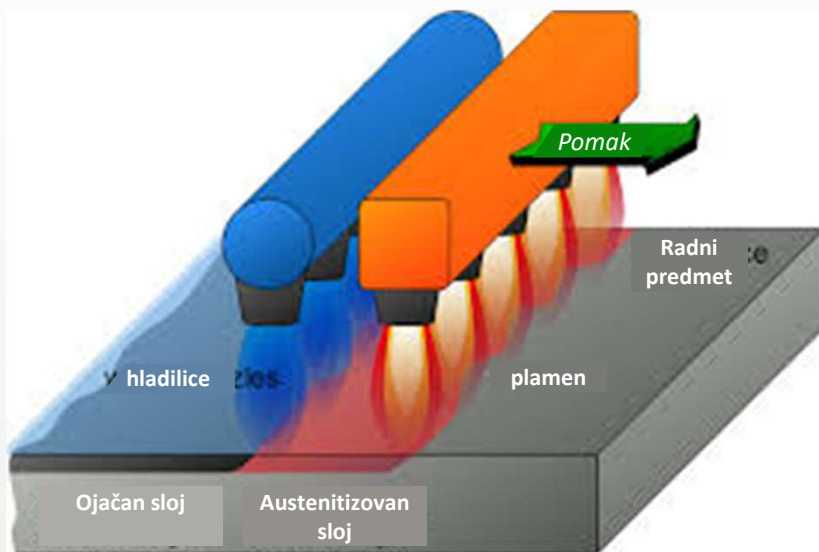
- Zagrevanje mora biti brzo da ne bi došlo do prodiranja toplote u dublje slojeve materijala i time smanjili efekti površinskog kaljenja
- Kako bi se ostvarile velike brzine zagrevanja komada, i time ograničena dubina prodiranja toplote, površinsko kaljenje obično zahteva upotrebu izvora toplote koji su u stanju da ostvare gustine toplotnog fluksa koje prelaze  $2 \text{ kW/cm}^2$  ( $20 \text{ MW/m}^2$ )
- Prema načinu zagrevanja se pravi osnovna podela postupaka površinskog kaljenja na:
  1. plameno kaljenje,
  2. indukciono kaljenje,
  3. kaljenje elektronskim snopom,
  4. kaljenje laserskim snopom.

# 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.
- Koristi se voda, ulje i vazduh.

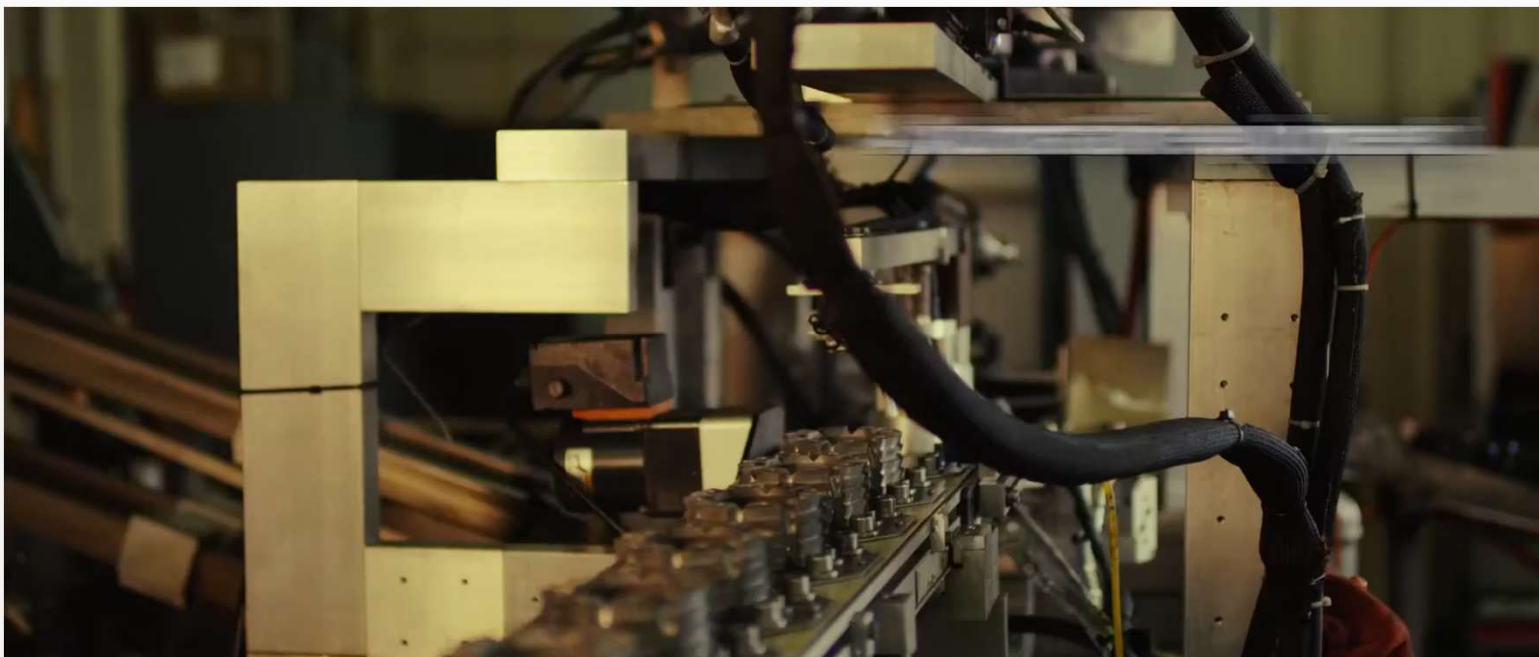


# Plameno kaljenje



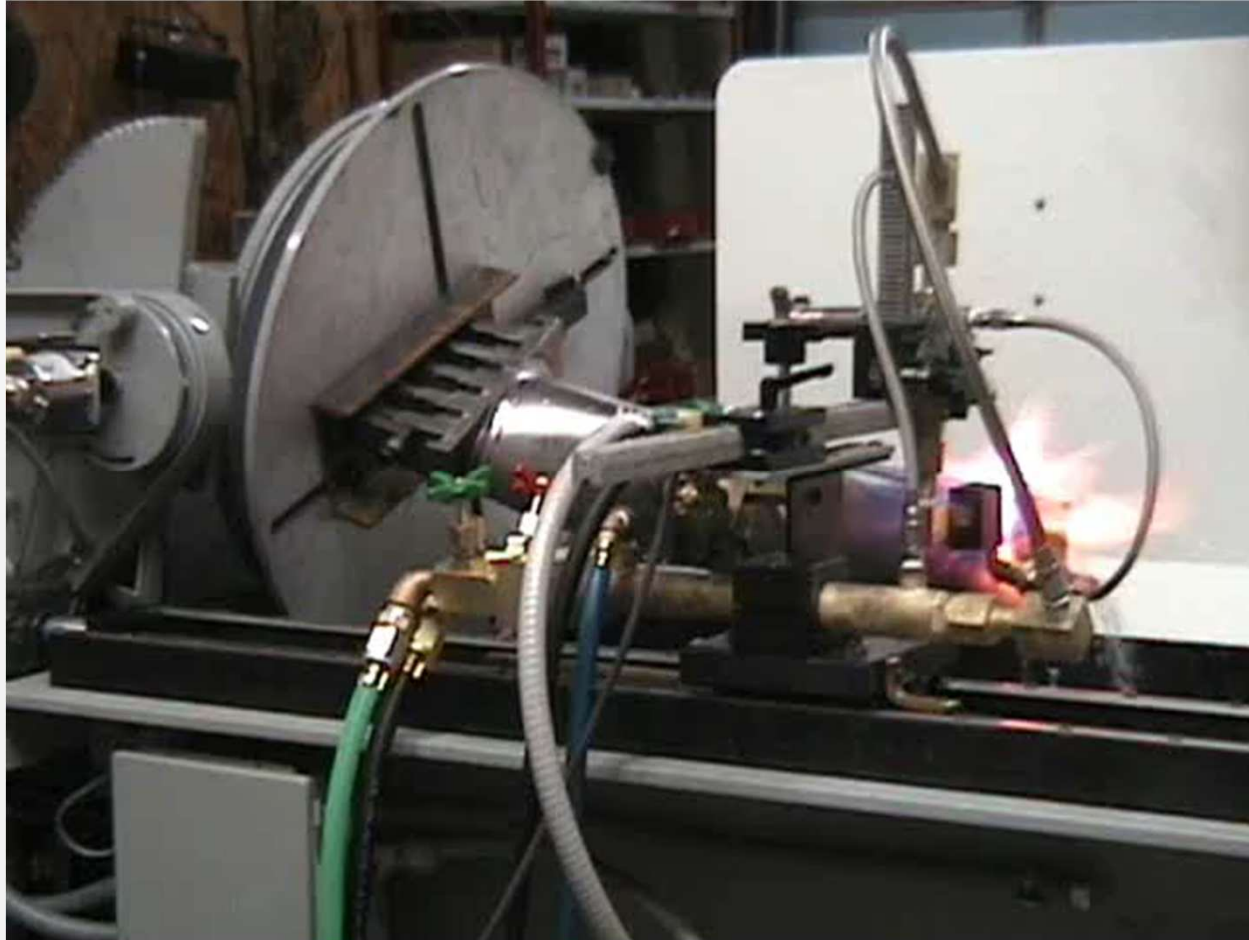
# Plameno kaljenje

- Postupna kaljenja



- <https://www.youtube.com/watch?v=i7UWzW5pGTI>

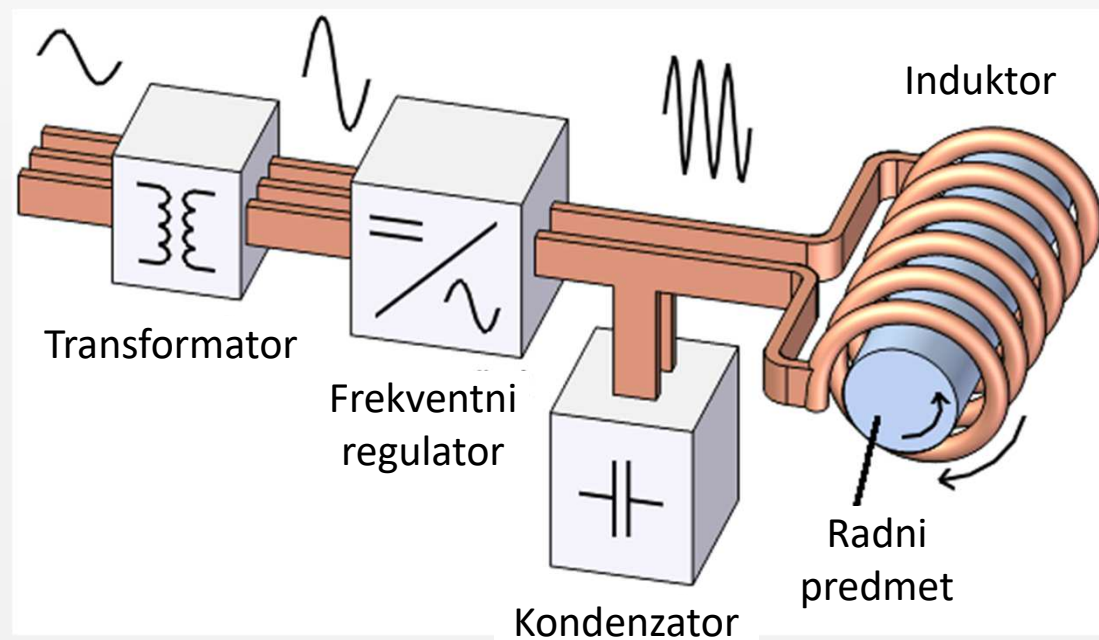
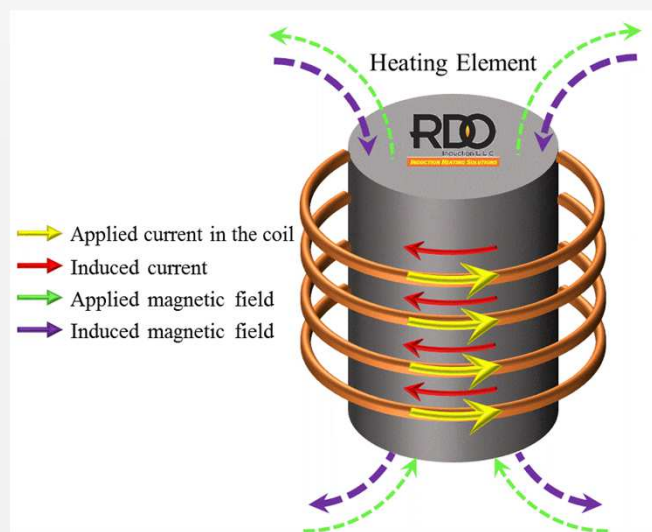
# Plameno kaljenje



- [https://www.youtube.com/watch?v=P\\_keuz\\_jSC4](https://www.youtube.com/watch?v=P_keuz_jSC4)

# Indukciono kaljenje

- Kod indukcionog kaljenja se principima elektromagnetne indukcije u radnom predmetu indukuje struja koja vrši njegovo zagrevanja
- Naknadnim hlađenjem radnog predmeta vrši se kaljenje kojim se otvrdnjava sloj koji je predhono bio zagrejan na odgovarajuću temperaturu



# Indukciono kaljenje

- Primer indukcionog kaljenja



- <https://www.youtube.com/watch?v=Jkt9T9kZjIY>

# Indukciono kaljenje

U odnosu na plameno kaljenje kod indukcionog kaljenja je:

- Proces brži
- Bolja je kontrola parametara procesa
- Veliki je opseg dubina kaljenja koji se može postići
- Dobra je ponovljivost procesa
- Nema generisanja produkata sagorevanja
- Skuplja je oprema



## *Termička obrada i inženjerstvo površina*



**Hvala na pažnji**

*Vanr. prof.dr Pal Terek*