

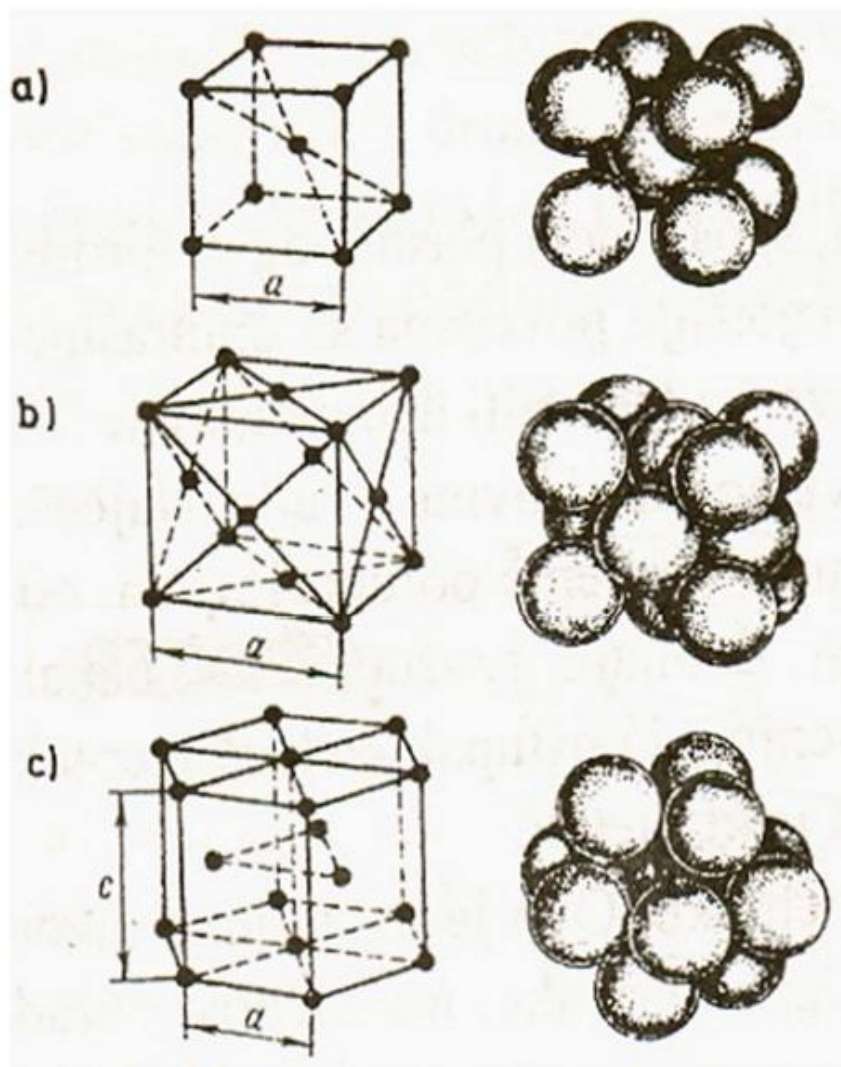
METALI – ČELIK I OBOJENI METALI

GRAĐEVINSKI MATERIJALI II

UVOD

- Osnovne odlike metala su karakterističan metalni sjaj, sposobnost plastičnog deformisanja i toplotna i električna provodljivost (posledica unutrašnje građe metala – metalne molekulske veze).
- Tehnologija dobijanja metala zavisi od karakteristike sirovine – rude:
 - topljenjem se dobijaju gvožđe, čelik, bakar i drugi metali,
 - elektrolizom se dobijaju alumunijum, magnezijum i drugi metali.
- U građevinarstvu se retko primenjuju čisti metali – najčešće se primenjuju legure.
- Legure su složene supstance koje se dobijaju interakcijom dva ili više metala ili interakcijom metala sa nemetalima.
- Legure imaju bolja mehanička, hemijska, tehnološka i druga svojstva u odnosu na čiste metale (npr. čelik u odnosu na gvožđe)
- Metali se najčešće dele na crne (gvožđe i njegove legure) i obojene (aluminijum, bakar, cink, olovo i dr.).
- U građevinarstvu se najčešće primenjuju legure gvožđa (oko 95%), dok su čisti obojeni metali i njihove legure koriste u znatno manjem obimu.

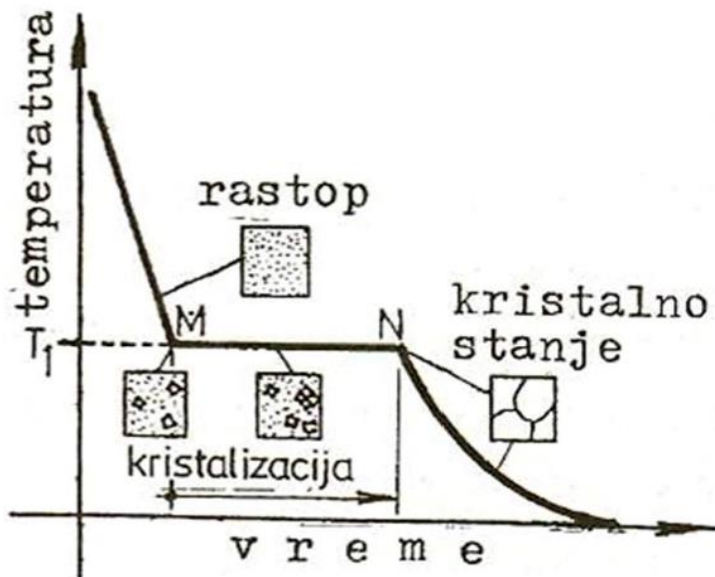
STRUKTURA METALA



- Čisti metali i njihove legure imaju kristalnu strukturu.
- Najrasprostranjeniji su metali sa:
 - kubnom zapreminski centriranom rešetkom (gvožđe, hrom, volfram, molibden), *slika 1a*,
 - kubnom površinski centriranom rešetkom (aluminijum, bakar, nikl, olovo), *slika 1b*, i
 - heksagonalom rešetkom (cink, magnezijum, kadmijum), *slika 1c*.

Slika 1. Oblici kristalne strukture metala

STRUKTURA METALA



- Kristalna rešetka metala formira se tokom kristalizacije – procesa obrazovanja kristala iz rastopljenog metala.
- Forma, veličina i orijentacija kristala u velikoj meri utiče na svojstva metala.

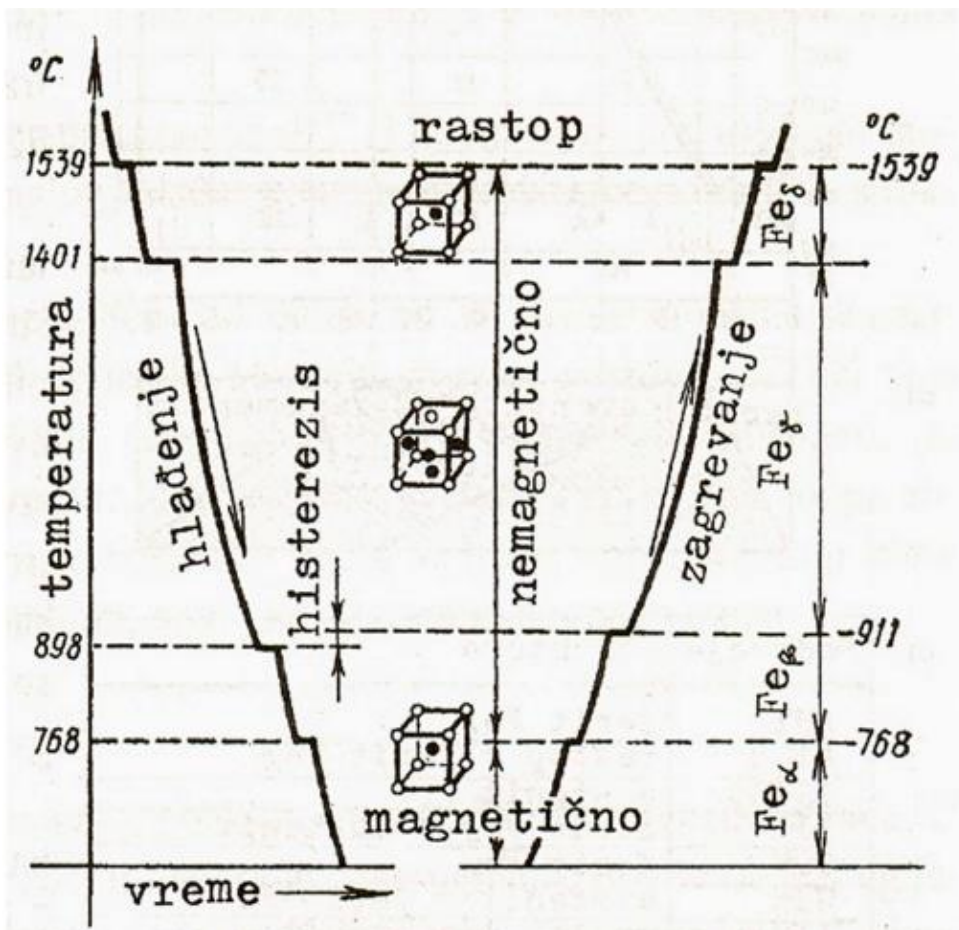
Slika 2. Kriva hlađenja rastopljivog metala

- Očvršćavanje metala pri hlađenju počinje i završava se na istoj temperaturi T_1 .
- Zastoj u hlađenju na ovoj temperaturi (horizontalni deo dijagrama) uslovljen je oslobađanjem skrivene toplote topljenja.
- Temperature kristalizacije, a samim tim i temperature topljenja, variraju u širokim granicama od $-38,9^{\circ}\text{C}$ (živa) do 3410°C (volfram)

STRUKTURA GVOŽĐA I LEGURA GVOŽĐA

- Elementarno gvožđe (Fe) nije pogodno za tehničku upotrebu zbog male zatezne čvrstoće – oko 200 MPa.
- Čelik je legura gvožđa koji se najviše primenjuje u tehnici (pa samim tim i u građevinarstvu)
- Ugljenik (C) je najznačajniji element za legiranje prilikom dobijanja čelika, a mogu se koristiti još i silicijum (Si), mangan (Mn), nikl (Ni), hrom (Cr), molibden (Mo), volfram (W) i dr.
- Najčešće štetne primese koje se javljaju tokom proizvodnje čelika i ne mogu eliminisati su sumpor (S), fosfor (P), azot (N), kiseonik (O) i dr.
- Kao i ostali metali, čelik ima kristalnu strukturu, što znači da se sastoji od mnoštva mikroskopski sitnih kristalnih zrna različitih veličina i orijentacija.
- Osnovni geometrijski oblik kristalne rešetke gvožđa je kocka, koja može da bude prostorno ili površinski centrirana.
- Gvožđe se javlja u četiri alotropske modifikacije – $Fe\alpha$, $Fe\beta$, $Fe\gamma$ i $Fe\delta$ – ispitivanja su pokazala da modifikacije $Fe\alpha$, $Fe\beta$ i $Fe\delta$ imaju prostorno centričnu rešetku, dok je rešetka modifikacije $Fe\gamma$ površinski centrirana.

STRUKTURA GVOŽDA I LEGURA GVOŽDA



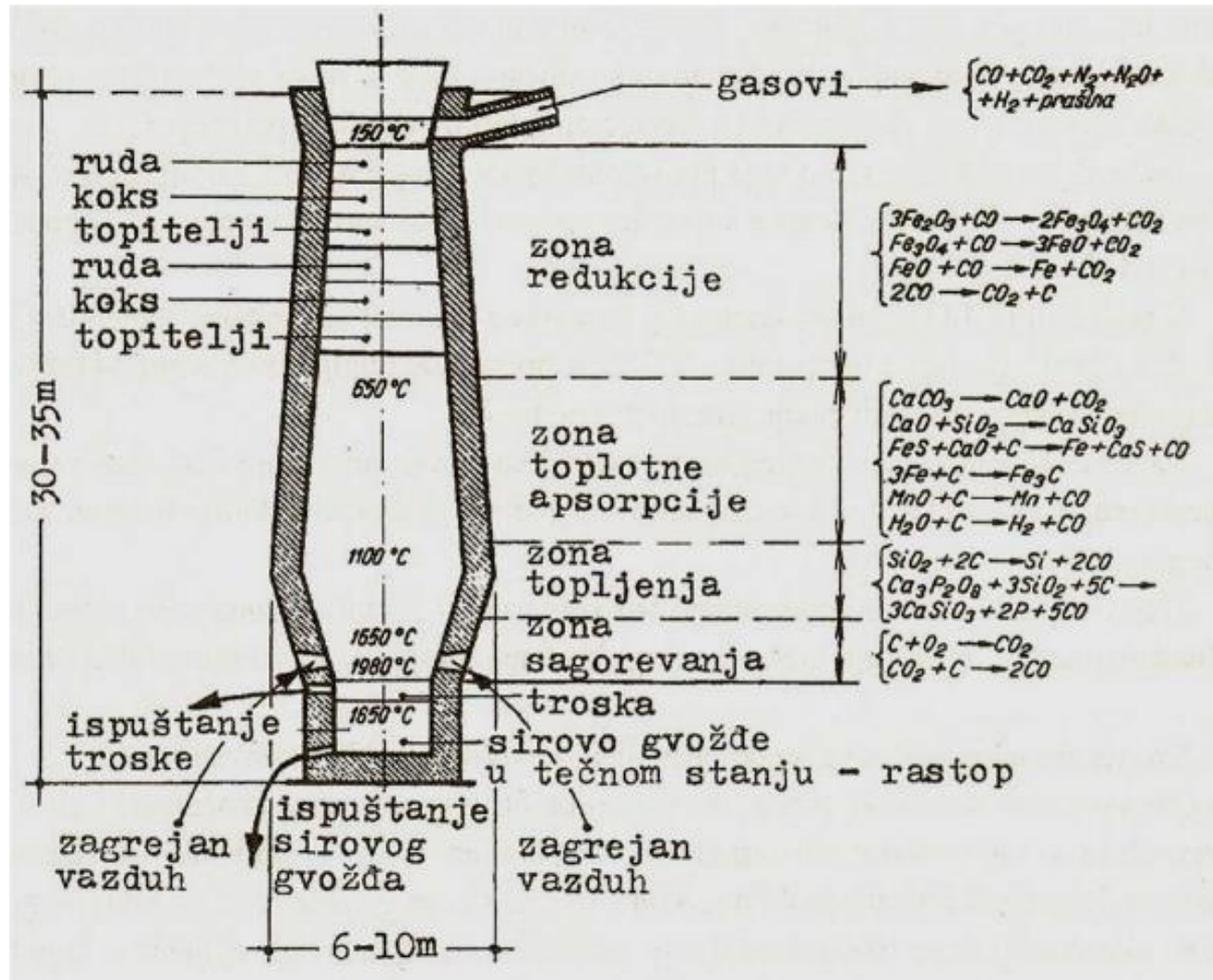
Slika 3. Dijagram stanja gvožđa

- Iznad temperature od 1539°C gvožđe je u tečnom stanju – rastop.
- Pri hlađenju rastopa njegovo očvršćavanje će započeti i završiti se na temperaturi od 1539°C .
- Zastoj na ovoj temperaturi (horizontalni deo dijagrama) nastupa zbog formiranja prvih čvrstih čestica – kristala.
- Zastoji pri hlađenju na temperaturama 1401 , 898 i 768°C nastaju zbog transformacije kristalne rešetke.

DOBIJANJE ČELIKA

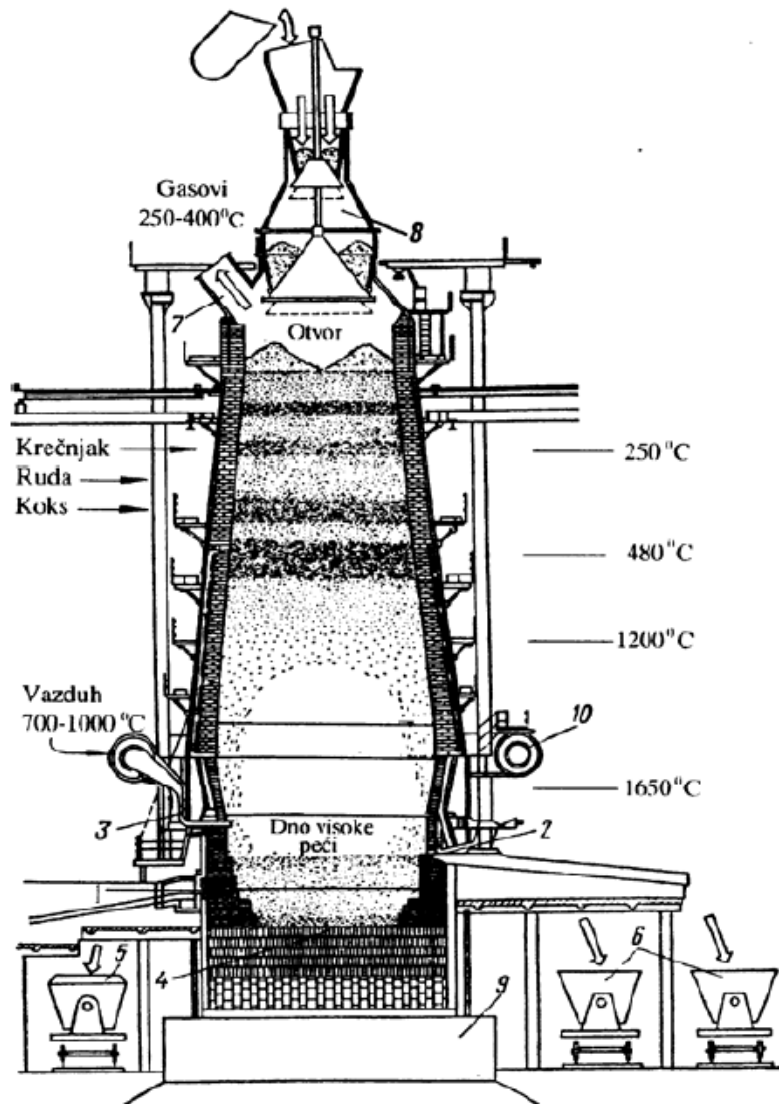
- Čelik se dobija kao rezultat dvoetapnog prečišćavanja (rafinacije) gvozdene rude – magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), karbonat (Fe_2CO_3), pirit (FeS_2).
- U prvoj etapi iz rude dobija se sirovo gvožđe tj. legura gvožđe-ugljenik sa više od 2% ugljenika, dok se u drugoj etapi ovaj sadržaj smanjuje ispod 2% i tako dobija sastav koji odgovara čeliku.
- Sirovi čelik se dobija u tzv. visokim pećima, *slike 4 i 5*, gde se u stvari odvija proces redukcije oksida gvožđa sadržanog u gvozdenoj rudi, uz istovremeno odstranjivanje štetnih primesa kao što su sumpor, fosfor i dr.
- Kao redukciono sredstvo koristi se koks, a pored njega u proces su uključeni i tzv. topitelji (bazni-krečnjak ili kiseli- SiO_2 u obliku kvarca, peska ili šljunka).
- Topitelji snižavaju temperaturu topljenja rude gvožđa, vezuju štetne primese iz rude i grade jedinjenja, koja u vidu troske (zgure) plivaju iznad rastopljene mase metala.
- Viskoka peć se puni naizmenično slojevima rude gvožđa, koksa i topitelja.
- Sa donje strane se uduvava vazduh zagrejan između 600 i 900⁰C, pa se u gorućoj masi odigravaju hemijski procesi uz veliko oslobađanje toplote, tako da je temperatura pri dnu peći blizu 2000⁰C.

DOBIJANJE ČELIKA



Slika 4. Proces dobijanja sirovog gvožđa u visokoj peći

DOBIJANJE ČELIKA



legenda:

1. Otvor za ispuštanje gvožđa
2. Otvor za ispuštanje šljake
3. Duvnice
4. Vatrostalne opeke
5. Odvoz gvožđa
6. Odvoz šljake
7. Odvod gasova
8. uređaj za punjenje
9. Temelj
10. Dovod vazduha

Slika 5. Šematski prikaz visoke peći

DOBIJANJE ČELIKA

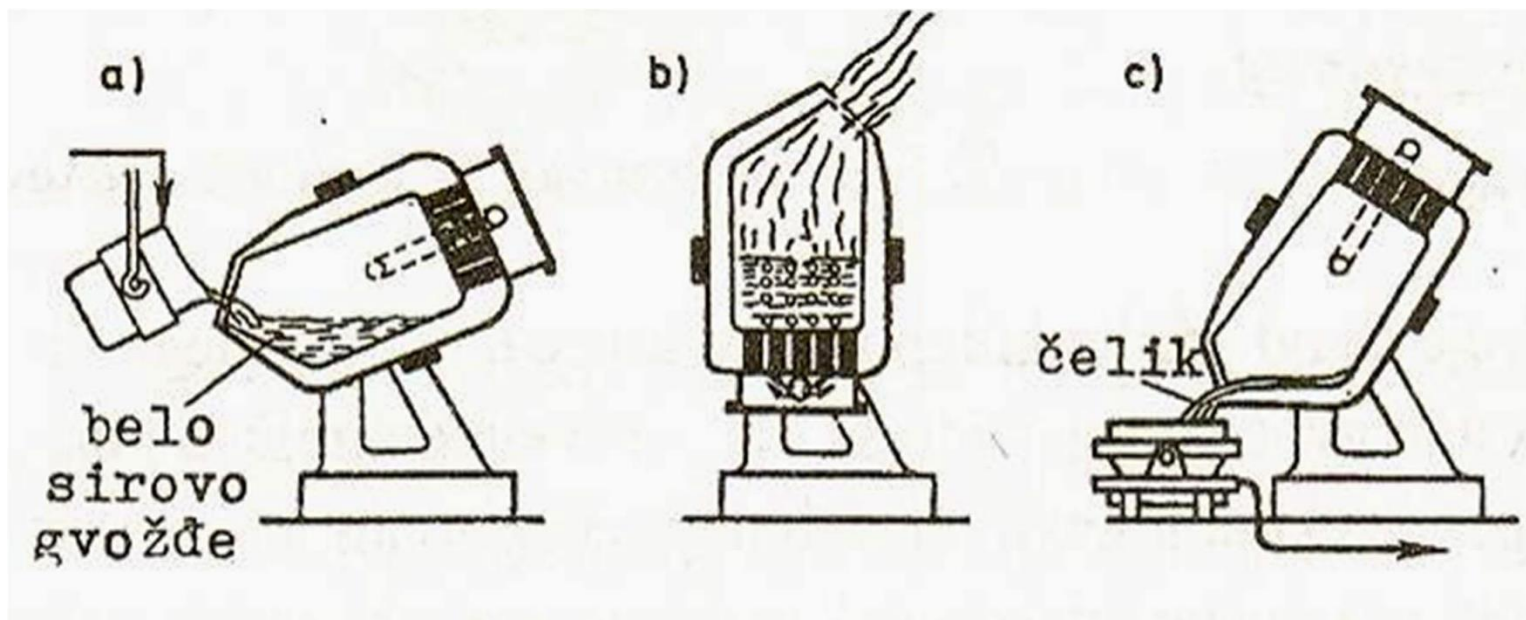
- Proizvodi visoke peći su: rastopljeno gvožđe, tečna troska i visoko-pećni gas. Oni nisu finalni proizvodi, već se koriste kao sirovine za dalju preradu.
- Hemijski sastav gvožđa za preradu u čelik je: 2,5-4% C, 0,9-1,4% Si, 0,5-1,5% Mn, do 0,25% P i do 0,12% S, a hemijski sastav sivog livničkog gvožđa je: 3,6-3,8% C, 1,25-3,75% Si, 0,7-1,1% Mn, 0,3-0,7% P i 0,04-0,06% S.
- Troska posle očvršćavanja može da se prerađuje i koristi u građevinarstvu.
- Visokopećni gas koji pri izlasku iz peći ima temperaturu 250-400°C, služi za zagrevanje manjih peći u livnicama.
- U visokim pećima mogu da se dobiju i ferolegure, kao npr. ferosilicijum i feromangan.
- U zavisnosti od toga da li je u sirovom gvožđu ugljenik hemijski vezan u obliku jedinjenja Fe_3C ili je delimično izlučen u obliku grafita, razlikuju se dve osnovne vrste sirovog gvožđa – belo i sivo.
- Belo sirovo gvožđe se prerađuje u čelik, a sivo se uglavnom koristi u livarstvu.

DOBIJANJE ČELIKA

- Daljim prečišćavanjem i preradom sivog sirovog gvožđa dobijaju se tzv. livena gvožđa.
- Uglavnom se koristi za izradu kanalizacionih cevi, poklopaca šahtova, vodovodnih cevi i vodovodnih armatura, radijatori za centralno grejanje i dr.
- Liveno gvožđe se odlikuje relativno velikom čvrstoćom na pritisak (do 1200 MPa) i znatno manjom čvrstoćom na zatezanje i savijanje (100 – 600 MPa).
- Čelik se dobija smanjivanjem količine ugljenika koji je prisutan u belom sirovom gvožđu do granice od najviše 2% (tokom procesa prerade uklanjaju se i višak primesa – sumpora, silicijuma, fosfora, mangana i dr.)
- U zavisnosti od sastava belog sirovog gvožđa i od vrste čelika koji treba dobiti, prerada belog sirovog gvožđa se može izvršiti:
 - konvertorskim postupkom – u zavisnosti od tipa obloge konvertora razlikuju se dva procesa: Besemerov i Tomasov; u novije vreme u primeni je tzv. kiseonično-konvertorski ili kiseonični proces.
 - Simen-Martenovim postupkom,
 - elektropostupkom.

DOBIJANJE ČELIKA

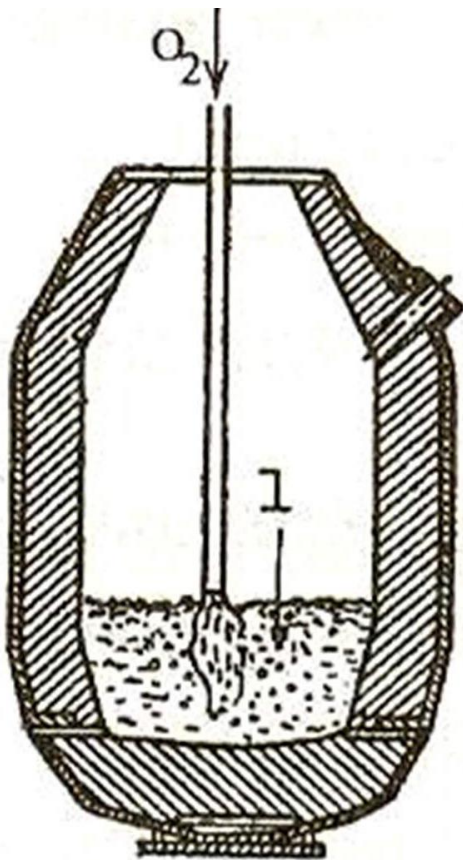
- Konvertorski postupak dobijanja čelika izvodi se u specijalnim pećima – konvektorima u kojima kroz rastoplenu masu uduvava vazduh, *slika 6*.
- Besemerov postupak se primenjuje za preradu belog sirovog gvožđa sa visokim sadržajem silicijuma (do 2%) i mangana (do 1,5%) i minimalnim količinama sumpora i fosfora (troska koja nastaje u najvećem procentu sadrži SiO_2 i oksid mangana).



Slika 6. Konvertorski postupak dobijanja čelika

DOBIJANJE ČELIKA

- Tomasov postupak primenjuje za preradu belog sirovog gvožđa sa visokim sadržajem fosfora (do 2%) i minimalnim količinama silicijuma (do 0,6%) i sumpora (0,07%), pri čemu se dodaje topitelj – živi kreč CaO (troska koja nastaje je sa visokim sadržajem fosfata).



- U novije vreme u primeni je tzv. kiseonično-konvertorski ili kiseonični proces – umesto vazduha na površinu rastopljenog metala u konvertoru se uduvava čist kiseonik (nastala oksidacija je burna i razvija se temperatura do $3000^{\circ}C$), *slika 7*.

Slika 7. Kiseonično - konvertorski postupak dobijanja čelika

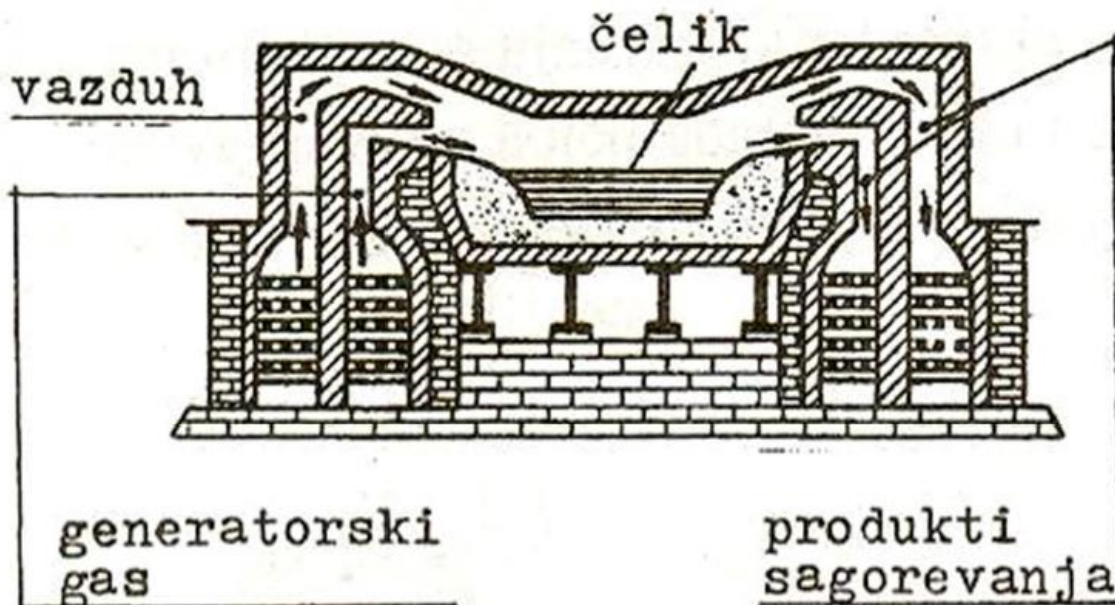
DOBIJANJE ČELIKA

➤ Postupci u plamenim pećima:

- Simens-Martenov postupak, *slika 8*,
- Elektrolučni postupak, *slika 9*.

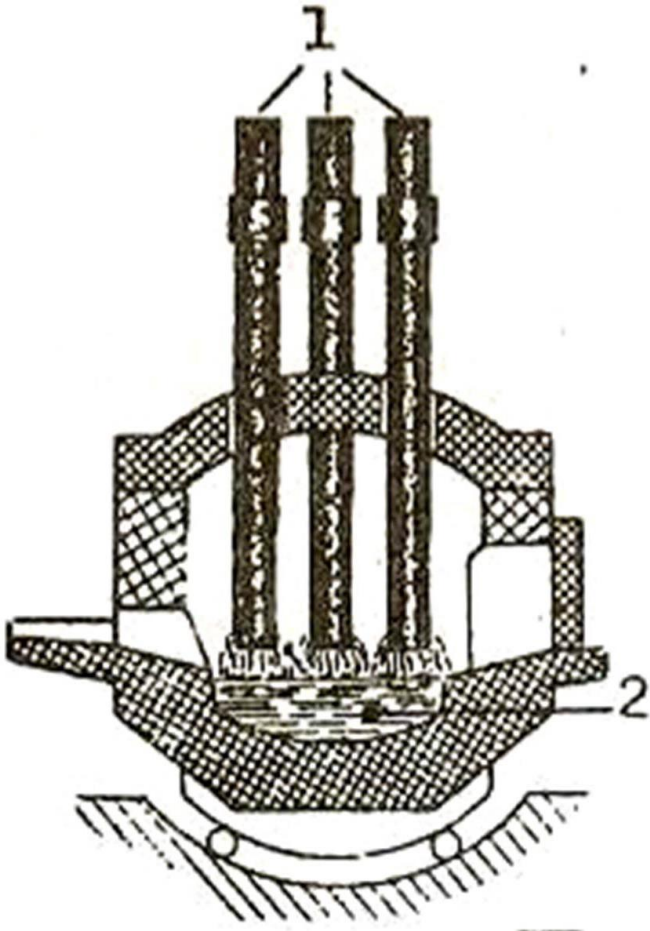
➤ **Simens-Martenov**

postupak: kiseonik se dodaje u obliku oksida gvožđa, a kao sirovina se delimično koristi i otpaci gvožđa i čelika. Topitelj je krečnjak. Pošto azota ima malo dobija se čelik dobrog kvaliteta. Zagrevanje preko smeše vazduha i generatorskog gasa (primenjuje se za sirove čelike sa svim vrstama primesa).



Slika 8. Simens – Martenova peć

DOBIJANJE ČELIKA

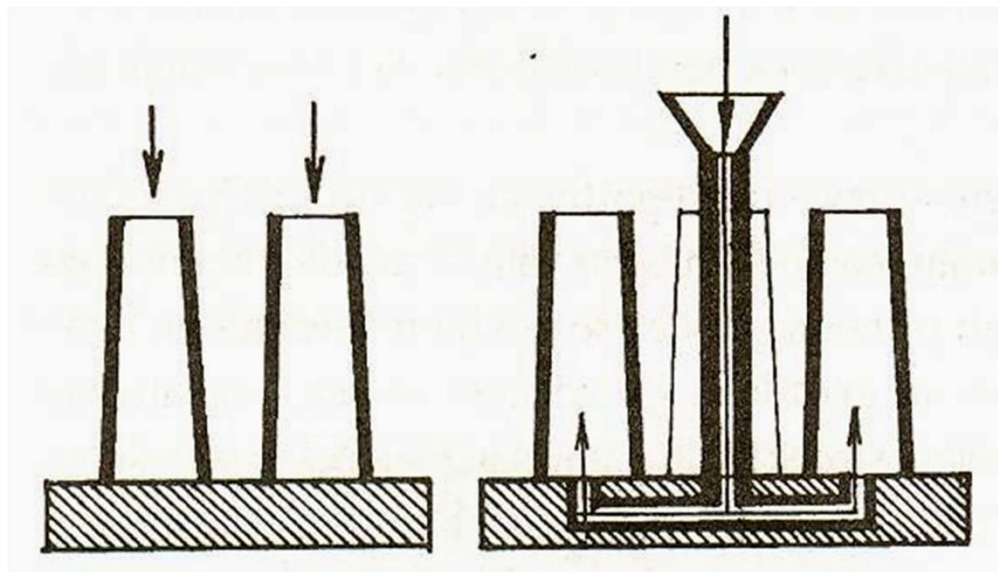


Slika 9. Elektropeč za dobijanje čelika

- Elektro-peći služe za dobijanje čelika tačno definisanog hemijskog sastava i sa minimalnim sadržajem sumpora, fosfora, kiseonika i drugih primesa.
- Puni se sa sirovim gvožđem, gvozdenom rudom i eventualno dodacima za legiranje.
- Zagrevanje je preko električnog luka između elektroda i šarže.
- Osnovni nedostatak niska proizvodnost uz visoke troškove.
- *Dupleks potupak* (kombinacija konvertorskog i elektrolučnog postupka).
- U ovom slučaju se sirovo gvožđe prerađuje u konvektorima u čelik, pa se onda u elektropečima dovodi do zadatog hemijskog sastava

DOBIJANJE ČELIKA

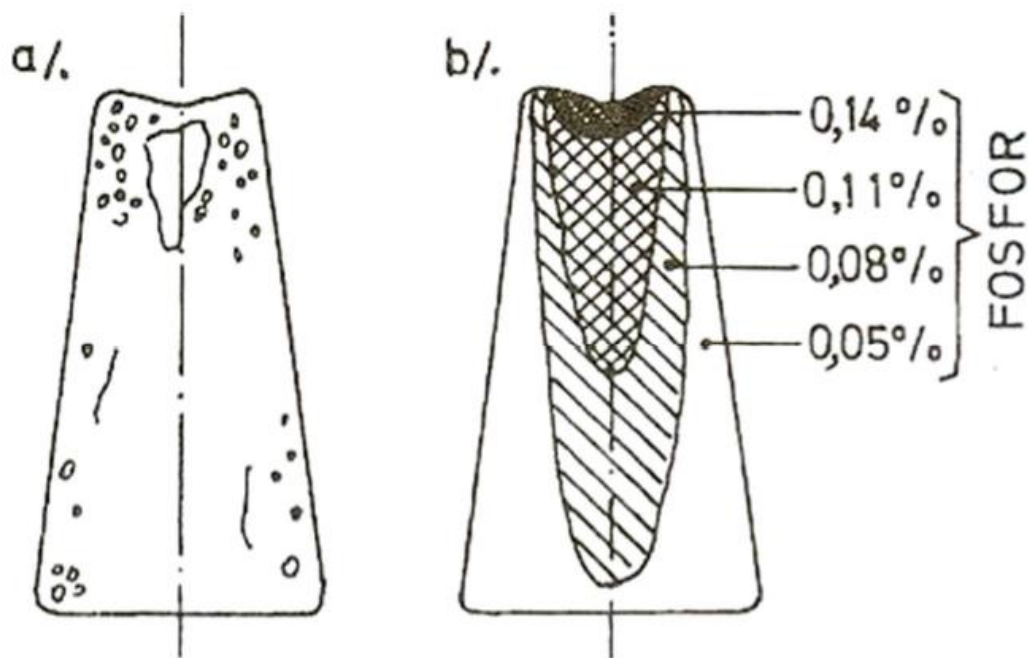
- Tokom postupka dobijanja čelika ugljenik nepotpuno sagoreva obrazujući CO koji teži da izađe iz mase u obliku gasnih mehurova.
- Zato se posle livenja i hlađenja dobija čelik šupljikave strukture sklon segregaciji ugljenika, ubrzanom veštačkom starenju, koncentraciji primesa – ***neumireni čelik***.
- Dodavanjem elemenata koji vezuju kiseonik (Si, Mn, Ti i Al) sprečava se stvaranje gasnih mehurova u rastopljenoj masi – ***umireni čelik***.
- Tečni čelik se izliva u kalupe (***kokile***), *slika 10*, a ohlađeni poluproizvodi se zovu **ingoti**.



Slika 10. Nalivanje rastopljenog čelika u kokile

DOBIJANJE ČELIKA

- Tokom očvršćavanja rastopa, u ingoti se mogu javiti različiti defekti, *slika 11*, koji snižavaju kvalitet čelika i to:



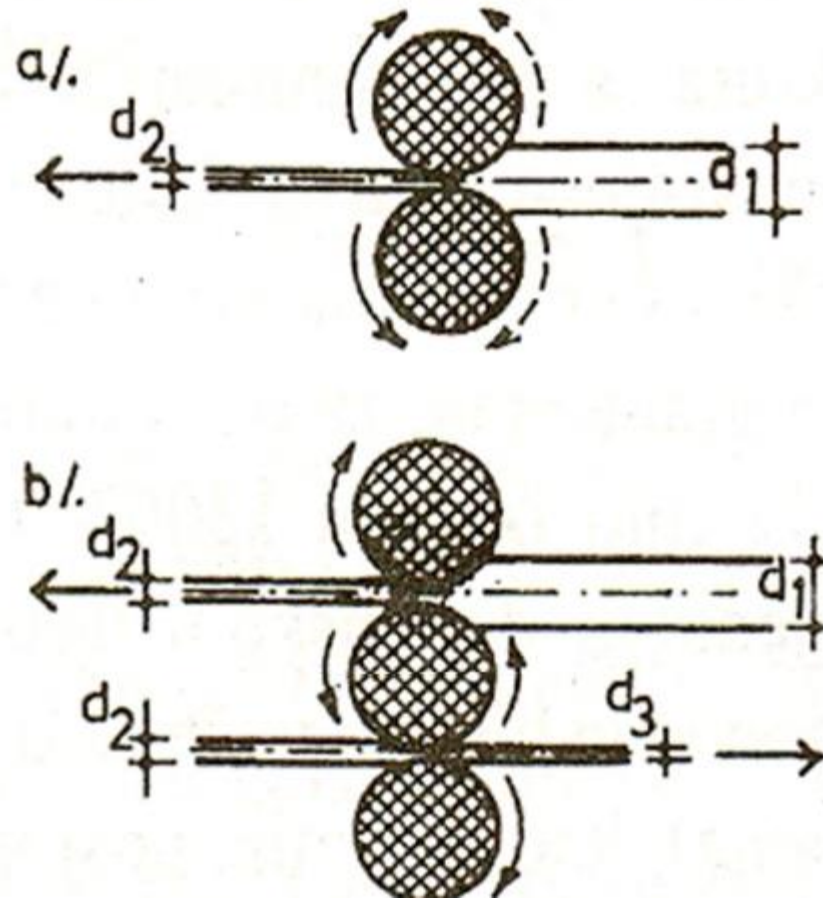
Slika 11. Defekti u ingotu nastali tokom (hlađenja) očvršćavanja

- školjkasto udubljenje na gornjoj površini, *slika 11a*,
- šupljikavost vršnog dela ingota, *slika 11a*,
- prsline usled neravnomerne zapreminske kontrakcije, *slika 11a*,
- mehurići unutar mase, *slika 11b*,
- likvacija – nehomogenost hemijskog sastava.

PRERADA ČELIKA DEFORMACIJOM

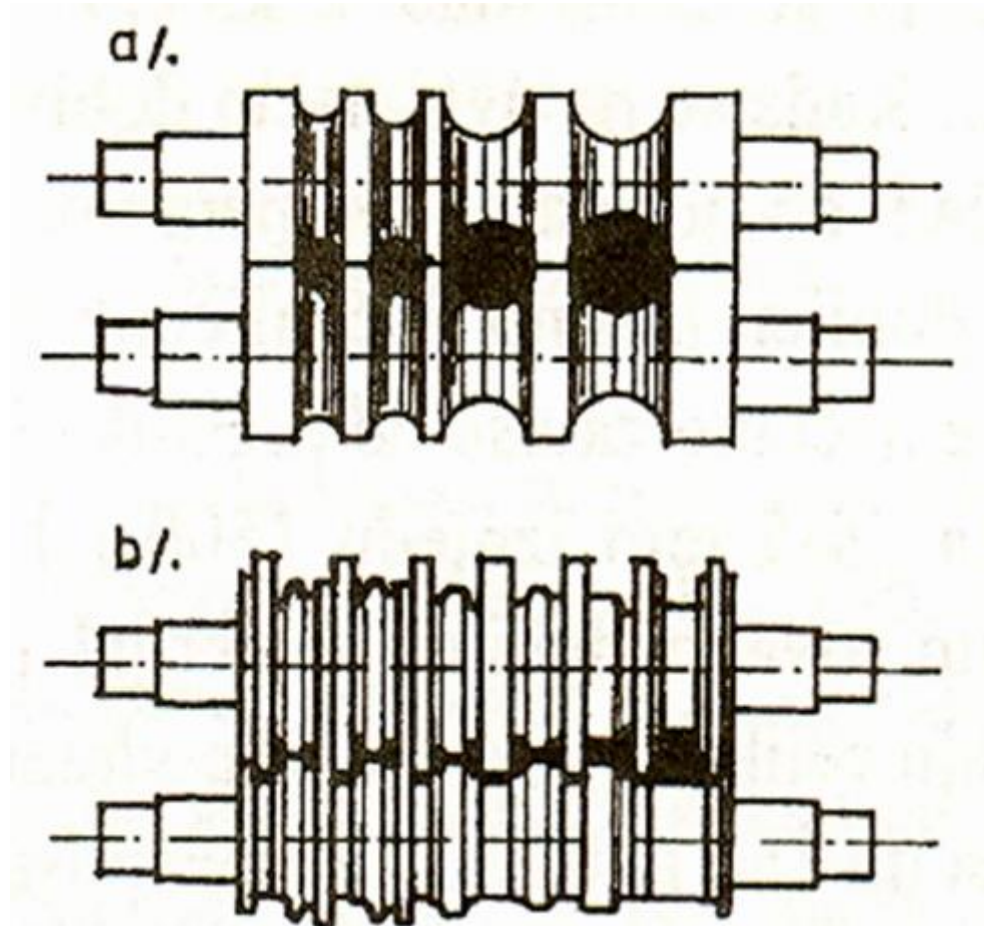
- Za razliku od gvožđa (Fe), čelik se osim livenjem može oblikovati i:
 - valjanjem (dobijaju se čelične ploče – limovi i šipke raznih profila – armatura za beton, valjani profili za čelične konstrukcije, bezšavne cevi) – hladnim ili toplim postupkom, *slike 12 – 15*,
 - izvlačenjem (dobijaju se okrugli profili manjih prečnika – žice) – hladnim ili toplim postupkom, *slika 16*,
 - kovanjem (obrađuju se veći komadi koji se teško valjaju) – toplim postupkom, *slika 17*,
 - presovanjem (zapreminsko presovanje – elementi složenijih oblika, presovanje čeličnih ploča i limova- tankozidni elementi složenog oblika) – hladnim ili toplim postupkom, *slika 18*,
 - istiskivanjem odnosno ekstrudiranjem (dobijaju se šipke - štapovi različitih profila) – toplim postupkom (retko se primenjuje za proizvodnju čeličnih elemenata), *slika 19*.

PRERADA ČELIKA DEFORMACIJOM



Slika 12. Valjanje pomoću glatkih valjaka

PRERADA ČELIKA DEFORMACIJOM



Slika 13. Valjanje pomoću kalibrisanih valjaka

PRERADA ČELIKA DEFORMACIJOM



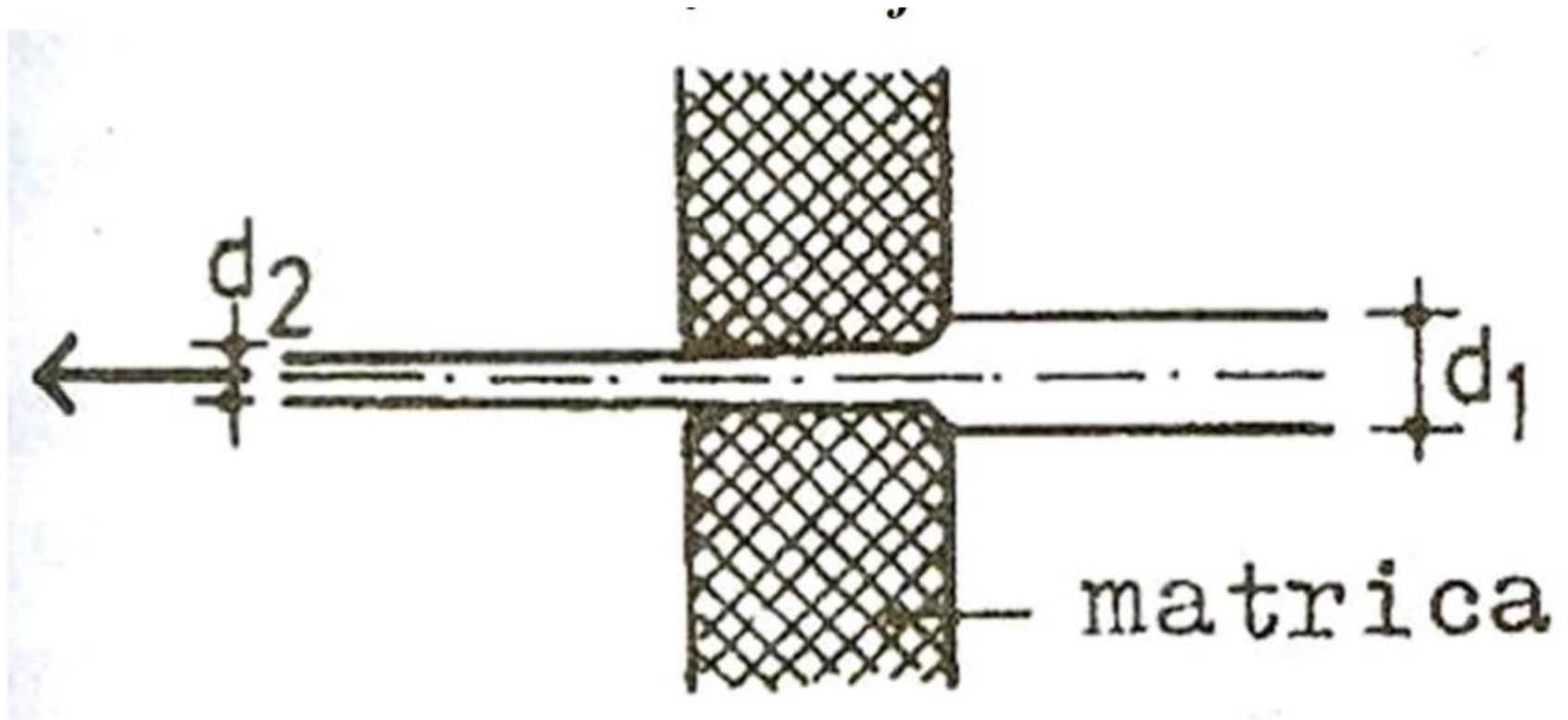
Slika 14. Valjanje I profilapomoću kalibrisanih valjaka

PRERADA ČELIKA DEFORMACIJOM



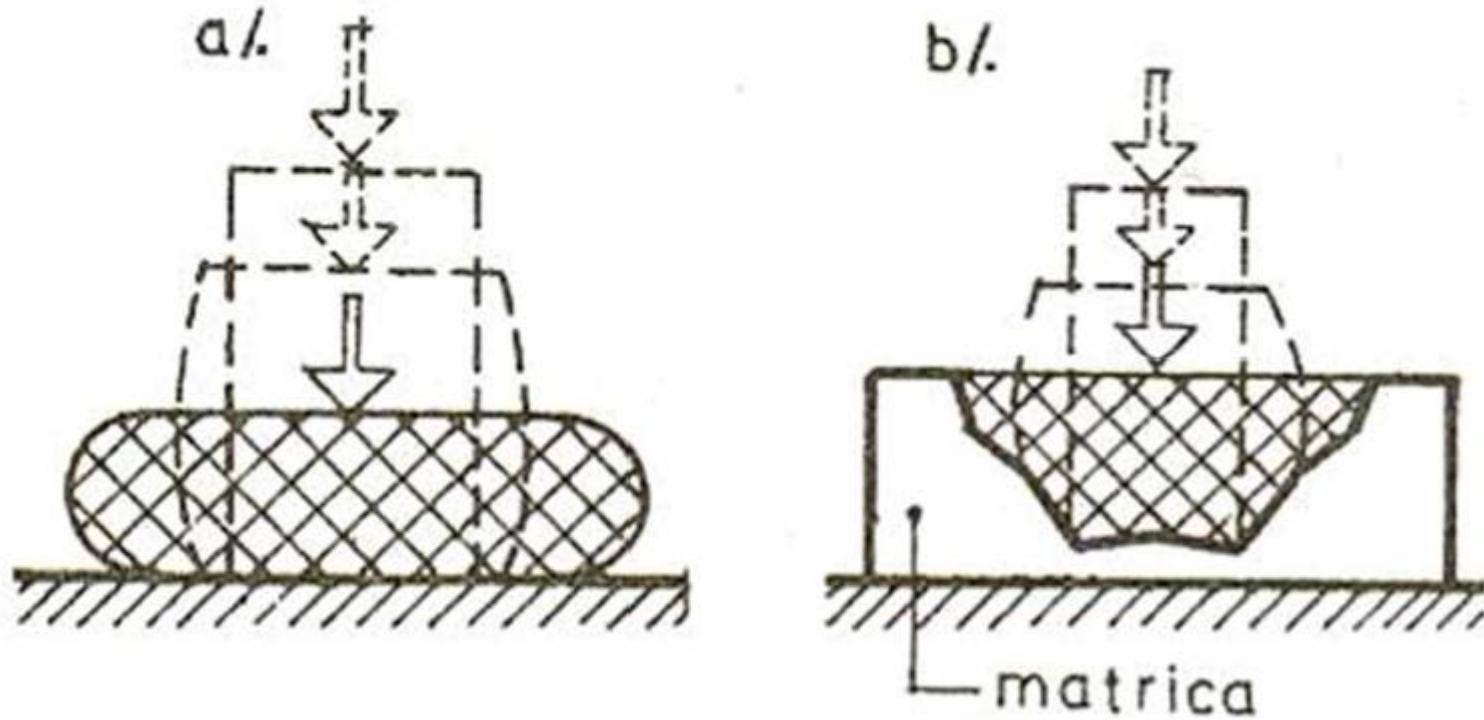
Slika 15. I profil sa širokim nožicama (Pajner) na kraju valjanja

PRERADA ČELIKA DEFORMACIJOM



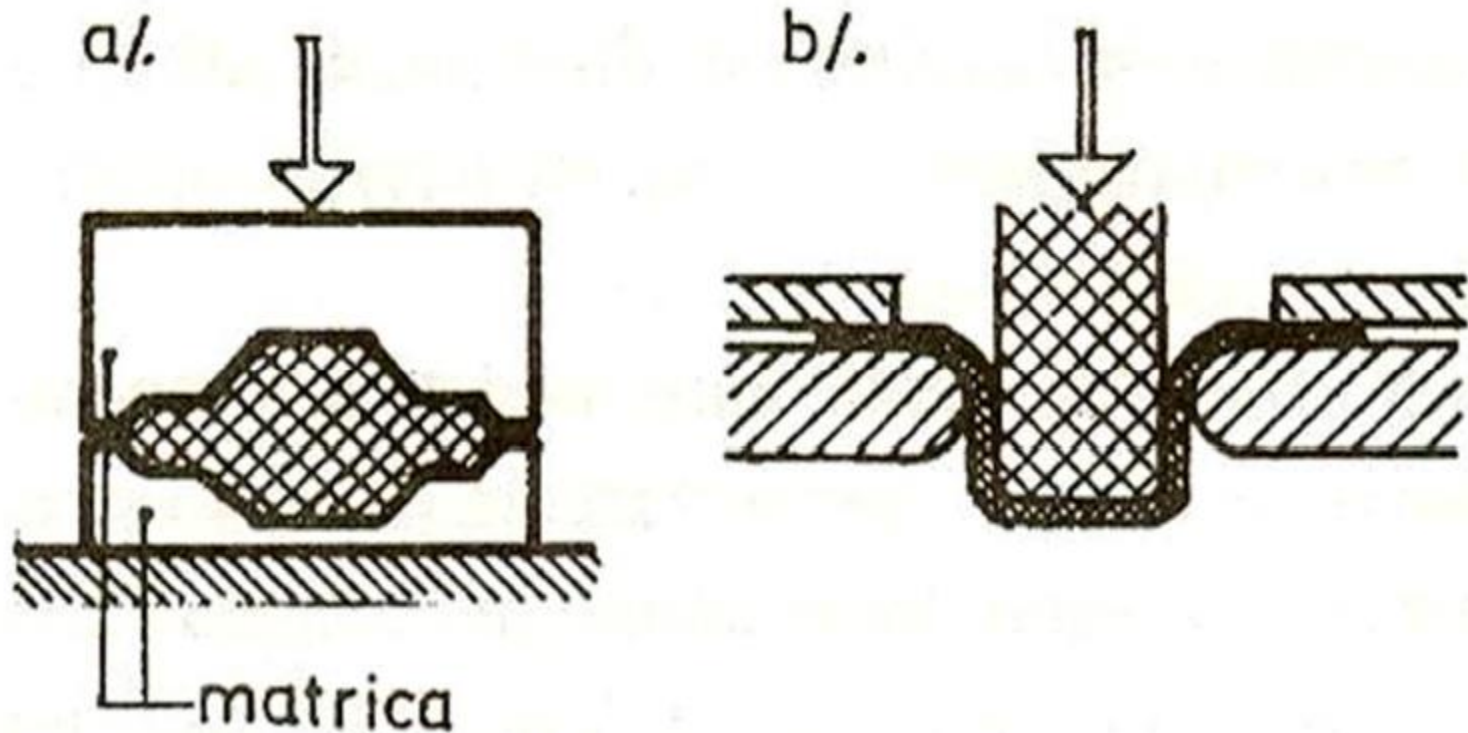
Slika 16. Skica postupka izvlačenja

PRERADA ČELIKA DEFORMACIJOM



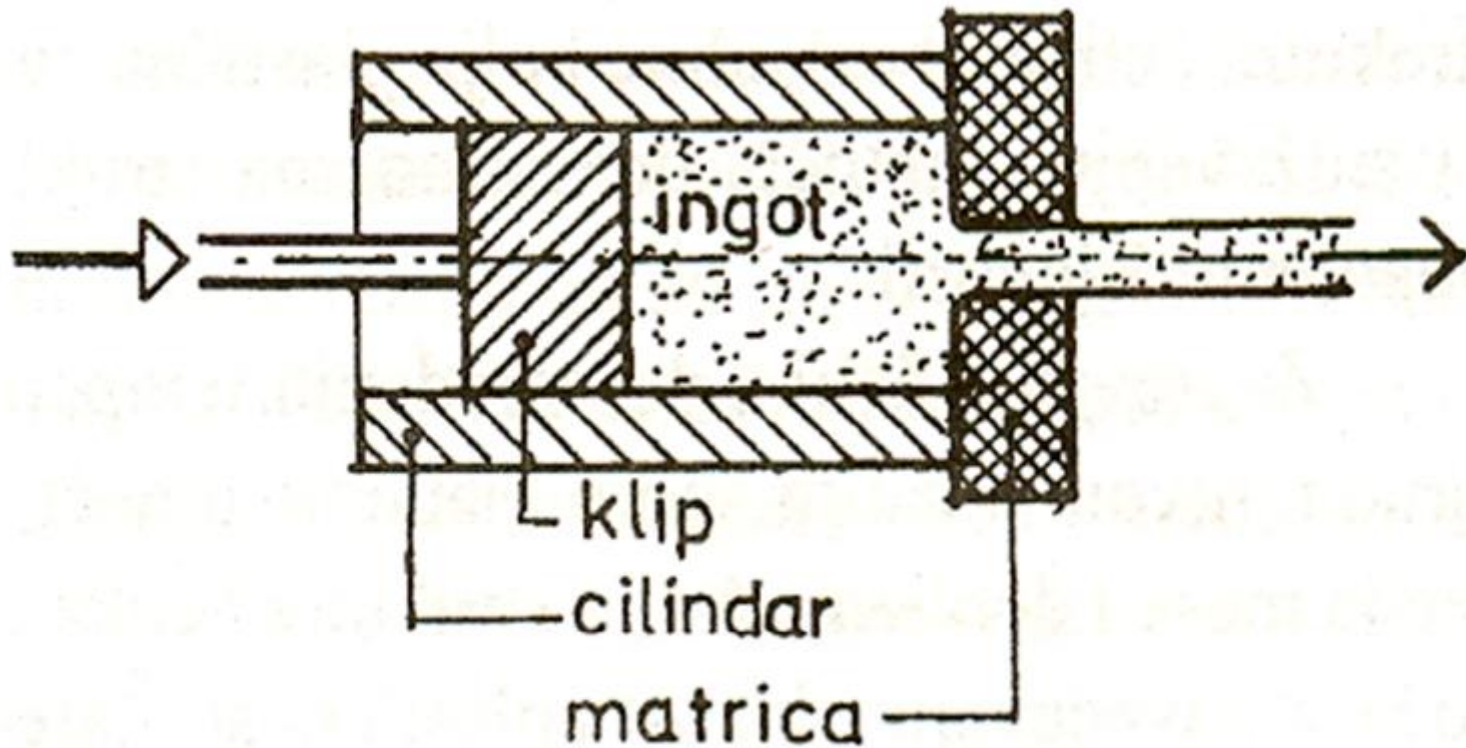
Slika 17. Postupci kovanja – a) slobodno kovanje, b) kovanje u matrici

PRERADA ČELIKA DEFORMACIJOM



Slika 18. Postupci presovanja – a) presovanje u dvodelnoj matrici (zapreminsko presovanje), b) presovanje „na hladno“ čeličnih ploča i limova)

PRERADA ČELIKA DEFORMACIJOM



Slika 19. Postupak ekstrudiranja

UTICAJ PRERADE ČELIKA DEFORMACIJOM NA NJEGOVA SVOJSTVA

- Mehanička i tehnološka svojstva proizvoda dobijenih valjanjem i izvlačenjem, neće zavisiti samo od hemijskog sastava materijala, već u velikoj meri i od tehnologije prerade.
- Ova svojstva u prvom redu zavisice od toga da li se primenjuje toplo ili hladno valjanje, odnosno izvlačenje, zatim od nivoa temperature pri obradi “na toplo”, a bitnu ulogu igra i stepen sažimanja, kako kod obrade “na toplo”, tako još više kod obrade “na hladno”.
- Odgovarajuće zbijanje u toplom stanju uslovljava smanjenje kristalnih zrna i njihov kompaktniji raspored, što doprinosi povećanju mehaničkih otpornosti materijala.
- Hladnom deformacijom (valjanjem i izvlačenjem) dolazi do usmeravanja kristalnih zrna, čime se postižu vrlo visoke čvrstoće, uz istovremeno nepovoljan efekat izvesnog smanjenja žilavosti.
- Sitnozrni materijali imaju uvek veće čvrstoće i tvrdoće, dok krupnozrni, po pravilu, veću plastičnost.

UTICAJ PRERADE ČELIKA DEFORMACIJOM NA NJEGOVA SVOJSTVA

- Svi postupci obrade “na hladno” mogu biti praćeni i međufaznim zagrevanjem, kao i raznim postupcima termičke obrade.
- Tako, na primer, ***patentirana žica***, koja se vrlo široko primenjuje u tehnici prethodnog naprezanja (prednaprezanja), predstavlja proizvod dobijen kombinovanjem ovih postupaka:
 - Kao prvo, žica dobijena valjanjem “na toplo”, zagreva se na 900 – 1000°C, pa hladi u olovnom ili sonom kupatilu na 450 do 500°C (na ovaj način dobija se najpovoljnija struktura za dalji tretman).
 - Žica se zatim postepeno hladi do normalne temperature i provlači kroz odgovarajuće matrice, koje je sažimaju.
 - Ovako dobijen, hladno vućeni čelik odlikuje vrlo visoka f_z (σ_m), koja, načelno, zavisi od prečnika i kreće se u granicama: 1800 MPa (za Ø 2-3 mm), 1500-1800 MPa (za Ø 4-5 mm), 1300-1500 (za Ø 6-12 mm).
- *Napomena:* Danas se za patentiranu, hladno vućenu žicu može dobiti i do 2500 MPa!

UTICAJ PRERADE ČELIKA DEFORMACIJOM NA NJEGOVA SVOJSTVA

- Materijal dobijen na napred opisan način, međutim, može se podvrći i jednom dopunskom tretmanu, tzv. ***opuštanju***: Ponovno zagrevanje hladno vučene žice do temperature 150-400⁰C (u zavisnosti od dužine zagrevanja), uz docnije postupno hlađenje do normalne temperature. Na ovaj način f_z se povećava do 10%, uz poboljšanje žilavosti žice!
- Uticaj brzine hlađenja na strukturu i svojstva čelika – Na strukturu, a time i na svojstva čelika, u značajnoj meri može se uticati brzinom hlađenja. Na koji način?
 - Ako se čelik hladi sporo, u peći, dobiće se znatno krupniji kristali (bolja plastična svojstva – žilavost, duktilnost, ali niža čvrstoća).
 - Ako se isti čelik hladi na vazduhu ili, pak, ako se primeni neki postupak izuzetno brzog hlađenja, dobiće se sitnozrnasta struktura (znatno veća čvrstoću i tvrdoća, ali i smanjena žilavost).

TERMIČKA OBRADA ČELIKA

- **Žarenje:** Zagrevanje do određene temperature, izvesno zadržavanje na tom nivou, zatim sporo hlađenje; ima za cilj homogenizaciju mase i da čelik učini što mekšim za dalju obradu (na pr. obradu hladnim valjanjem ili izvlačenjem).
- **Normalizacija:** Zagrevanje do temperature 950-1000 0C, sa hlađenjem na vazduhu brzinom 20-500C/min. Dobija se zahtevana sitnozrna struktura materijala (konstrukcijski čelik se najčešće isporučuje u “normalizovanom stanju”).
- **Kaljenje:** Zagrevanje do određene temperature T (visoko u austenitskom području), zatim naglo hlađenje. Dobija se krt materijal, visoke tvrdoće i čvrstoće. Radi smanjenja krtosti, kaljenje redovno prati postupak opuštanja.
- **Poboljšanje:** Nakon kaljenja u vodi ili u ulju, zagrevanje na 450-6500C i naglo hlađenje na vazduhu. Raste: f_z , σ_{vi} i ρ !